

基于学习的超分辨率重建技术

刘 琚¹, 乔建苹²

(1. 山东大学信息科学与工程学院, 山东济南250100; 2. 山东师范大学传播学院, 山东济南250014)

摘 要 超分辨率重建是图像处理和计算机图形学领域的热点研究问题. 主要介绍基于学习的超分辨率重建技术的基本理论和研究进展, 包括基于支撑向量机、流形学习和独立分量分析等几种典型的基于学习的超分辨率重建技术以及作者的最新研究结果, 最后对未来可能的发展做了展望.

关键词 超分辨率重建; 支持向量机; 流形学习; 独立分量分析

中图分类号: TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1673-4785(2009)03-0199-09

Learning-based super-resolution reconstruction

LIU Ju¹, QIAO Jian-ping²

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 2. School of Communication, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)

Abstract Super-resolution reconstruction is an important problem in image processing and computer graphics. This paper introduces key mathematical principles and the latest progress in learning-based super-resolution. Several typical artificial intelligent techniques, such as support vector machines, manifold learning, independent component analysis and so on, were analyzed. Finally, areas meriting further investigation were outlined.

Keywords: super-resolution reconstruction; support vector machines; manifold learning; independent component analysis

随着多媒体通信和信息处理技术的发展, 人们对图像分辨率的要求越来越高. 然而许多成像系统受其物理条件的限制, 所得到的图像往往分辨率很低; 而且会有退化变形和受噪声污染, 图像的视觉效果难以满足人们的需要. 如果采用改善物理硬件的方法来获取人们满意的高分辨率图像, 则成本较高, 而且有时难于实现. 因此有必要考虑一种能够克服这些限制的新措施来提高图像空间分辨率. 超分辨率重建技术就在这种背景下应运而生. 该技术弥补了硬件方面的不足, 从软件的角度提高图像的分辨率, 增强图像的可用性. 因此这种技术一经提出, 便引起了许多学者的广泛重视和关注, 目前在电视、遥

感、医学和公安系统等领域都具有非常重要的实际应用价值.

超分辨率重建技术是指融合多幅包含相似信息但存在不同细节的低分辨率图像, 得到一幅或多幅高分辨率图像, 以弥补原始单源观测图像承载信息的局限性. 它是一门综合了信号处理、人工智能和传感器等技术的现代高新技术, 近年来已成为国际上图像处理领域最活跃的研究课题之一.

1 超分辨率重建

1.1 低分辨率成像的数学模型

为了实现对未知高分辨率图像的重建, 首先需要对图像获取的退化过程进行分析和建模.

数字图像在采集过程中可能会受到光学模糊、运动模糊、下采样引起的信号混叠, 以及采集图像过程中环境噪声和系统散弹噪声的影响, 从而使图像受到污染. Elad 提出一种矩阵-向量的方法来描述低分辨率图像的成像模型:

收稿日期: 2008-07-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572105, 60872024); 教育部博士点专项基金资助项目(20050422017); 高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(708059); 山东省自然科学基金资助项目(Y2007G04).

通信作者: 乔建苹. E-mail: jipiao@sdh.edu.cn.

$$y_k = D_k H_k W_k x + n_k \quad (1)$$

式中: x 表示高分辨率图像, y_k 表示第 k 帧低分辨率图像, n_k 表示零均值加性高斯噪声. D_k 、 H_k 和 W_k 分别表示下采样矩阵, 模糊矩阵和几何变换矩阵. 考虑所有帧, 矩阵-向量方程表示如下:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 H_1 W_1 \\ \vdots \\ D_N H_N W_N \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

图1 模拟了低分辨率图像序列的成像过程.

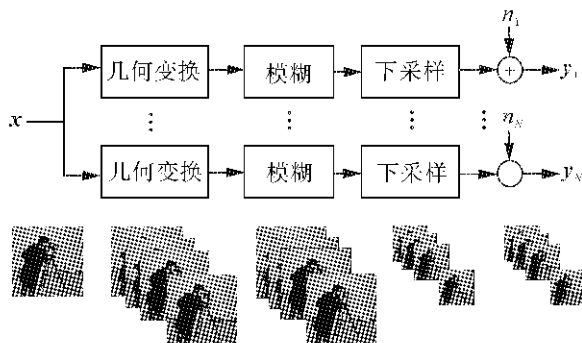


图1 低分辨率图像的成像过程

Fig. 1 LR image acquisition model

超分辨率重建就是利用已有的观测数据和其他相关信息, 通过建立的数学模型获取在一定准则下 x 的较好估计, 它是成像过程的逆过程. 欠采样矩阵 D_k 的逆和分辨率增强因子有间接的关联关系, 其求解可以通过适当数量的低分辨率图像的额外信息进行估计; 模糊矩阵 H_k 可以用成像系统的点扩展函数 (point spread function, PSF) 表示; 而加性噪声则需要根据一定的滤波方法对其进行剔除和抑制. 此外, 由于图像的明暗亮度与相应景物表面的辐射亮度成正比, 不同的低分辨率图像间可能存在的辐射亮度差异等都可能影响重建结果.

