

文章编号: 1672-2892(2011)01-0001-06

视频超分辨率重建技术综述

何小海, 吴媛媛, 陈为龙, 卿粼波

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要: 在获取视频过程中, 有许多因素会导致视频质量的退化, 使得视频的空间分辨率降低; 而摄像机曝光时间和拍摄帧率又限制了视频的时间分辨率。视频超分辨率重建是一种能有效提高视频时间分辨率和空间分辨率的方法, 已经在计算机视觉和图像处理等领域引起了广泛关注。详细阐述了视频超分辨率重建研究的概念和必要性, 并较全面地回顾了超分辨率技术近年来的发展历程, 对视频超分辨率重建中关键问题进行了较为深入的分析, 指出了当今研究难点和今后的研究方向, 对视频超分辨率重建的应用前景进行了展望。

关键词: 视频重建; 空间超分辨率; 时间超分辨率; 帧间配准; 时空对齐

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

A survey of video super-resolution reconstruction technology

HE Xiao-hai, WU Yuan-yuan, CHEN Wei-long, QING Lin-bo

(College of Electronics Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract: In the process of obtaining video, many factors lead to the degradation of the video quality, and lower the spatial resolution of video; on the other hand, the exposure time and the frame rate of camera limit the time resolution of video. Video super-resolution reconstruction is an effective way to improve the temporal resolution and the spatial resolution of video, which has aroused wide concern in computer vision and image processing fields. In this paper, the concept of video super-resolution is described and the development phases in recent years are reviewed. In addition, some of the key technologies are analyzed. Furthermore, the challenges in this field are pointed out. Finally, the application of video super-resolution reconstruction technology is prospected.

Key words: video reconstruction; space super-resolution; time super-resolution; frame to frame movement registration; spatial temporal alignment

随着 CCD 和 CMOS 图像传感器的飞速发展, 数字视频摄像技术和处理技术被广泛运用到数字电视、网络播放、视频监控、医学诊断、交通管理等与人们生活息息相关的领域, 也成为了天文探测、宇航、遥感、制导、预警等军事和科研领域中不可缺少的技术。近年来, 人们对视频质量的要求不断提高, 希望摄像机能捕捉到更多的细节信息和动态信息, 换言之, 就是希望获得的视频拥有更高的空间分辨率和时间分辨率。然而, 摄像机的空间分辨率和时间分辨率是有限的。视频的空间分辨率取决于图像传感器的空间密度, 以及视频采集过程中由光的像差、大气扰动、运动、散焦、欠采样和系统噪声等因素引入的模糊。视频的时间分辨率则取决于摄像机的拍摄帧率和曝光时间, 这决定了视频中能正确观察到动态事件的最快变化速度。当时间分辨率较低时, 将会出现运动模糊现象和运动混叠现象。图 1 为运动模糊的示意图, 图 1(a)为网球运动视频的某一帧, 可以看到网球和球拍存在严重拖尾和变形; 图 1(b)为行驶车辆视频的某一帧, 道路上高速行驶的车辆已变得十分模糊。图 2 为运动混叠现象示意图, 由于采集帧率过低, 拍摄得到的



(a) fuzzy tennis ball and racket (b) fuzzy car and motorcycle

Fig.1 Sketch of motion-blurred

图 1 运动模糊现象示意图

收稿日期: 2010-11-12; 修回日期: 2010-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61071161); 教育部科学技术研究重点资助项目(No.107094)

小球是在做直线运动而不是真实的正弦运动。

如何提高视频的时空分辨率成为了一个亟待解决的问题。由于光衍射极限的存在以及工艺水平的限制,通过改进硬件设备来提高成像质量的难度较大,实现起来比较困难。因此,通过数字图像处理技术来提高视频分辨率既节约成本又具有可实现性,一种行之有效的方法就是超分辨率重建技术。该技术建立在解析延拓理论、信息叠加理论以及非线性操作理论的基础上,利用 1 个或多个低分辨率视频的互补信息,对成像过程中损失掉的部分高频细节信息进行复原,重建出 1 个具有更高时间和空间分辨率的视频,见图 3^[1]。图 3(a)展示了 1 个低分辨率视频序列。为了便于观察,在图 3(b)中,将图 3(a)中的运动物体用椭圆曲线框出。图 3(c)展示了通过多个低分辨率视频重建得到的高分辨率视频。通过对图 3(a)和图 3(c)的对比可以看出,重建后的视频解决了原始低分辨率视频中存在的运动模糊和运动混叠现象。视频超分辨率技术已成为近年来的研究热点,在计算机视觉和图像处理等领域引起了广泛关注^[2-3]。

