

文章编号 1004-924X(2010)01-0266-07

# 遥感图像去云雾噪声的实现

石文轩, 吴敏渊, 邓德祥

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 为了去除相机拍摄的遥感图像中的云雾, 提出了一种新的非局域均值算法来处理遥感图像序列中的云雾噪声。首先, 根据遥感图像在云雾阴影下的梯度值的性质, 得出了在云雾阴影下图像灰度值偏低而梯度值却变化不大的结论, 从而在权重值的计算中耦合了梯度值信息。然后, 利用序列图像的帧间冗余信息来计算新的权重值。最后, 用新的权重值对图像进行恢复。用 UltraCamD 相机对在我国新疆地区和山西地区上空拍摄的两组遥感图像序列进行的实验表明: 与传统的图像恢复算法相比, 用提出的方法恢复图像可获得更好的图像质量; 与原始图像相比, 恢复后图像的峰值信噪比提高了 9 dB 以上。实验结果表明, 该算法可以在不知道云层运动方向和相机运动方向以及噪声模型的情况下有效地对薄云雾覆盖的遥感图像进行恢复。

**关键词:** 非局域均值; 梯度特征; 图像序列; 图像去噪; 云雾

**中图分类号:** TP751 **文献标识码:** A

## Implementation of eliminating cloud and mist noise from remote sensing images

SHI Wen-xuan, WU Min-yuan, DENG De-xiang

(School of Electron Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** In order to eliminate the cloud and mist from remote sensing images captured by cameras, a new non-local means algorithm is proposed to process the cloud and mist noise in remote sensing images. Based on the gradient feature under the shadow of cloud and mist in the remote sensing images, it is found that the intensity of the image declines obviously while the gradient only has a little change, therefore, the gradient information can be coupled into the weight computation. Then, the redundant information in image sequences is used to compute the new weights and the new weights are used to restore the image sequences. Two remote sensing image sequences are taken by UltraCamD in Xinjiang and Shanxi in China, and results show that the quality of restored image is improved significantly by this algorithm. Compared with the original images, the PSNR by proposed method has improved by more than 9 dB. Experiments show that the proposed algorithm can effectively restore remote sensing images without the motion estimation for the cloud and camera as well as the noise model.

**Key words:** non-local means; gradient feature; image sequence; image denoising; cloud and mist

收稿日期: 2009-02-13; 修订日期: 2009-04-01.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA040307)

## 1 引言

遥感卫星获得的大地影像数据大部分是光学影像。光学影像极易受到气候因素的影响,而云雾遮挡就是其中影响之一。图像中云雾噪声直接影响了图像信息的判读、分析和使用,使得图像数据的有效利用率降低。运用图像处理技术,研究如何有效去除云雾噪声、提高遥感图像数据利用率具有重要意义。

作为一种去噪问题,很多算法都是近年来的研究热点,比如:利用各向异性的热传导偏微分方程去噪<sup>[1]</sup>,基于TV全变分模型的去噪<sup>[2-3]</sup>,自适应正则化模型去噪<sup>[4]</sup>等,这些算法将热传导偏微分方程理论应用于图像去噪中,利用热传导的性质对图像进行各向同性或各向异性的扩散处理,并且用待处理的图像作为偏微分方程的边界条件,加入正则化模型进行图像去噪。这种方法能够去除一些高频噪声,比如高斯白噪声、椒盐噪声等,但是本文要处理的云雾噪声的噪声频率往往集中在图像的低频部分,因此以上算法对云雾噪声的去除效果不明显。基于小波变换的去噪<sup>[5-8]</sup>能对图像进行多尺度分解,并在各个尺度上对图像进行滤波去噪,因此基于小波变换的方法能对低频噪声进行滤波,但也容易在去噪的同时也去掉了图像信息,并且对于不同的图像,其滤波阈值的选择也较困难。

随着数字技术的发展,相机的采集速度有了显著提高,在很短的时间间隔内对同一地区进行连续多次的拍摄成为可能。对于同一地点拍摄的序列图像,在某些图像帧中被云雾遮挡的部分在另一些图像帧中没有被遮挡,于是可以利用图像帧之间的这种冗余信息对图像序列进行去噪处理<sup>[9-10]</sup>。本文综合了非局域均值算法<sup>[11]</sup>的特点,利用云雾阴影部分图像帧梯度变化不明显的性质耦合了梯度分量计算权重值,利用图像帧之间的相似性引入了时域冗余性进行云雾噪声去除,得到了较好的效果。