超分辨率重建技术最早出现于20世纪60年代, Harris^[1]和Goodman^[2]提出将带限信号外推的方法对偶地运用到光学图像的超分辨率重建中, 奠定了超分辨率赖以存在的数学基础. 随后许多人对其进行了研究, 并相继提出了各种复原方法, 如长椭圆波函数法^[3]、线性外推法^[4]、叠加正弦模板法^[5]等. 这些方法虽然有较好的仿真效果, 但在实际应用中并没有获得理想的结果. 80年代初, Tsai和Huang^[6]首次提出了利用多帧低分辨率退化图像进行空间分辨率增强的概念. 80年代后期以来, 人们在超分辨率图像重建方法研究上取得了突破性进展, 不仅在理论上说明了超分辨率存在的可能性, 而且提出和发展了很多有实用价值的方法.

目前, 超分辨率重建大致可以分为2个方向: 基于重构的方法和基于学习的方法. 基于重构的超分辨率算法是通过一定程度的模糊和下采样对图像获取过程进行建模, 从而假定由高分辨率图像可以生成低分辨率图像. 然而随着分辨率提高倍数的增加, 对于大的放大倍数, 这些方法通常不能很好地重构图像的高频信息.

1.2 关键技术的发展

Baker等^[7-12]指出基于重构的超分辨率技术在分辨率增强大约8~16倍时, 简单的平滑约束很容易使期望的高分辨率图像由于高频信息的丢失过于平滑; 因此引入了基于识别的先验知识, 作为识别决策集的函数. 基于识别的先验是对特定的目标、场景或图像集合进行学习得到的, 即通过计算低分辨率输入图像和高分辨率训练图像的高斯金字塔、拉普拉斯金字塔、水平一二阶梯度、垂直一二阶梯度得到父结构, 然后再以某种测度作为衡量标准, 建立低分辨率输入图像的像素与最匹配的高分辨率像素及高分辨率训练图像间的关系, 然后与超分辨率重构约束合并估计最大后验概率 (maximum a posterior probability, MAP) 的解. 此方法获得了比传统的基于重构的超分辨率方法更好的效果, 这就是基于学习的超分辨率方法. 该方法不仅克服了基于重构的方法在分辨率提高倍数方面的局限性, 而且可以实现单幅图像的超分辨率重建.

Freeman^[13]等提出基于例子的方法, 其基本思想是先学习低分辨率图像与高分辨率图像之间的关系, 然后利用这种关系来指导对图像进行超分辨率. 该文采用马尔可夫网络学习训练库中与低分辨率图像不同区域对应的高分辨率图像的精细细节, 然后利用学习得到的关系预测图像的细节信息. 该算法把图像分成小的块, 并假设每个图像块对应马尔可夫网络上的1个节点, 把变元分配给居中的节点, 且马尔可夫网络上的任意2个节点在统计量上是相互独立的, 然后生成训练库, 运用传播算法求解马尔可夫网络. 在预测阶段, 将低分辨率小块和高分辨率小块连接起来作为1个搜索向量, 在训练集中查找匹配, 寻找最近邻居. 当一个匹配找到时, 相应的高分辨率小块即为输出. 另外, 在训练库中寻找匹配块的搜索算法采用了基于树的逼近最邻近搜索. Bishop^[14]等对此方法进行了改进, 通过有效组织图像块数据库来提高匹配效率. Sun^[15]等则提出通过主要轮廓先验增强图像质量. 与上述使用概率模型的方法相比, Chang^[16]等认为高分辨率和低分辨率图像

块间可以构成具有相似局部几何结构的流形,提出了基于流形学习的方法;Su^[17]等对此方法中的邻居保持问题进行了讨论;Tai^[18]等则利用多尺度张量投票理论来估计未知的高分辨率图像;Joshi^[19]等提出融合不同尺寸的图像进行分辨率增强。

对于人脸这类特殊图像的超分辨率重建,继Baker^[7]等首次提出“人脸幻想”的概念之后,Gunturk等人^[20-21]利用一种与KL变换相似的降维技术将像素域的超分辨率问题转换到低维子空间,即人脸空间,以降低超分辨率算法的计算量。他们首先对高分辨率人脸图像库和相应欠采样后的低分辨率人脸图像库进行训练得到高、低分辨率人脸空间,然后将采集得到的多帧低分辨率人脸图像在低分辨率人脸空间投影,得到相应的多个人脸特征,通过建立低分辨率人脸特征和高分辨率人脸特征间的MAP模型,迭代估计高分辨率人脸特征,实现超分辨率人脸识别。

Liu等人^[22]提出了结合主分量分析(principal component analysis, PCA)与马尔可夫框架实现单帧超分辨率重建的算法。在该算法中,3种约束条件被提出:语义约束、全局约束和局部约束。他们将期望的高分辨率图像分为2个部分:概貌部分和细节部分。首先采用PCA的方法,借助特征向量空间得到了期望高分辨率图像的概貌部分;然后分块建立训练图像与期望高分辨率人脸的概貌之间的非参数马尔可夫框架,通过能量最小化,得到期望高分辨率人脸细节部分的最优解;最后融合图像概貌和细节得到假想的高分辨率人脸图像,但该方法得到的结果较为平滑。Lin^[23]等利用多层感知网络重建高分辨率人脸图像;Gupta^[24]等提出一种同时进行人脸恢复和识别的方法;Jia^[25]等提出人脸表情幻想的超分辨率算法;Peng^[26]等则将二维人脸幻想的方法扩展应用于三维人脸建模中;Wang等人^[27]提出了基于特征脸的人脸超分辨率幻想方案,利用PCA将低分辨率输入图像建模为一些低分辨率训练图像的线性组合,保持融合系数不变,用相应的高分辨率训练图像代替低分辨率训练图像,从而估计出期望的高分辨率图像。