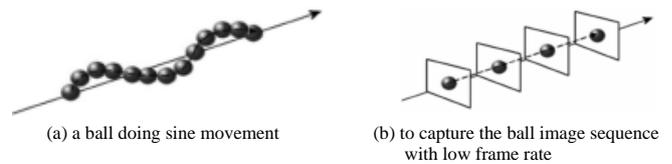


Fig.2 Sketch of motion-aliasing

图 2 运动混叠现象示意图

重建出 1 个具有更高时间和空间分辨率的视频,见图 3^[1]。图 3(a)展示了 1 个低分辨率视频序列。为了便于观察,在图 3(b)中,将图 3(a)中的运动物体用椭圆曲线框出。图 3(c)展示了通过多个低分辨率视频重建得到的高分辨率视频。通过对图 3(a)和图 3(c)的对比可以看出,重建后的视频解决了原始低分辨率视频中存在的运动模糊和运动混叠现象。视频超分辨率技术已成为近年来的研究热点,在计算机视觉和图像处理等领域引起了广泛关注^[2-3]。

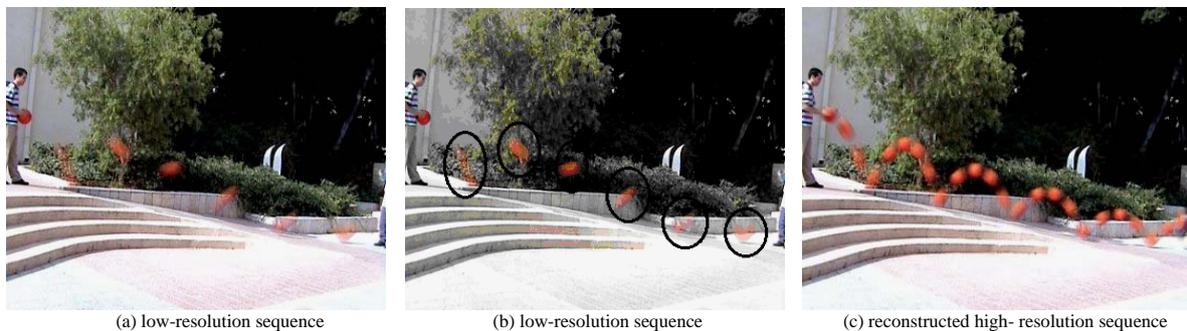


Fig.3 Sketch of multi-video spatial-temporal super-resolution reconstruction

图 3 多视频时空超分辨率重建示意图

1 超分辨率技术的发展

总览国内外超分辨率技术的发展状况,把超分辨率的技术发展路线归纳为图 4。

1.1 静态图像超分辨率重建

传统的超分辨率概念最早是由 Harris 和 Goodman 于 20 世纪 60 年代针对图像光学系统提出的,是指恢复单幅图像中因为超出光学系统限带传递函数而丢失的极限分辨率之外的图像信息,这种超分辨率方法被称为 Harris-Goodman 频谱外推法。随后 Barnes 提出了长球波函数外推法, Gerchberg 提出了能量连续降减法, Wadaka 和 Sato 提出了叠加正弦模板法。尽管这些算法做出了给人印象深刻的仿真结果,但实际应用中并没有获得理想的效果。