## 2 非局域均值算法

非局域均值算法是在双边滤波算法的基础上发展起来的,通过对一个像素周围的像素块加

以权重值后相加来实现滤波。该权重值是利用以待滤波像素为中心的图像块匹配来确定的。无论是采用双边滤波还是非局域均值滤波都是在假设待处理的图像是自然图像的基础上的,因为自然图像中的大部分像素都有倾向于重复其周围像素的特点,而双边滤波和非局域滤波的算法实质就是对邻域像素或图像块进行加权平均。因此,去噪可以通过平均周围所有像素灰度值来实现。然而,平均周围像素的灰度值不是进行盲目的均匀的平均,而是通过给周围的各个像素指定一个权重值,这个权重值代表了该像素和待滤波像素之间的相似程度,如式(1)所示:

$$\hat{u}[k,l] = \frac{\sum_{(i,j) \in N(k,l)} w[k,l,i,j]v[i,j]}{\sum_{(i,j) \in N(k,l)} w[k,l,i,j]}, \quad (1)$$

其中, $N(k,l)$ 表示待滤波的像素 $v(k,l)$ 的邻域, $w[k,l,i,j]$ 表示邻像素 $v(i,j)$ 的权重值,滤波结果为 $u(k,l)$ 。

双边滤波和非局域滤波的区别在于权重值的计算方法不同。双边滤波的权重值计算是基于像素点之间的灰度值和距离的相似程度,如式(2)所示:

$$w_{\text{BL}}[k,l,i,j] = \exp\left\{-\frac{(v[k,l]-v[i,j])^2}{h}\right\} \cdot f(\sqrt{(k-i)^2+(l-j)^2}), \quad (2)$$

其中, $f$ 是一个单调非增函数,它表示两个像素的距离越远权重值越小,它可以是高斯函数、线性函数、指数函数等等。参数 $h$ 控制着两像素灰度值的差异对权重值的贡献程度。这样,当两个像素之间灰度值相差很大并且距离比较远时,该相邻像素对滤波的权重值就小,表示这个相邻像素的影响较小。

非局域均值滤波的权重值计算方法和双边滤波略有不同,计算的是基于像素块之间的灰度值和距离的相似程度。定义 $R_{k,l}$ 为一幅图像中以 $(k,l)$ 为中心的图像块,则非局域滤波的权重值由式(3)给出:

$$w_{\text{NLM}}[k,l,i,j] = \exp\left(-\frac{\|R_{k,l}v - R_{i,j}v\|_2^2}{h}\right) \cdot f(\sqrt{(k-i)^2+(l-j)^2}), \quad (3)$$

其中计算的距离部分指的是两图像块的中心像素之间的距离。

显然,当设定 $R_{k,l}$ 为单像素时,非局域均值滤波就退化为双边滤波。

### 3 三边非局域均值算法

除了在第 2 节介绍的基于灰度和距离的权重值计算方法外,还有很多权重值的计算方法。由于云雾的阴影效果,地面物体所反射的阳光比未被遮挡时要少得多,所以处在云雾阴影部分的图像往往会偏暗。如果在计算权重值时仅考虑灰度值和距离的影响,往往不能得到很好的恢复效果。本节首先对云雾阴影产生的影响进行了分析,得出了阴影部分图像灰度值虽然较低但梯度变化的不大特性,接着将反映梯度变化大小的分量耦合入权重值函数方程,得到了权重值的新算法。

$$\frac{\nabla S_1(x,y)}{\nabla S_2(x,y)} = \frac{\left[ \frac{\partial S_1(x,y)}{\partial x} \right]}{\left[ \frac{\partial S_2(x,y)}{\partial x} \right]} = \frac{\left[ \frac{\partial S_1(x,y)}{\partial y} \right]}{\left[ \frac{\partial S_2(x,y)}{\partial y} \right]} = \frac{\left[ \begin{matrix} S_1(x+1,y) - S_1(x,y) \\ S_1(x,y+1) - S_1(x,y) \end{matrix} \right]}{\left[ \begin{matrix} S_2(x+1,y) - S_2(x,y) \\ S_2(x,y+1) - S_2(x,y) \end{matrix} \right]} = \frac{\left[ \begin{matrix} r_1(x+1,y)\beta_1(x+1,y) - r_1(x,y)\beta_1(x,y) \\ r_2(x+1,y)\beta_2(x+1,y) - r_2(x,y)\beta_2(x,y) \\ r_1(x,y+1)\beta_1(x,y+1) - r_1(x,y)\beta_1(x,y) \\ r_2(x,y+1)\beta_2(x,y+1) - r_2(x,y)\beta_2(x,y) \end{matrix} \right]}{\left[ \begin{matrix} r_1(x+1,y)\beta_1(x+1,y) - r_1(x,y)\beta_1(x,y) \\ r_2(x+1,y)\beta_2(x+1,y) - r_2(x,y)\beta_2(x,y) \\ r_1(x,y+1)\beta_1(x,y+1) - r_1(x,y)\beta_1(x,y) \\ r_2(x,y+1)\beta_2(x,y+1) - r_2(x,y)\beta_2(x,y) \end{matrix} \right]}, \quad (6)$$

