

基于 MAP 准则的红外图像小波域比例萎缩降噪和增强算法

刘 刚¹ 梁晓庚^{1,2} 罗绪涛¹

(西北工业大学自动化学院 西安 710072)¹ (洛阳光电技术发展中心 洛阳 471009)²

摘 要 针对小波域比例萎缩降噪方法在去除噪声的同时也弱化了图像细节和边缘的缺陷,提出了具有增强效果的基于最大后验概率准则的小波域自适应降噪算法,并将之应用于红外图像降噪中。该算法在假定图像系数和噪声系数先验为高斯分布的基础上,利用最大后验概率准则计算小波系数的萎缩因子,然后在考虑尺度因素和方向能量因素的基础上对萎缩因子进行修正并将之应用于小波系数萎缩过程中,最后通过逆变换得到降噪和增强的图像。试验结果表明,在损失较小峰值信噪比的情况下,提出的方法在增强图像细节和边缘、加大图像对比度等方面要优于直接比例萎缩,能够获得较好的视觉效果。给出的小波系数增强思想可以应用于基于其它降噪准则的比例萎缩算法中。

关键词 小波域降噪,图像增强,比例萎缩,高斯分布,最大后验概率,峰值信噪比

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A

Denoising Algorithm of Proportional Shrinkage with Enhancement Based on the MAP Rule in Wavelet Domain for Infrared Image

LIU Gang¹ LIANG Xiao-geng^{1,2} LUO Xu-tao¹

(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnique University, Xi'an 710072, China)¹

(Luoyang Photoelectric Technology Development Center, Luoyang 471009, China)²

Abstract In order to solve the fault of weakening the detail and edge of image while denoising in wavelet domain, this paper presented an adaptive denoising algorithm with detail enhancing and applied it to infrared image. On the basis of the assumption that the prior distribution of the original image coefficients and the noise coefficients were both Gaussian, this method firstly made use of the rule of Maximum a Posteriori to compute the shrinkable factor for wavelet coefficients, then revised it by taking decomposable level and directional energy into account. Finally, a denoising and enhancing image could be obtained when the wavelet coefficients which were shrunk by the revised shrinkable factor experienced the reverse transform. The experimental results show that the method given by this paper, compared with the direct proportional shrinkage, can enhance image's detail and improve image's contrast and get better visual effect though it has a little loss of Peak Signal Noise Ratio. The idea of coefficients' enhancement in wavelet domain proposed by this paper can apply to other proportional shrinkable algorithms.

Keywords Denoising in wavelet domain, Image's enhancement, Proportional shrinkage, Gaussian distribution, Maximum a posteriori, Peak signal noise ratio

1 引言

图像在采集和传输的过程中不可避免地会受到噪声污染。小波变换具有低熵性、多分辨率性、去相关性和选基灵活性等诸多优良特性,使得原始图像的结构信息和细节信息很容易得到提取。因此,近年来基于小波域的降噪方法如雨后春笋般涌现。小波域降噪主要可分为阈值萎缩和比例萎缩^[1-4]。由 Donoho 等人提出的阈值萎缩降噪方法^[5,6]由于算法简单、效果好而得到广泛运用。相对于阈值萎缩方法,比例萎缩具有更大的灵活性,从某种意义上可以认为阈值萎缩是比例萎缩的一种特例。它通过判断系数被噪声污染的程度并

为这种程度引入某种度量方法来确定萎缩的比例。比例萎缩的特点主要在于它对信号具有局部适应能力。Shark 等人通过给出一个隶属度函数,将大于阈值的系数按照隶属度进行比例萎缩来实现降噪^[7];Malfait 等人则将图像一般不存在孤立边缘点的先验知识与小波图像 Holder 指数相结合,基于 Bayes 估计理论给出了小波系数的萎缩因子并进行萎缩,从而大大消除了由噪声引起的伪边缘^[8]。这些算法给出的萎缩因子的值都在 0 和 1 之间,对所有系数都进行了削弱,因此它们在降低图像噪声的同时也弱化了图像的细节与边缘。

此外,对小波系数建立多尺度统计模型是利用比例萎缩法降噪的关键问题^[9]。效果良好的算法往往依赖精确的模

到稿日期:2009-05-27 返修日期:2009-08-11

刘 刚(1974—),男,博士,讲师,主要研究方向为图形图像处理、智能控制、软件工程,E-mail:lg19741011@163.com;梁晓庚(1960—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为飞行器总体设计、导航、制导与控制、图像处理;罗绪涛(1982—),男,博士生,主要研究方向为飞行器导航、制导与控制。