1984 年, Tsai 和 Huang^[4]提出新的超分辨率概念,即利用同一场景的低分辨率图像序列来重建出一幅高空间分辨率图像。可以认为低分辨率图像代表了同一场景的不同侧面,也就是说低分辨率图像是基于亚像素精度的亚采样。如果不同图像之间仅仅是整数单位的像素平移,那么每幅图像中都包含了相同的信息,这样就不能为高分辨率图像的重建提供新的信息。分析国内外研究者使用的图像序列的超分辨率重建方法,主要包括了频率域方法和空域方法两大类。频域方法主要包括解混叠重建方法^[4]、递归最小二乘法^[5]和基于多通道采样定理^[6]的方法;空域方法主要包括非均匀插值^[7]、迭代反投影^[8]、凸集投影(Projection Onto Convex Set, POCS)^[9-10]、最大后验概率估计(Maximum a Posteriori, MAP)^[11]、自适应滤波法^[12]、小波复原法^[13]、结合自相关信息的重建方法^[14]以及混合 MAP/POCS 方法^[15]等。从 20 世纪 80 年代至今,超分辨率技术的研究取得了突破进展,研究成果被应用到了遥感检测、军事侦查、交通及安全监控、医学诊断和模式识别等方面。

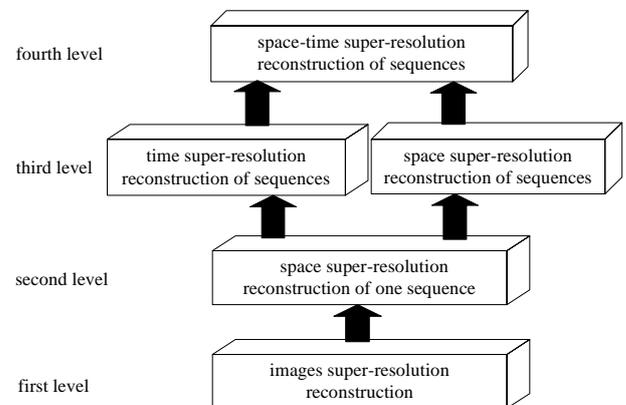


Fig.4 Development phases of super-resolution reconstruction

图 4 超分辨率重建技术发展路线

1.2 单视频超分辨率重建

近年来,伴随着数字视频采集设备的普及,人们对超分辨率重建技术的研究不再局限于静态图像,而是向视频领域发展,提出了视频超分辨率的概念。单个视频的超分辨率重建是静态图像序列超分辨率重建的延伸和发展,其结合了滑动窗口模型^[16]和连续帧间的亚像素级互补信息对每个视频帧进行超分辨率重建,从而重建出一个高空间分辨率的视频。不少研究者已对单视频超分辨率展开了研究,并取得了不少的成果,包括得到了较好的视频帧间配准算法以及各种有效的空间超分辨率重建方法^[17-21]。Borman^[22]等提出了一种多帧同步超分辨率视频重构方法,该方法利用了时空平滑约束,获得了较好的重建效果。Tom^[23]等提出了一种迭代算法来增强视频的分辨率,这种算法的效果依赖于视频运动估计算法的效果。王新年^[24]等提出了一种基于运动轨迹的面向超分辨率图像恢复的配准方法,解决了目标运动幅度变化大和目标在视场中远离镜头或靠近镜头情况下的图像配准问题。JIANG^[25]采用了一种光流场方法来准确估计视频帧之间图像信息的运动变化,同时提供了一个稳定有效的机制去检测和剔除会影响超分辨率重建效果的错误图像匹配。