2 基于学习的超分辨率重建方法

2.1 基于流形学习的超分辨率重建技术

流形学习^[28-31]是一种非线性的降维方法。它以微分几何学作为理论基础,结合神经科学提供的生物学依据,其目的是找出隐藏在高维数据中的低维

结构,将高维空间中的数据在低维空间中重新表示。而超分辨率的定义是由低分辨率图像重建高分辨率图像;若将图像或图像块看作空间中的点,那么,超分辨率的目的可以表述为将低维空间中的数据在高维空间中重新表示。由此可以将超分辨率看作流形学习的逆过程,前者是从低维向高维转换,而后者则是从高维向低维转换,进而可以运用流形学习的思想和方法解决超分辨率问题。

香港科技大学的Chang等学者^[16]最早将流形学习的思想用于超分辨率,提出一种基于邻域嵌入的超分辨率重建算法。其基本思想是,假设高分辨率和低分辨率图像块可以构成具有相似局部几何结构的流形,借助于由一组低分辨率图像及其对应的高分辨率图像组成的训练集来估计未知的超分辨率图像。理想情况下,每一个高分辨率图像块不仅和其对应的低分辨率图像块有关,而且和其邻域块也应该保持某种块间联系。第一个特性决定了重建的准确性,而后一个特性则决定了重建图像的局部保持特性和平滑性。为了满足这两点需要,该算法具有以下3个特性:1)每一个高分辨率图像块由训练集中的多个图像块有关;2)低分辨率图像块间的局部关系在对应的高分辨率图像块中保持不变;3)高分辨率图像块间的邻居关系通过交叠来保持,以增强局部保持特性和平滑性。该算法分为矢量集形成和超分辨率重建2部分。首先,将训练集中的高分辨率图像和低分辨率图像分成若干相互交叠图像块,以高分辨率图像块组成的空间作为观测空间(DB_H),对应的低分辨率图像块组成的空间为内在低维空间(DB_L),每个块的特征向量用亮度变化值(一阶和二阶梯度)来表征。训练图像的特征向量集形成矢量集。然后将每个图像块对应的特征向量看作空间中的一点,该点可以用邻近点的线性组合来表示,且观测空间和低维空间的相应数据点具有相同的权值。最后根据低分辨率图像块的特征向量得到的权值和矢量集DB_H中的矢量重建出高分辨率图像。

后来,Ming等人^[32]考虑了训练图像选择的问题,提出不同类型的图像的直方图是不一样的;因而可以利用直方图的欧氏距离选择训练图像,然后在流形学习的框架下进行超分辨率重建。Su等人^[17]则对“邻近邻居问题”进行了探讨,研究了不同的下采样因子和下采样方法对邻居保持的影响,指出用一阶和二阶梯度作为特征提取的方法不能很好地保持邻居特性;因而需要寻求更好的可以保持邻居特性的特征表示或者选择更好的重建函数来提高算法

的性能. Sung 等人^[33]将流形学习中的局部保持投影(locality preserving projection, LPP)方法用于人脸幻想,以更清楚地定义未知测试图像与训练图像间的映射函数.

作者本人在文献[34]中提出一种不随光照变化的图像表示方法——对数-小波变换(Log-WT),并将其应用于超分辨率重建,构造低维嵌套空间,然后在流形学习的框架下重建高分辨率图像,同时进行图像增强,消除阴影效应,有效克服了传统方法对

光照敏感的缺点. 算法流程如图2所示. 将该算法应用于自然图像、文本图像和指纹图像进行超分辨率,自然图像重建结果如图3所示. 可以看出与传统的基于学习的SR算法相比,该方法考虑了光照的角度和强度等因素的影响,不仅有效克服了算法对光照变化的敏感性;而且在增强图像分辨率的同时消除了光照的影响,实现了图像增强,尤其是阴影效应的消除,同时对加性高斯白噪声具有一定的鲁棒性.