由于相邻像素的透射率  $\beta$  差别不大,所以:

$$\begin{cases} \beta_1(x+1,y) = \beta_1(x,y) = \beta_1(x,y+1) \\ \beta_2(x+1,y) = \beta_2(x,y) = \beta_2(x,y+1) \end{cases}$$

$$\frac{\nabla S_1(x,y)}{\nabla S_2(x,y)} = \frac{\left[ \begin{matrix} \beta_1[r_1(x+1,y) - r_1(x,y)] \\ \beta_2[r_2(x+1,y) - r_2(x,y)] \\ \beta_1[r_1(x,y+1) - r_1(x,y)] \\ \beta_2[r_2(x,y+1) - r_2(x,y)] \end{matrix} \right]}{\left[ \begin{matrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{matrix} \right]}, \quad (7)$$

对于薄云模型,  $\beta_1 \approx \beta_2 \approx 1$ , 故:

$$\frac{\nabla S_1(x,y)}{\nabla S_2(x,y)} \approx \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

所以在薄云模型中,虽然相邻区域的灰度值变化明显,但是图像的梯度变化不大。

#### 3.2 耦合梯度分量的权重值算法

在一幅图像  $v$  中,梯度  $\nabla v(i,j)$  能很好的反映图像的结构信息,并且在云雾阴影中的图像的梯度与正常情况下的梯度值变化不大,所以本文

#### 3.1 云层阴影的成像模型

当云层较薄时,航拍相机所接收的图像是由太阳光经云层反射部分及太阳光经地面景物反射后再穿透云层这两部分组成的,即:

$$S(x,y) = aLr(x,y)\beta(x,y) + L(1 - \beta(x,y)), \quad (4)$$

其中,  $S(x,y)$  表示相机采集到的图像,  $a$  为太阳光在大气传输过程中的衰减系数,  $L$  为太阳光的强度,最大时为  $1400 \text{ W/m}^2$ ,  $r(x,y)$  为地面景物的反射率,  $\beta(x,y)$  为云层的透射率,并且  $0 < a < 1, 0 < r < 1, 0 < \beta < 1$ 。当相机在云层下方时,应去掉方程右边的第二项,即:

$$S(x,y) = aLr(x,y)\beta(x,y). \quad (5)$$

对于略不同的  $\beta(x,y)$ , 假设有  $\beta_1$  和  $\beta_2$ , 且  $0 < \beta_1(x,y) \approx \beta_2(x,y) \leq 1$ , 则:

又由于同一地点的反射率相同,所以:

$$\begin{aligned} r_1(x+1,y) - r_1(x,y) &= r_2(x+1,y) - r_2(x,y) \\ r_1(x,y+1) - r_1(x,y) &= r_2(x,y+1) - r_2(x,y) \end{aligned}$$

提出了三边非局域均值算法,将像素点的梯度信息耦合进权重值的计算。那么三边非局域均值算法可以表示成如下形式:

$$\begin{aligned} w_{\text{tri-NLM}}[k,l,i,j] &= w_{\text{NLM}}[k,l,i,j] \cdot \\ \lambda(\|R_{k,l} \nabla v - R_{i,j} \nabla v\|) &= \\ \exp\left(-\frac{\|R_{k,l} \nabla v - R_{i,j} \nabla v\|_2^2}{h}\right) &\cdot \\ f(\sqrt{(k-i)^2 + (l-j)^2}) &\cdot \\ \lambda(\|R_{k,l} \nabla v - R_{i,j} \nabla v\|) & \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $\lambda$  是一个单调非增函数,它表示两个像素的梯度值相差越大权重值越小。