1.3 多视频超分辨率重建

就单视频超分辨率重建而言,相邻帧间亚像素级的冗余信息是有限的,因此限制了空间分辨率的重建倍数,同时单视频超分辨率重建不能解决因视频采集帧率低而引起的混叠现象。因此一些研究者开始引入多视频超分辨率重建的思路,并对由此带来的各种复杂科学问题进行研究^[26-28]。韩玉兵^[29]对多视频超分辨率重建框架进行了综合性的阐述。Stein^[30]等人利用 2 台计算机时钟分别标定目标质心,实现了多视频时间上的配准,但配准精度需要进一步提高。Sharma^[31]等人在已实现多视频时间配准的前提下,实现了首帧图像的配准和序列内帧间图像的配准。彭晓明^[32]等人也提出了一种多视频时空配准算法,配准精度较高,但对拍摄的视频有一定限制要求。Daniel Hazen^[33]等人提出了一种多视频超分辨率重建方法,该方法可应用于多视频监控和多视频压缩方面。Shechtman,Caspi 和 Irani^[1,34-35]共同提出了基于特征的多视频时空配准算法,将时空信息作为一个整体同时计算。他们还提出了基于区域的方法,将高斯金字塔模型推广到视频序列图像上。目前,国内外对多视频的超分辨率重建技术研究还处于初级阶段,从能够查阅到的参考文献来看,研究者较少。因此,还需要各国研究者们对其进行不断的探索。

2 视频超分辨率重建中的关键问题

2.1 视频退化函数的估计

摄像机成像系统会受各种因素的影响,例如传感器噪声、摄像机聚焦不佳、物体与摄像机之间的相对移动、随机大气湍流、光学系统的象差、成像光源和光线的散射等。这些都会导致视频图像质量的降低,或者说是退化。如果能对低分辨率视频的退化函数进行较准确的估计,将会进一步提高重建图像的质量。另外,在多视频超分辨率重建中,常会存在用不同采集设备采集视频的情况。各个视频来自不同的成像系统,在重建的时候需要考虑多个不同的退化函数以及它们在重建模型中的相互关系。现阶段,较多学者对单一退化模型进行了研究,但对多视频超分辨率重建中退化模型的研究还很少。因此,如何建立更符合实际退化情况的视频退化模型,并找出适合多视频超分辨率重建的退化模型是需要进一步研究的关键问题。

2.2 视频帧间配准

在进行视频的空间超分辨率重建前,首先要进行视频帧间配准,估算出参考帧与待配准帧间的亚像素级运动矢量,而且配准精度直接影响到超分辨率重建的效果。通常将视频帧图像的变换类型分为全局变换、局部变换和位移变换这 3 类,同一个视频的帧间变换可能同时包含这几种变换,采用精确的数学函数来反映 2 帧图像的映射关系是视频帧间配准的关键。目前,根据利用图像信息的不同可将配准方法分为 3 个主要类别:基于灰度信息法、变换域法和基于特征法。基于灰度信息的图像配准方法一般不需要对图像进行复杂的预先处理,而是利用图像本身具有灰度的一些统计信息来度量图像的相似程度。这类算法实现简单,但不能用于校正图像的非线性形变,并且运算量较大。变换域中最主要的是傅氏变换方法,在傅氏变换域中图像的平移、旋转、仿射等变换都有相应的体现,运算复杂度低,但空间局域性较差,而且难以包含空域的先验知识。基于特征的匹配方法首先要对待配准图像进行预处理,也就是图像分割和特征提取的过程,再利用提取得到的特征完成两幅图像特征之间的匹配,通过特征的匹配关系建立图像之间的配准映射关系。这几类配准算法的最终目的都是要对低分辨率视频帧图像进行像素内的运动配准,不可避免地存在一定的误差,从而影响重建视频的质量。因此,提高运动配准算法的精度和

扩大算法适用范围在视频超分辨率重建过程中起着至关重要的作用。

2.3 多个视频的时空对齐

多视频时空对齐(又称为多视频时空配准),是多视频超分辨率重建中的一个重要前提,各个视频间的对齐精度(时间对齐精度和空间对齐精度)也将直接影响到视频重建效果。在对多个视频时空对齐的过程中,通常是将其其中 1 个视频作为参考视频,然后其它所有视频都与该参考视频进行对齐,所以多视频对齐的本质是 2 个视频的对齐。视频对齐主要包括 2 个方面的内容:空间对齐和时间对齐。由于不同的视频序列之间可能存在时间差(如摄像机不是同时开始采集),或摄像机有不同的采集帧率,需要对多个视频进行时间上的对齐。而由于各个摄像机的内部参数(如放大倍数等),以及架设位置(包括拍摄角度和旋转等)的不同,也需要对获取的视频图像进行空间上的对齐。视频时空对齐是多视频超分辨率重建的基础,它决定了重建后的视频的质量。国内外已有学者对多视频对齐进行了研究,并且取得了一定的成果。但现阶段国际上对多视频对齐进行研究的时候,为了将问题简化,主要假设场景为平面,或者假设多个摄像机之间的距离远小于摄像机到场景的距离(该情况下,场景可类似看成一个平面)。但通常情况下,摄像机之间的距离以及摄像机与场景的角度不一定满足这种假设,所以与实际应用存在一定的差距。各个摄像机与场景之间存在大角度的情况也将成为未来的一个研究方向。