型,如采用广义高斯分布、高斯混合分布、马尔可夫随机场等对小波系数分布建模。但模型参数估计和算法整体复杂度会随着模型精度的提高而提高,因此不利于实际应用。

为此,本文提出了一种具有增强效果的图像小波域比例萎缩降噪算法并将其应用于红外图像降噪。本方法在假定图像系数和噪声系数服从均值为零、方差未知的独立高斯分布的基础上,将最大后验概率准则(MAP Maximum a Posteriori)与小波分解尺度因素和方向能量因素相结合,实现了小波域基于比例萎缩的降噪和图像细节与边缘的增强。

2 MAP 准则下小波系数萎缩因子的确定

假定含噪红外图像可以由下式描述:

$$f(x, y) = s(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

其中, $f(x, y)$ 表示含噪图像, $s(x, y)$ 是原始图像, $n(x, y)$ 代表噪声。经小波变换后,系数也满足该和式。假定图像经小波变换后原始图像系数和噪声系数均服从均值为零的高斯分布,即:

$$p_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (2)$$

$$p_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (3)$$

其中, p_s 是原始图像系数的密度函数, p_n 为噪声系数的密度函数。 σ_n^2 是噪声系数的方差, σ_s^2 是原始图像系数的方差。根据 MAP 准则,在给定观测即含噪图像系数 f 的情况下要求原图像系数 s 的概率达到最大,因此有 s 的估计值见式(4)。对式(4)取对数得到式(5)。

$$\bar{s} = \arg \max_s p(s|f) = \arg \max_s p(f|s)p(s) \quad (4)$$

$$\bar{s} = \arg \max_s [\ln p(f|s) + \ln p(s)] \quad (5)$$

进一步展开,得:

$$\bar{s} = \arg \max_s \left[c - \frac{(f-s)^2}{2\sigma_n^2} - \frac{s^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (6)$$

这里 c 为常数。式(6)对 s 求导数,得:

$$\frac{f-s}{\sigma_n^2} - \frac{s}{\sigma_s^2} = 0 \quad (7)$$

解该方程得到原图像系数的 MAP 估计:

$$\bar{s} = \frac{f}{\frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} + 1} \quad (8)$$

因为 $\sigma_f^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2$, 所以 $\sigma_f^2 \geq \sigma_n^2$, 故小波系数的比例萎缩表达式如下:

$$\bar{s} = \begin{cases} f \times T, & \text{if } \sigma_f^2 \geq \sigma_n^2 \\ 0, & \text{else } \sigma_f^2 < \sigma_n^2 \end{cases} \quad (9)$$

$$T = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_f^2} \quad (10)$$

T 称为萎缩因子。由式(9)、式(10)可以看出,原图像小波系数的估计是自适应变化的。原图像系数的方差占整个含噪图像系数方差的比重越大,即萎缩因子越大,系数萎缩幅度越小;反之,萎缩因子越小,系数萎缩幅度越大。对于含噪图像系数方差小于噪声方差的情况,可以认为该系数对应噪声并将之置零。从系数萎缩公式可以看出,所有满足 $\sigma_f^2 \geq \sigma_n^2$ 条件的系数都减小了。本文进一步讨论在保证一定峰值信噪比的情况下,在考虑小波分解尺度和方向能量的基础上,通过修正萎缩因子来影响小波系数的萎缩过程,进而达到在图像降噪的同时实现细节和边缘增强的目的。

3 小波系数萎缩因子的修正

由于小波分解的低尺度频率段包含丰富的图像细节和边缘,且经过最大后验准则去噪后,图像噪声系数已得到了极大的抑制,因此考虑增强低尺度系数,并使高尺度系数的增强效果减弱。故给出考虑尺度因素的萎缩因子修正部分表达式:

$$t_1 = k \frac{J-i}{J-1} \quad (11)$$

其中, J 是小波分解的最大尺度, i 是尺度变量, k 为增强系数。

当分解尺度给出后,各个尺度所包含的总能量就确定了。每一尺度均包含水平、垂直和对角 3 个方向,某方向上的系数能量占整个尺度能量的比重越大,说明该方向包含较多的细节成分,应该予以增强。故给出考虑方向能量因素的萎缩因子修正部分表达式:

$$t_2 = t_1 \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f^2(x, y)}{\sum_{d=1}^3 \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f^2(x, y)} \quad (12)$$