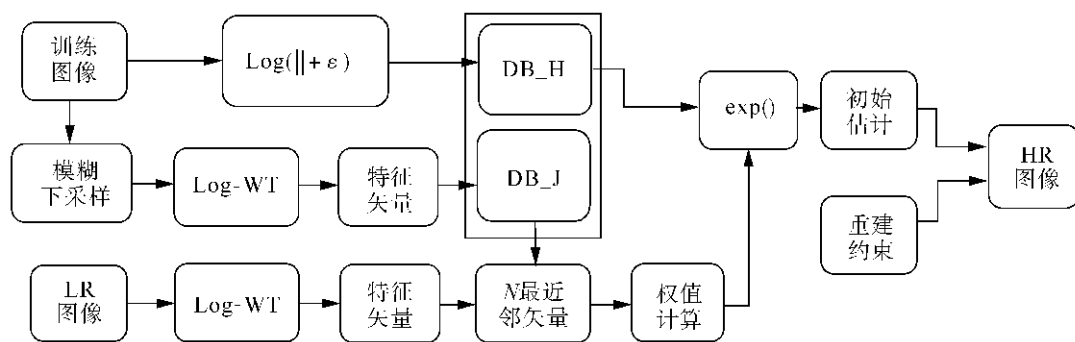


图2 基于Log-WT的超分辨率重建方案流程图

Fig. 2 Schematic diagram of the Log-WT SR algorithm

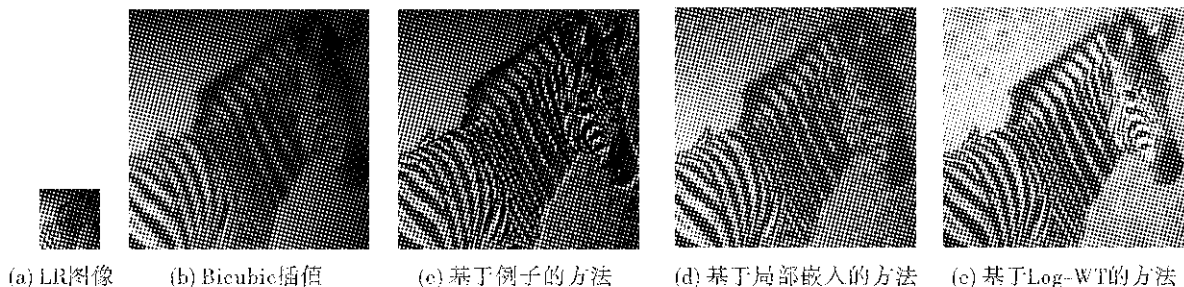


图3 超分辨率重建结果比较

Fig.3 SR results of different methods

2.2 基于支持向量机的超分辨率重建技术

支持向量机(support vector machine, SVM)是建立在统计学习理论的VC维(VC dimension)理论和结构风险最小原理基础上的,根据有限的样本信息在模型的复杂性(即对特定训练样本的学习精度)和学习能力(即无错误地识别任意样本的能力)之间寻求最佳折衷,以期获得最好的推广能力^[35-41]. 与传统统计学相比,支持向量机能很好地解决有限数量样本的高维模型的构造问题,而且具有良好的通用性和快速的运算速度.

由于在很多实际应用中,系统的点扩展函数(PSF)并不能精确知道或者根本不知道;因此进行超分辨率的首要一步是进行模糊辨识,然后实施重建. 在点扩展函数未知的情况下进行超分辨率重建称为

盲超分辨率图像重建. 作者提出一种基于支持向量机的盲超分辨率图像重建算法^[42],其基本思想是假设模糊函数类型已知,且可由某一参数来表征,从模式识别的角度出发,参数辨识可以看作多类分类问题,即从模糊图像中提取出可以代表该图像模糊程度的特征向量,然后采用机器学习的方法训练这些特征矢量与对应的模糊参数的映射关系,最后用于盲超分辨率重建. 整个算法流程如图4所示.

文章中采用Sobel算子和局部方差从训练图像中提取能够表征模糊参数信息的特征向量,其原理为:造成图像退化的点扩展函数可以等效成低通滤波器,图像的低频区域几乎不含有或含有很少的模糊函数的信息,同时具有不同参数的点扩展函数的截至频率是不同的;因而对经不同模糊函数模糊的

图像进行边缘检测后得到的图像包含了模糊函数参数的信息. Sobel 算子作用后产生的图像包含了模糊函数的信息,并且由于它检测的边缘较宽,能最大程度地保留模糊参数的信息. 另外,由于图像的平坦区

域含有很少的模糊函数的信息,对识别的作用很小,因而只选用图像的非平坦区域形成模糊图像的特征矢量集.

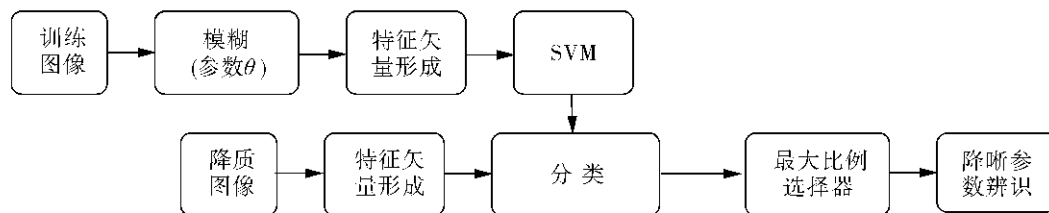


图4 基于SVM的模糊参数辨识算法流程图

Fig. 4 Schematic diagram of the SVM based blur identification algorithm

以 Lena 为训练图像,将测试图像 Panda 进行散焦模糊、下采样和压缩后,产生低分辨率图像. 图5^[34]为对应散焦半径为2.5的低分辨率图像的辨识曲线,图中横轴为设置的模糊函数参数(即散焦半径)可能的取值,纵轴为SVM输出结果统计,即每一个候选参数出现的比例,曲线最高点对应的横坐标即为辨识出来的观测图像的散焦半径. 基于SVM的算法对训练样本的依赖性小,并且对光照,压缩以及各种噪声等具有一定的鲁棒性. 其性能取决于2个重要因素:一个是特征提取的有效性,另一个是分类器的准确性. 可以通过寻找更合理的特征提取方法以及运用其他模式识别的工具诸如隐马尔可夫模型、神经网络等以提高算法的性能.