2.4 视频超分辨率重建方法

通过摄像机获取低分辨率的视频序列是一个三维时空采样的过程,如果把对应的理想高分辨率的视频序列视为一个完整数据集,那么视频超分辨率重建可看作是用这个观测到的不完整数据集来估计理想的完整数据集,这是一个典型的逆问题,存在着多种可能解。处理这样的问题可以根据先验知识约束解空间,包含平滑度、确定性等约束对获取高质量的超分辨率视频是至关重要的,因此更多的重点应该放在能够包含先验知识的方法上。另外,从公开报道的研究来看,国际上对多视频超分辨率重建算法研究有 2 种研究思路:一种是分别在空间和时间上重建,然后再将这 2 个视频信息进行融合,得到高时空分辨率的视频;另一种思路是在一个总体框架下进行时空联合重建,直接得到一个高时空分辨率的视频。其中,现有的图像超分辨率重建算法可以运用到第一种思路中,但对视频本身的时空连续性以及视频间的联合特性没能充分利用。如何利用好视频的时空联合信息,提出一个优良的算法来得到一个高质量的重建视频则是未来研究中的一大难点。

2.5 时空“振铃效应”的消除

“振铃效应”的典型表现是在图像灰度剧烈变化的邻域出现类吉布斯分布(满足给定约束条件且熵最大的分布)的振荡,它是影响重建视频质量的一个重要因素。视频空间超分辨率重建中根据重建算法的不同,会出现不同程度的振铃现象,而在视频时间超分辨率重建中也会产生时间上的振铃现象(也称为“鬼影现象”),这通常直接影响到重建视频的效果。见图 5,图 5(b)是一个时间超分辨重建视频的某一帧,与低分辨率的视频帧(图 5(a))相比,运动模糊现象得到解决,但出现了比较严重的鬼影现象。



(a) a frame from low resolution video

(b) reconstructed frame from high temporal resolution video

Fig.5 Sketch of ghosting
图 5 “鬼影现象”示意图

视频超分辨率重建中,时空振铃效应是一个不可忽视的问题。因为视频帧的连续性,振铃效应在重建视频中比较严重,严重降低了重建视频帧的质量,使得难于对重建视频帧进行后续处理。在当前研究阶段,通常所做的方法是引入正则化条件,以此来提高求解的精度,抑制鬼影的产生。比如以色列的 Scheman^[22]等从时间和空间上分别引入正则化条件,起到了一定的作用,但效果不是很明显。此外,当运动物体目标较大的时候,鬼影现象会更加明显。所以,如何解决多视频重建中的振铃现象,特别是时间上的振铃现象,是当前迫切需要解决的一个关键问题。

3 未来应用展望

视频超分辨率重建是近年来计算机视觉和图像处理等领域的一个研究热点,不仅在理论上具有重要意义,而

且在实际应用中也有迫切需求。例如在视频监控方面，银行、车站、机场、居民小区等都会设有多个监控摄像头，通过视频超分辨率技术，可以提高视频质量，方便观察可疑人物及可疑物品的细节信息；在交通管理方面，由于摄像头观测的场景较大，无法获取高速行驶的车辆及过往行人的细节信息，利用多视频超分辨率重建技术，可以对车辆违法或肇事过程进行更详细的重现，并有利于对大场景中的车牌或某个人物面部进行辨识等；在刑侦工作方面，对于案发现场获得的低分辨率视频(例如银行、街道等场合中摄像头拍摄到的视频)，利用视频超分辨率技术，则能提高视频质量，获得犯罪人员的更多的体态信息和面部信息，帮助案件的侦破；在体育运动方面，常常会有许多高速运动的物体需要捕捉(例如高速运动的网球、乒乓球等)，视频超分辨率重建可以帮助我们更清晰地观察这些动态事件的细节。随着视频超分辨率相关理论和技术的发展，必将促进其在各个领域的深入应用，同时这又会进一步给研究工作提出更高的要求。