其中,分母和项表示某尺度系数的总能量,分子和项表示该尺度某方向的系数能量。综合尺度和方向能量两方面因素,萎缩因子总的修正部分应该是两者的和,故给出下面的小波系数萎缩因子修正总表达式:

$$T' = T(1 + t_1 + t_2) \quad (13)$$

从式(13)可以看出,除了最大尺度 J ,修正后的因子均大于原因子,通过系数萎缩公式使得图像系数得到不同程度的放大。在低尺度和高能量方向上系数放大的程度最强,而这正是图像细节和边缘集中的区域。经过 MAP 准则降噪后,图像噪声系数已得到了极大的抑制,因此参与放大过程的小波系数大部分是原图像系数。

4 红外图像小波域自适应降噪增强算法过程

由于图像经小波变换后,噪声系数主要分布在低尺度的高频部分中,故用于原图像系数估计所需的噪声系数标准差可用式(14)描述, f_{HH} 是最低尺度对角高频部分系数, median 表示取中值运算。

$$\sigma_n = \frac{\text{median}(|f_{HH}|)}{0.6745} \quad (14)$$

原图像系数方差可由式(15)计算:

$$\sigma_s^2 = \max\left(0, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f^2 - \sigma_n^2\right) \quad (15)$$

n 是某尺度某高频部分小波系数的个数。至此,本文提出算法的处理流程可以描述如下:

- 1) 对图像进行小波多尺度分解;
- 2) 提取最低尺度的对角高频部分系数,按式(14)计算噪声的标准差;
- 3) 对每一尺度、每一方向的高频系数部分按式(15)计算原图像系数方差;
- 4) 按式(10)计算萎缩因子 T , 由式(13)计算修正后因子 T' ;
- 5) 将 T' 替换 T , 按式(9)估计原图像系数 \bar{s} ;
- 6) 重复步 3) 一步 5) 直到最大尺度;
- 7) 重构小波系数得到降噪增强后的图像。

5 试验

试验工具采用 matlab7.0。试验中对 House, Man 两幅红外图像分别施加 4 个不同等级的高斯噪声, 产生函数为 normrnd, 均值为 0, 标准差分别为 20, 30, 40 和 50。处理后峰值信噪比比较表和效果图如表 1、图 1 和图 2 所示。增强系数 k 取 1。峰值信噪比计算由式(16)描述:

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f'(i, j) - s(i, j))^2} \quad (16)$$

$f'(i, j)$ 是降噪增强后的图像, $s(i, j)$ 是未加噪声的原图像。试验采用 sym4 小波进行 3 级分解。

表 1 各个算法在 4 种高斯噪声水平下的 PSNR 值比较

	σ	加噪图像	3 σ 准则	Visushrink	MAP($k=0$)	增强 MAP($k=1$)
House	20	22.12	29.26	29.30	30.14	28.96
	30	18.58	26.94	27.07	28.30	27.73
	40	16.10	24.84	25.24	27.06	26.44
	50	14.15	23.33	23.74	26.08	25.73
Man	20	22.12	31.78	31.49	33.12	32.83
	30	18.58	29.04	28.63	31.09	31.01
	40	16.10	27.44	26.75	29.80	29.59
	50	14.19	26.03	25.38	28.75	28.69

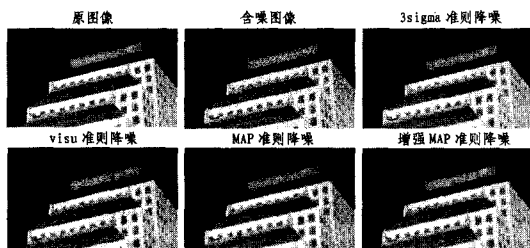


图 1 House 图像及降噪处理效果图

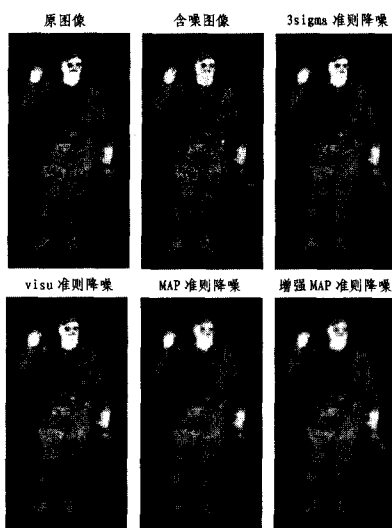


图 2 Man 图像及降噪处理效果图

从表 1 可看出, 在各个噪声等级下, MAP 算法 ($k=0$) 降噪后图像的 PSNR 值都达到最大, 明显强于 3 σ 准则降噪和 visushrink 降噪。增强 MAP 算法的 PSNR 值略低于 MAP 算法, 这主要是因为在对小波细节系数进行放大的同时, 一部分经过 MAP 准则降噪没有被滤除的噪声系数也得到了增强。在多数噪声等级情况下, 增强 MAP 算法的 PSNR 值均大于 3 σ 准则降噪和 visushrink 降噪。