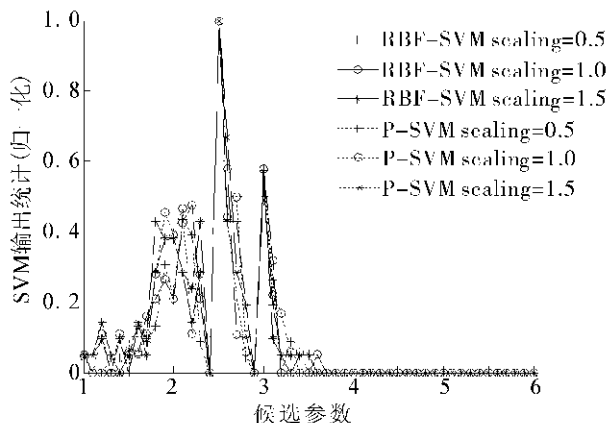
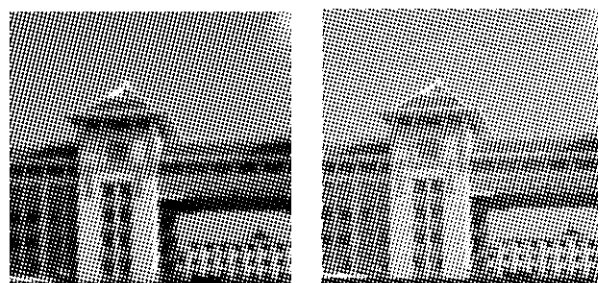


图5 基于SVM参数辨识曲线

Fig. 5 SVM based blur identification curves

图6为从实际拍摄的视频序列中取连续的11帧图像来重建一幅高分辨率图像的实验结果. 取中间帧为参考帧,分辨率倍数提高4倍. 首先将图像由RGB空间转换到YUV空间,对U、V分量用双线性插值,Y分量应用超分辨率算法. CCD相机的降质主要由散焦引起,采用基于SVM的参数辨识算法,估计散焦半径为1.8. 图6(a)为双线性插值的结果;

图(b)为作者所提出的算法的结果^[42].



(a) 线性插值实验结果 (b) 本文方法的实验结果

图6 基于SVM盲重建图像

Fig. 6 SVM based blind SR results

2.3 基于独立分量分析的超分辨率重建技术

独立分量分析(independent component analysis, ICA)^[43]是在研究盲源分离过程中出现的一种新兴的信号处理和数据分析方法. 其起源是人类的“鸡尾酒会效应”^[44],自其出现便成为信号处理、数值分析及神经网络等领域的热点研究问题. 盲源分离是在对彼此独立的源信号的混合过程及各源信号本身均未知的情况下,根据信号的统计特性从几个混合观测信号中恢复出这些未知的源信号,实现混叠信号的盲分离,从而提取出各个源信号. ICA可以根据信号的统计特性从多个观测信号中恢复出未知的独立源成分,目前已在模式识别、特征提取、生物医学信号处理等方面获得广泛应用. 作者在文献[45]提出一种基于ICA的人脸超分辨率图像重建算法. 其基本思想是,假设 P 个独立分量张成空间 Ω ,则每幅图像可以看作空间中的一点,即可以由这些独立分量线性组合而成. 利用ICA从高分辨率训练图像中提取出独立分量,同时估计ICA系数的先验. 给定一幅低分辨率图像,结合最大后验概率(MAP)估计理论求出ICA系数,然后ICA反变换得到高分辨率图像的近似估计. 该算法有效实现了人脸超分

分辨率重建,保持了人脸整体结构特征,且对光照、表情、姿态等具有一定的鲁棒性. 整个算法的流程如图7所示.