参考文献：

- [1] Shechtman E,Caspi Y,Irani M. Space-time Super-resolution[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005,27(4):531-544.
- [2] WANG Z Z,QI F. Analysis of multiframe super-resolution reconstruction for image anti-aliasing and deblurring[J]. Image and Vision Computing, 2005,23(4):393-404.
- [3] VAN Ouwkerk J D. Image Super-resolution Survey[J]. Image and Vision Computing, 2006,24(10):1039-1052.
- [4] Tsai R Y,Huang T S. Multi-frame image restoration and registration[J]. Advances in Computer Vision and Image Processing, 1984(1):317-339.
- [5] Kim S P,Su W. Recursive high-resolution reconstruction of blurred multi-frame images[C]// ICASSP'91:International Conference on Acoustics,Speech,and Signal Processing. Washington,DC:IEEE Press, 1991:2977-2980.
- [6] Ur H,Gross D. Improved resolution form subpixel shifted pictures[J]. CVGIP:Graphical Models and Image Processing, 1992, 54(2):181-186.
- [7] RAJAN D,CHAUDHURI S. Generalized interpolation and its application in super-resolution imaging[J]. Image and Vision Computing, 2001,19(13):957-969.
- [8] Irani M,Peleg S. Motion analysis for image enhancement resolution,occlusion,and transparency[J]. Journal of Visual Common. Image Represent, 1993,4(4):324-335.
- [9] Trussell H J,Civanlar M R. The landweber iteration and projection onto convex sets[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1985,33(6):1632-1633.
- [10] 张地,杜明辉. 超分辨率图像重构边缘振荡的高效去除算法[J]. 信息与电子工程, 2004,2(2):81-84. (ZHANG Di,DU Minghui. An Efficient Ringing Artifact Reduction Algorithm for POCS Super-resolution Image Reconstruction[J]. INFORMATION AND ELECTRONIC ENGINEERING, 2004,2(2):81-84.)
- [11] SHEN H F,ZHANG L P,HUANG B,et al. A map approach for joint Motion estimation segmentation,and super resolution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007,16(2):479-490.
- [12] Elad M,Feuer A. Super-Resolution Restoration of an Image Sequence Adaptive Filtering Approach[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999,8(3):387-195.
- [13] Nguyen N,Peyman Milanfar. A Wavelet-based interpolation-restoration method for superresolution(wavelet superresolution)[J]. Circuits,Systems,and Signal Processing, 2000,19(4):321-338.
- [14] Glasner D,Bagon S,Irani M. Super-Resolution from a Single Image[C]// 2009 IEEE 12th International Conference on computer vision. Kyoto,Japan:[s.n.], 2009:349-456.
- [15] SU B H,JIN W Q. POCS-MAP Based Super-Resolution Image Restoration[J]. 光子学报, 2003,32(4):502-504.
- [16] Narayanan B,Hardie RC,Barner KE,et al. A Computationally Efficient Super-Resolution Algorithm for Video Processing Using Partition Filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007,17(5):621-634.
- [17] QIN Fengqing,HE Xiaohai,CHEN Weilong. Video Super-resolution Reconstruction Based on Sub-pixel Registration and Iterative Back Projection[J]. Journal of Electronic Imaging, 2009,18(1):013007-1-013007-11.
- [18] Narayanan B,Barner K E. A Computationally Efficient Super-Resolution Algorithm for Video Processing Using Partition Filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007,17(5):621-634.
- [19] HAN M,WANG M H. Micro-displacement Super-resolution Based on Video Image Restoration[C]// ICIG '07 Proceedings of the Fourth International Conference on Image and Graphics. Chengdu:[s.n.], 2007:51-57.
- [20] XIE Shenghua,ZHANG Qiheng. Multi-frame Image Super-resolution Restoration Based on Estimation of Discrete Point Spread Function[C]// Proceeding of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing:[s.n.], 2008:9250-9254.