## 4 时域冗余性的引入

序列图像是在相隔时间不大的同一区域拍摄的若干张图片,所以不仅在单幅图像中存在冗余,在图像帧之间也同样存在冗余,并且时域上的冗余对图像的去噪更有帮助。

引入时域冗余后,权重值方程变为:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{tri-NLMT}}[k, l, i, j, t] = & \exp\left(-\frac{\|R'_{k,l}v - R'_{i,j}v\|_2^2}{h}\right) \cdot \\ & f(\sqrt{(k-i)^2 + (l-j)^2 + t^2}) \cdot \\ & \lambda(\|R'_{k,l} \nabla v - R'_{i,j} \nabla v\|) \end{aligned} \quad (10)$$

这里的  $R'$  和原方程中的  $R$  所代表的意义不同,原方程中的  $R$  表示单幅图像待滤波像素的邻域,是一个 2-D 的图像块,这里的  $R'$  是加入时间域后的图像块,可以理解成一个 3-D 的图像块,所以滤波后的图像为:

$$\hat{u}[k, l] = \frac{\sum_{t \in [1, \dots, T]} \sum_{(i,j) \in N(k,l)} \omega_{\text{tri-NLMT}}[k, l, i, j, t] v_t[i, j]}{\sum_{t \in [1, \dots, T]} \sum_{(i,j) \in N(k,l)} \omega_{\text{tri-NLMT}}[k, l, i, j, t]} \quad (11)$$

由公式可知,每个滤波后的像素是由具有一定权重值的 3-D 邻域加权而来的。与原像素的灰度值越接近、距离越接近、梯度值越接近那么这个像素所获得权重值就越大。从另一个角度看,可以把权重值  $\omega_{\text{tri-NLMT}}[k, l, i, j, t]$  视为待恢复像素点在邻域位置的分布概率。

由于序列图像在拍摄的过程中存在云层的运动、相机运动和各種噪声,在这些运动的位移变动不大的情况下,该算法的一个最重要的优势就是可以在不知道运动方向以及噪声模型的情况下对图像进行恢复。对于每个待恢复的像素,相邻图像块的权重值中会有许多非零值,这样,每个像素点都可以看作有多个方向的运动向量,而不是传统运动估计中的一个唯一的方向。事实上,公式(11)指定所有方向的运动方式都被包含,然后根据图像块匹配的概率进行了加权累加。这种方式的图像恢复是一种模糊运动估计过程,而不是精确运动估计。

将利用图像冗余的三边非局域均值算法总结为以下 4 步:

第 1 步 根据待滤波图像块的大小计算 3 维归一化高斯矩阵。

第 2 步 计算待滤波图像块与邻域图像块之间的灰度差矩阵和梯度差矩阵。

第 3 步 将第 1、2 步计算得到的高斯矩阵、灰度差矩阵和梯度差矩阵代入公式(10)计算各像素的权重值。

第 4 步 将权重值代入公式(11),计算得到滤波后的图像。

## 5 实验结果与分析

本文采用 UltraCamD 相机分别在海拔 9 000 m 的高度对我国新疆地区的山区以及在海拔 2 000 m 的高度对山西东南部的高速公路的同一地点的航拍序列图像进行了实验,将本文算法分别与 P-M 模型、双边滤波算法、非局域均值算法进行了比较,如图所示。在这里,图像块大小选择  $7 \times 7$ ,滤波邻域选取  $32 \times 32$ ,  $h=4$ ,  $t=3$ ,  $f$  和  $\lambda$  为高斯函数。图 1 是原始图像,图 2 和图 3 为云层经过时的噪声图像序列,图 4 和图 5 是用各种算法恢复后的图像。从图中可看到,P-M 模型和双边滤波算法不适合对云雾的去除,云雾噪声依然很明显,非局域均值算法对云雾的去除有一定的效果,但是云雾依然存在,而本文算法基本消除了云雾噪声。



图 1 左图为山区,右图为高速公路

Fig. 1 Left is original image of mountain area, right is original image of highway

表 1 是运用本文算法与其他方法进行实验得到的峰值信噪比对照表,其中含噪图、P-M、双边滤波、非局域均值滤波的峰值信噪比为图像序列中 9 幅图像的平均值。从表中得到的数据可以

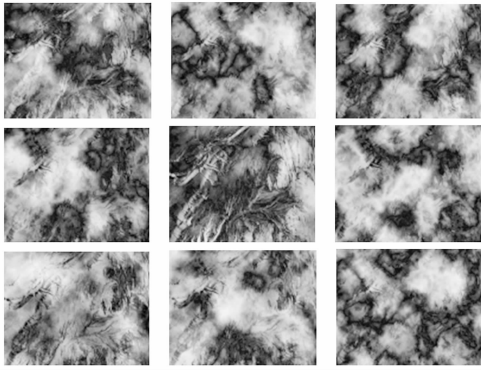


图 2 有云层覆盖的山区同一地点的图像序列  
Fig. 2 Image sequence in the same place in mountain area, which is covered by cloud and mist