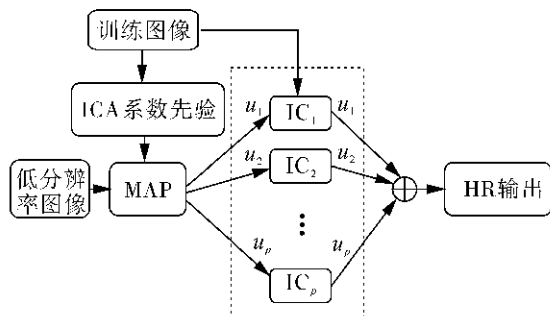


图7 基于ICA的人脸幻觉方案流程图

Fig.7 Block diagram of the ICA-based hallucination algorithm

试验中,将AR人脸数据库中的图像根据指定的位置,例如眼睛和嘴巴等,进行仿射变换,将所有人脸对齐,然后裁减至大小为 96×96 作为高分辨率

图像. 图像库中包含具有不同表情、姿态和光照的人脸图像. 训练时选取580幅作为训练图像,另外的不同于训练图像的30幅作为测试图像. 低分辨率图像的产生过程包括高斯模糊和平均下采样. 低分辨率图像的大小为 24×24 . 重建结果如图8所示^[45]. 可以看出基于ICA的方法的结果最忠实于原始图像,而基于局部嵌入的方法的结果有较多的块效应,两步法的结果与原始图像有较大差别,基于特征脸的方法的结果则比较模糊. 这是由于PCA是基于二阶统计量的算法,而人脸图像含有丰富的相位信息,这些相位信息需要用高阶统计量来表述. ICA既可以表示二阶统计信息,又可以表示高阶统计信息,因此本节提出的基于ICA的方法具有更好的性能. 从计算复杂度来看,基于局部嵌入的方法计算量最小,只需一幅训练图像就可以,且该方法的重建结果不受训练图像数目的影响,即训练图像用多幅和一幅所得到的结果没有太大差别.

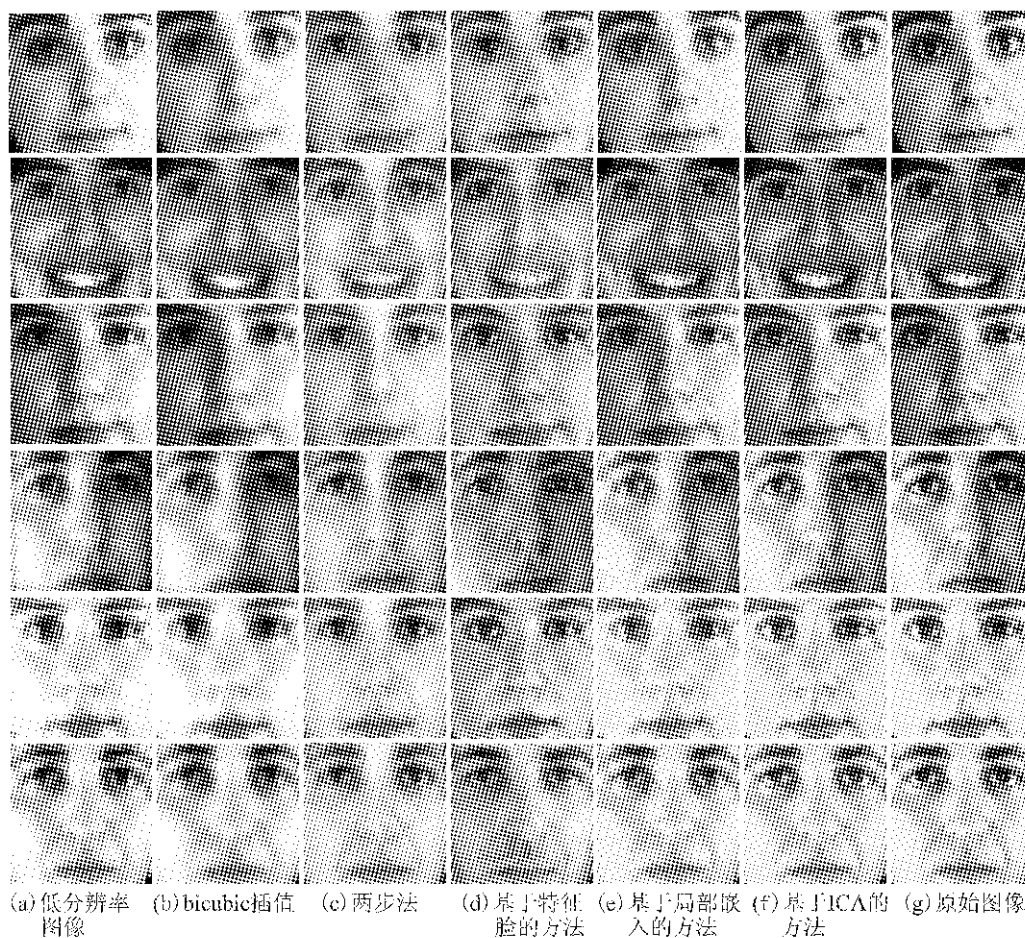


图8 AR人脸数据库重建结果

Fig.8 Hallucination results of AR database

3 结 论

超分辨率技术虽然经历了多年的发展并取得了丰富的成果,但这一领域仍存在着许多问题有待进一步研究。

1) 退化模型. 图像超分辨率重建通常采用简单确定的降质模型进行近似,然而近似模型和实际成像过程差距很大. 在成像系统中,观察模型精确地对图像退化进行描述有利于对图像解空间进行约束,因而进行这方面的研究是十分有意义的. 此外,还应该对 CCD 图像传感器的几何属性、积分属性、噪声和读出噪声属性等方面给予关注,发展和寻求准确的符合实际成像系统的退化模型,更好地对传感器观察过程进行建模,使其更加精确和全面,提高图像重建的效果。

2) 压缩域的超分辨率重建. 传统的超分辨率算法都是基于图像序列,而实际中最常见的图像序列是视频文件. 因而下一步的工作可以针对不同的视频压缩格式和编解码技术,在超分辨率算法中综合考虑成像模型和压缩算法带来的图像降质效果,以及运动补偿和编码传输机制,提高压缩视频的超分辨率能力。