- [21] 覃凤清. 视频超分辨率重建技术研究[D]. 成都:四川大学, 2009.
- [22] Borman S,Stevenson R L. Simultaneous Multi-frame Map Super-Resolution Video Enhancement Using Spatio-Temporal Priors[C]// Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Image Processing. Kobe,Japan:[s.n.], 1999:469-473.
- [23] Tom B C,Katsaggelos A K. Resolution Enhancement of Monochrome and Color Video Using Motion Compensation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001,10(2):278-287.
- [24] 王新年,梁德群. 一种新的面向超分辨率的图像配准方法[J]. 计算机工程与应用, 2005,41(4):91-93.
- [25] JIANG Z D,WONG T T,BAO H J. Practical Super-Resolution from Dynamic Video Sequences[C]// Proceedings of IEEE Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Madison,Wisconsin,USA:[s.n.], 2003,2:549-554.
- [26] WAN B K,MENG L,Ming D. Video image Super-resolution Restoration Based on Iterative Back-Projection Algorithm[C]// 2009 IEEE International conference on computational intelligence for measurement systems and applications. Hongkong:[s.n.], 2009:46-49.
- [27] Omer O A,Tanaka T. Region-based weighted-norm approach to video super-resolution with adaptive regularization[C]// 2009 IEEE International conference on acoustics,speech,and signal processing. Taipei,Taiwan:[s.n.], 2009:833-836.
- [28] Agrawal A,Gupta M,Veeraraghavan A,et al. Optimal Coded Sampling for Temporal Super-Resolution[C]// 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR). San Francisco,CA:[s.n.], 2010:599-606.
- [29] 韩玉兵. 图像及视频序列的超分辨率重建[D]. 南京:东南大学, 2006.
- [30] Stein G P. Tacking from Multiple View Points Self-Calibration of Space and Time[C]// Proceedings of The 2nd European Conference on Computer Vision. Colorado,USA:[s.n.], 1999:521-527.
- [31] Sharma R K,Pavel M. Registration of video sequences from multiple sensors[C]// Proceedings of Image Registration Workshop. Greenbelt,Maryland,USA:[s.n.], 1997:361-366.
- [32] 彭晓明,丁明跃,周成平,等. 一种序列图像配准的计算框架[J]. 中国图象图形学报, 2005,10(4):441-449.
- [33] Daniel Haze,Rohit Puri,Kannan Ramchandran. Multi-camera Video Resolution Enhancement by Fusion of Spatial Disparity and Temporal Motion fields[C]// Proceedings of the Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems. New York:[s.n.], 2006:38.
- [34] Caspi Y,Irani M. Spatio-temporal alignment of sequences[J]. IEEE Transaction on Pattern analysis and Machine Intelligence, 2002,24(11):1409-1419.
- [35] Caspi Y,Irani M. Aligning non-overlapping sequences[J]. International Journal of Computer Vision, 2002,48(1):39-51.

作者简介:



何小海(1964-), 男, 四川省绵阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事通信与信息系
统、机器视觉与智能系统、图像处理等领域的
理论研究和应用开发工作, 主要研究方向为
图像处理与模式识别、图像通信.email:nic5602
@scu.edu.cn.

吴媛媛(1986-), 女, 重庆市人, 在读博士
研究生, 主要研究方向为数字图像处理、视频超
分辨重建。

陈为龙(1981-), 男, 四川省内江市人, 在
读博士研究生, 主要研究方向为数字图像处理、
视频超分辨重建。

卿粼波(1982-), 男, 四川省简阳市人, 讲
师, 博士, 主要研究方向为图像通信、嵌入式系
统开发。