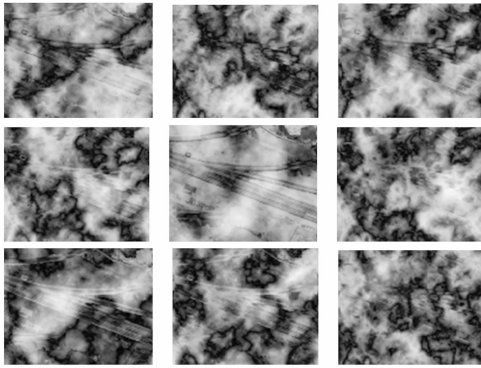
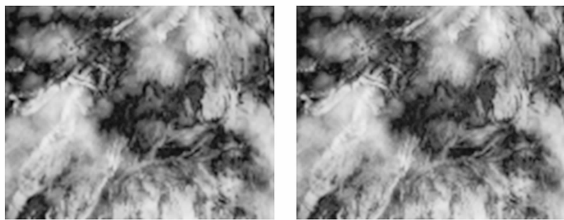
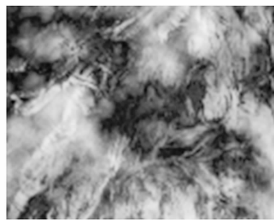


图 3 有云层覆盖的高速公路同一地点的图像序列  
Fig. 3 Image sequence in the same place over the highway, which is covered by cloud and mist



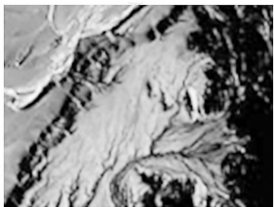
(a)P-M 模型  
(a)P-M model



(b)双边滤波  
(b)Bilateral filter



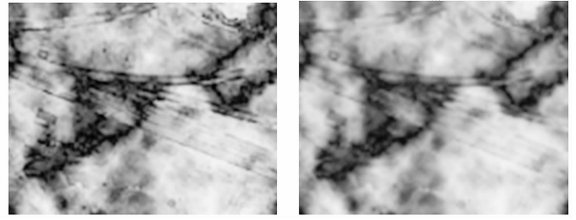
(c)非局域均值滤波  
(c)Non-local means filter



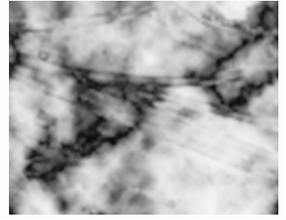
(d)本文算法  
(d)Proposed algorithm

图 4 山区图像

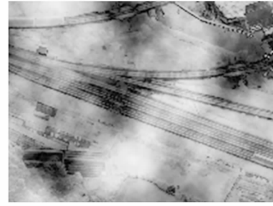
Fig. 4 Images of mountain area



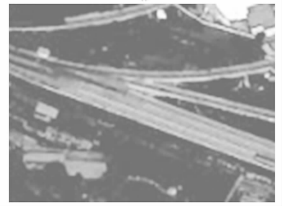
(a)P-M 模型  
(a)P-M model



(b)双边滤波  
(b)Bilateral filter



(c)非局域均值滤波  
(c)Non-local means filter



(d)本文算法  
(d)Proposed algorithm

图 5 高速公路图像

Fig. 5 Images of highway

看出,本文算法在图像恢复性能上有了一定的提高,而且避免了基于偏微分方程的多次迭代运算。

表 1 4 种去噪算法的峰值信噪比

Tab. 1 PSNR of 4 denoising algorithms dB

|      | 含噪图   | P-M   | 双边滤波  | 非局域均值 | 本文方法  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 山区   | 12.88 | 14.25 | 14.57 | 16.81 | 21.97 |
| 高速公路 | 13.48 | 16.72 | 16.12 | 18.09 | 23.72 |

## 6 结 论

本文提出的利用耦合图像梯度分量和时域冗余信息的三边非局域均值算法克服了传统的 P-M 模型去噪算法对低频图像噪声处理效果不明显,以及双边滤波和非局域均值滤波算法对单帧云雾覆盖区域的图像恢复不佳等问题,且计算方法易于理解。实验证明,用本文提出的算法恢复云雾遮挡图像极大地改善了图像质量。与原始的噪声图像相比,峰值信噪比 (PSNR) 提高了 9 dB 以上;与 P-M 模型去噪后的结果相比,提高了