3) 人脸超分辨率. 在视频监控中,经常要对获取的人脸图像进行识别. 然而,获取的人脸图像常常是分辨率较低,或者观测的方向也存在一定的限制. 目前,超分辨率人脸的假想大多是对正面的人脸图像进行处理,并且人脸库的建立也需要严格控制,这就限制了人脸识别的准确率及运用的普遍性. 如何对人脸的不同姿态进行校正、寻求适用于不同场合的超分辨率人脸假想和识别方案也将是急待解决的关键问题。

4) 效率和鲁棒性问题. 超分辨率重建具有很高的计算复杂度,特别是对于大尺寸的图像来说,重建算法需处理多达上亿个像素数据,速度十分关键. 因而如何减小计算量,提高算法的速度,以适应不同的图像要求,是下一步值得研究的问题. 同时,在目前的很多算法中都做了很多假设,例如照度不变等,然而这些在实际中往往是很难实现的,因此稳健的算法也是需要研究的一个方向。

总之,超分辨率重建技术是一个相当困难且具有挑战性的研究课题,而基于学习的方法是在基于重构的方法遇到困难的情况下发展起来的,虽然起步较晚;但目前看来能够弥补基于重构的方法的很多不足,结合智能技术的发展,这类方法能极大地提

高视频空间分辨率,是值得进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] HARRIS J L. Diffraction and resolving power[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, 54(7): 931-936.
- [2] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier optics*[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [3] BROWN H A. Effect of truncation on image enhancement by prolate spheroidal function[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, 59: 228-229.
- [4] JAIN A K. *Fundamentals of digital image processing*[M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall, 1989.
- [5] WADAKS S, SATO T. Super-resolution in incoherent imaging system[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1975, 65(3): 354-355.
- [6] TSAI R Y, HUANG T S. *Multipleframe image restoration and registration*[C]//*Advances in Computer Vision and Image Processing*. Greenwich, USA: JAI Press Inc, 1984: 317-339.
- [7] BAKER S, KANADE T. *Hallucinating faces*[R]. Pittsburgh, USA: The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1999.
- [8] BAKER S, KANADE T. *Hallucinating faces*[C]//*IEEE Int Conf on Automatic Face and Gesture Recognition*. Grenoble, France, 2000: 83-88.
- [9] BAKER S, KANADE T. Limits on super-resolution and how to break them[C]//*IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition*. Hilton Head Island, USA, 2000, 2: 372-379.
- [10] BAKER S, KANADE T. Super-resolution: limits and beyond[M]//CHAUDHURI S. *Super-resolution imaging*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Press, 2001: 243-276.
- [11] BAKER S, KANADE T. Super-resolution: reconstruction or recognition[C]//*IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*. Baltimore, USA, 2001: 215-219.
- [12] BAKER S, KANADE T. Limits on super-resolution and how to break them[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(9): 1167-1183.
- [13] FREEMAN W T, JONES T R, PASZTOR E C. Example-based super-resolution[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002, 22(2): 56-65.
- [14] BISHOP C M, BLAKE A, MARTHI B. Super-resolution enhancement of video[C]//*International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. Key West, USA, 2003: 410-414.
- [15] SUN Jian, ZHENG Nanning, TAO Hai, et al. Image hal-

- lucination with primal sketch priors [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Madison, USA, 2003, 2: 729-736.
- [16] CHANG H, YEUNG D Y, XIONG Y. Super-resolution through neighbor embedding [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC, USA, 2004, 1: 275-282.
- [17] SU K, TIAN Q, XUE Q, et al. Neighborhood issue in single-frame image super-resolution [C]//IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Amsterdam, The Netherlands, 2005: 1-4.
- [18] TAI Y W, TONG W S, TANG C K. Perceptually-inspired and edge-directed color image super-resolution [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC, USA, 2006, 2: 1948-1955.
- [19] JOSHI M V, CHAUDHURI S, PANUGANTI R. A learning-based method for image super-resolution from zoomed observations [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2005, 35(3): 527-537.
- [20] GUNTURK B K, BATUR A U, ALTUNBASAK Y, et al. Eigenface-based super-resolution for face recognition [C]//IEEE International Conference on Image Processing. Rochester, USA, 2002, 2: 845-848.
- [21] GUNTURK B K, BATUR A U, ALTUNBASAK Y, et al. Eigenface-domain super-resolution for face recognition [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(5): 597-606.
- [22] LIU Ce, SHUM H Y, ZHANG Changshui. A two-step approach to hallucinating faces: global parametric model and local non-parametric model [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Kauai Marriott, Hawaii, USA, 2001, 1: 192-198.
- [23] LIN Dahua, LIU Wei, TANG Xiaoou. Layered local prediction network with dynamic learning for face super-resolution [C]//IEEE International Conference on Image Processing. Genova, Italy, 2005, 1: 885-888.
- [24] GUPTA M D, RAJARAM S, PETROVIC N, et al. Restoration and recognition in a loop [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, USA, 2005, 1: 638-644.
- [25] JIA Kui, GONG Shaogang. Multi-resolution patch tensor for facial expression hallucination [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, USA, 2006, 1: 395-402.
- [26] PENG Shiqi, PAN Gang, WU Zhaohui. Learning-based super-resolution of 3D face model [C]//IEEE International Conference on Image Processing. Genova, Italy, 2005, 2: 382-385.
- [27] WANG Xiaogang, TANG Xiaoou. Hallucinating face by eigentransformation [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 2005, 35(3): 425-434.
- [28] LEE D D, COGNITION H S. The manifold ways of perception [J]. Science, 2000, 290(5500): 2268-2269.
- [29] TENENBAUM J B, SILVAM V D, LANGFORD J C. A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction [J]. Science, 2000, 290(5500): 2319-2323.
- [30] ROWEIS S T, SAUL L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding [J]. Science, 2000, 290(5500): 2323-2326.
- [31] BALASUBRAMANIAN M, SCHWARTZ E L, TENENBAUM J B. The Isomap algorithm and topological stability [J]. Science, 2002, 295(5552): 7.
- [32] MING Chantak, ZHANG Junping. An improved super-resolution with manifold learning and histogram matching [C]//Proceedings of IAPR International Conference on Biometric, LNCS3832. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 756-762.
- [33] PARK S W, SAVVIDES M. Breaking the limitation of manifold analysis for super-resolution of facial images [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Honolulu, USA, 2007, 1: 573-576.
- [34] QIAO Jianping, LIU Ju, CHEN Yenwei. Joint blind super-resolution and shadow removing [J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2007, E90-D(12): 2060-2069.
- [35] LIU Y H, CHEN Y T. Face recognition using total margin-based adaptive fuzzy support vector machines [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2007, 18(1): 178-192.
- [36] WANG Yongqiao, WANG Shouyang, LAI K K. A new fuzzy support vector machine to evaluate credit risk [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2005, 13(6): 820-831.
- [37] JUANG C F, CHIU S H, SHIU S J. Fuzzy system learned through fuzzy clustering and support vector machine for human skin color segmentation [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part A, 2007, 37(6): 1077-1087.
- [38] WASKE B, BENEDIKTSSON J A. Fusion of support vector machines for classification of multisensor data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(12): 3858-3866.
- [39] ZAFEIROU S, TEFAS A, PITAS I. Minimum class variance support vector machines [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(10): 2551-2564.
- [40] OSUNA E, FREUND R, GIROSI F. Training support vector machines: an application to face detection [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pat-

tern Recognition. San Juan, Puerto Rico, 1997: 130-136.

[41] LI Dalong, MERSEREAU R M, SIMSKE S. Blind image deconvolution using support vector regression[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Philadelphia, USA, 2005, 2: 113-116.

[42] 乔建苹, 刘 据. 基于支持向量机的盲超分辨率图像复原算法[J]. 电子学报, 2007, 35(10): 4248.

QIAO Jianping, LIU Ju. A SVM-based blind super-resolution image restoration algorithm[J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 35(10): 42-48.

[43] COMON P. Independent component analysis, a new concept? [J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 287-314.

[44] 刘 据, 何振亚. 盲源分离和盲反卷积[J]. 电子学报, 2002, 30(4): 570-576.

[LIU Ju, HE Zhenya. A survey of blind source separation and blind deconvolution [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(4): 570-576.

[45] LU Ju, QIAO Jianping. Face hallucination based on independent component analysis[C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Seattle, USA, 2008, 1: 3242-3245.

作者简介:



刘 据, 男, 1965年生, 教授、博士、博士生导师。现为山东大学信息科学与工程学院学术委员会副主任、通信工程系主任; 海信数字多媒体技术国家重点实验室客座专家; IEEE和IEICE会员; 《电路与系统学报》和《数据采集与处理》编委。主要研究方向为无线通信中空时信号处理技术、盲信号处理理论与应用、多媒体通信与网络传输技术等。2002年到2003年为西班牙加泰罗尼亚理工大学和加泰罗尼亚通信技术研究中心访问教授, 2005年受DAAD项目资助赴德国不来梅大学和杜伊斯堡-埃森大学进行合作研究。发表学术论文150余篇。



乔建苹, 女, 1981年生, 讲师, 博士, IEICE会员。主要研究方向为多媒体信息处理与传输、超分辨率图像重建, 发表学术论文20余篇。

2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics

IEEE 机器人与仿生技术国际会议

December 18-22, 2009, Guilin, Guangxi, China

The 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) is to provide a forum for researchers in the interdisciplinary areas of robotics and biomimetics to disseminate their latest research results. The theme of 2009 ROBIO is "Robot-assisted bioengineering to serve humans".

For detailed format information, please visit the conference website. All accepted papers will be indexed by EI and included in IEEE Xplore.

Important Dates:

Submission of full papers: July 15, 2009

Proposals of workshops/tutorials: August 31, 2009

Paper acceptance: September 30, 2009

Final paper submission: October 15, 2009

Secretariat:

Miss Pat Chan

Department of Mechanical and Automation Engineering,

The Chinese University of Hong Kong, Shatin, NT, Hong Kong

Tel: (852) 2696-1381

Fax: (852) 2603-6002

Email: pchan@mae.cuhk.edu.hk

Website: www.robio2009.org