7 dB 以上;与双边滤波去噪后的结果相比,提高了 7.4 dB 以上;与非局域均值去噪后的结果相比,提高了 5.1 dB 以上。

本文所提出算法的不足是计算量较大,这可

通过对算法进行并行化处理来提高计算效率,也可以采用 FPGA 等硬件芯片来实现并行运算。另外,对于较厚的云层,本算法的处理效果还不是很理想,这将是今后研究的一个重点。

## 参考文献:

- [1] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 1990,12(7):629-639.
- [2] RUDIN L, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithm [J]. *Physical D*,1992,60(3):259-268.
- [3] BABACAN S D, MOLINA R, KATSAGGELOS A K. Variational bayesian blind deconvolution using a total variation prior [J]. *IEEE T. Imag Process.*, 2009,18(1):12-26.
- [4] 郭永彩,王婀娜,高潮. 空间自适应和正则化技术的盲图像复原[J]. *光学精密工程*, 2008,16(11):2263-2267.
- GUO Y C, WANG E N, GAO CH. Blind image restoration algorithm based on space-adaptive and regularization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2263-2267. (in Chinese)
- [5] BIOUSCAS-DIAS J M. Bayesian wavelet-based image deconvolution: A GEM algorithm exploiting a class of heavy-tailed priors [J]. *IEEE T. Image Process.*, 2006,15(4):937-951.
- [6] LUISIER F, BLU T, UNSER M. A new sure approach to image denoising: Inter-scale orthonormal wavelet thresholding [J]. *IEEE T. Image Process.*, 2007,16(3):593-606.
- [7] 邓超,张涛,姚清华. 应用小波神经网络处理 CCD 图像噪声[J]. *光学精密工程*, 2008,16(2):345-351
- DEND CH, ZHANG T, YAO Q H. Application of wavelet neural network in removing CCD noise of digital images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):345-351. (in Chinese)
- [8] 江洁,邓琼,张广军. 基于小波变换的正则化盲图像复原算法[J]. *光学精密工程*, 2007,15(4):582-586.
- JIANG J, DENG Q, ZHANG G J. Regularization algorithm for blind image restoration based on wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(4):582-586. (in China)
- [9] PROTTER M, ELAD M. Image sequence denoising via sparse and redundant representations [J]. *IEEE T. Image Process.*, 2009,18(1):27-35.
- [10] WANG H, ORTEGA A. Rate-distortion optimized scheduling for redundant video representations [J]. *IEEE T. Image Process.*, 2009,18(2):225-240.
- [11] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A review of image denoising algorithms with a new one [J]. *Multiscale Model. Simul*, 2005,4(2):490-530.

## 作者简介:



石文轩(1983—),男,湖北武汉人,博士研究生,2005年于武汉大学获得学士学位,主要从事空间图像处理的研究。E-mail: shiwx@163.com



吴敏渊(1964—),男,江苏淮阴人,副教授,1984年、1989年于武汉测绘科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事图像处理、机器视觉等方面的研究。E-mail: wmy@eis.whu.edu.cn

## 导师简介:



邓德祥(1961—),男,湖北荆州人,教授,博士生导师,1982年、1985年于武汉测绘科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间图像处理、片上系统等方面的研究。E-mail: ddx@eis.whu.edu.cn

## ●下期预告

## X 脉冲星矢量多平面观测的姿态测量

兰盛昌,叶 东,林 杰,徐国栋,曹星慧

(哈尔滨工业大学 卫星技术研究所,黑龙江 哈尔滨 150080)

为了利用脉冲星对航天器进行姿态测量,提出一种基于 X 射线脉冲星矢量多平面观测的姿态测量方法,对该方法所设计的测量原理、测量精度等问题进行研究。首先建立一个由若干具有不同法向方向的平面组成的立体结构,并在每个平面上安装脉冲星传感器;接着,测量不同平面内接收的 X 射线脉冲星光子功率,以及功率的测量值和各平面之间的相对几何关系,最后,计算出脉冲星的矢幅值和空间角,从而得到航天器姿态。实验结果表明:利用 X 射线脉冲星矢量的多平面观测方法测量得到的航天器姿态精度能够达到  $0.1^\circ$ 。X 射线脉冲星姿态多平面测量方法可以满足未来航天应用所需的姿态测量精度,并且有利于航天器技术发展。