限于篇幅, 取噪声标准差为 30 的图像处理结果, 图 1 及

图 2 上排从左至右、下排从左至右分别为原图像、噪声图像、3 σ 准则降噪、visushrink 准则降噪、MAP 准则降噪和增强 MAP 降噪 ($k=1$)。从处理效果图像可以看出, 在主观视觉效果上, MAP 降噪和增强 MAP 降噪要优于其它算法。对比 House, Man 分别经过增强 MAP 和 MAP 算法的处理图像可以看出, 在视觉效果上增强 MAP 算法对于图像边缘和细节的处理能力要优于 MAP 算法, 这可以通过观察 House 图像的窗户和屋檐、Man 图像的清晰度和对比度看出。两幅图像在增强后整体灰度分布较均匀, 当然这是以牺牲一定的 PSNR 值为代价得到的。从处理图像中可以看出, 噪声增强效果在视觉上并不明显。

6 增强系数 k 的讨论

在噪声标准差水平 20, 30, 40, 50 下, 取增强系数 $k=0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3$, 对红外图像 House 做试验, 得到系数 k 与 PSNR 值的变化关系。为方便显示, 以 20, 40 和 30, 50 分两组分别绘制, 如图 3 所示。

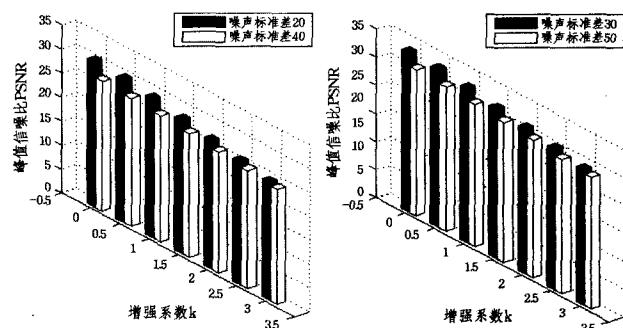


图 3 噪声标准差水平 20 和 40, 30 和 50 下增强系数 k 与 PSNR 值关系图

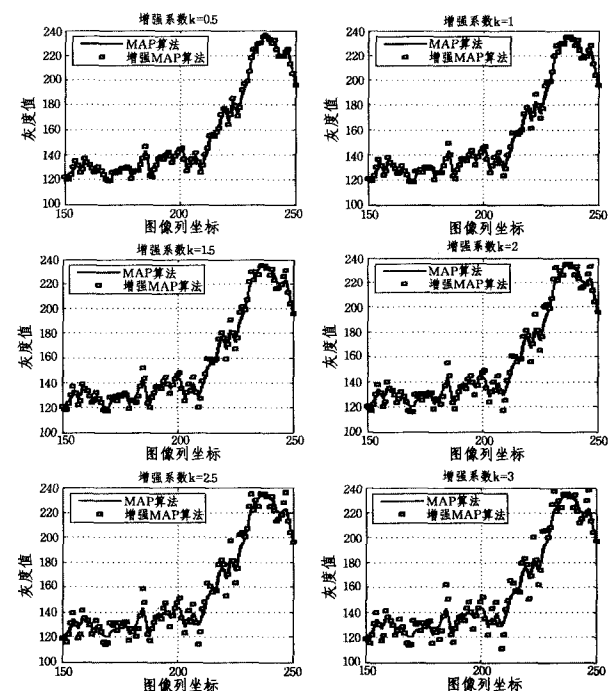


图 4 不同增强系数下增强 MAP 降噪图像与 MAP 降噪图像的灰度值比较曲线

在每张图中, 对应于每个 k 值, 左边的柱形代表低噪声水平, 右边的表示高噪声水平。在每一噪声水平下, 随着 k 值的

增大,PSNR 值有减小的趋势。低噪声水平的 PSNR 值下降趋势要快于高噪声水平。在相同的 k 值下,噪声标准差水平高的降噪增强图像的 PSNR 值要低于噪声标准差水平低的降噪增强图像。当 k 值大于 1.5 时,4 种噪声水平下的 PSNR 值下降幅度都比较明显,表现在图像视觉效果上就是噪声分布非常明显,这说明 k 值不能过大,否则会使按照 MAP 准则降噪遗留下来的噪声系数的增强幅度过大。

在噪声标准差水平 50 下,针对图像 House 绘制增强系数 $k=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3$ 时增强 MAP 降噪图像与 MAP 降噪图像在第 160 行从第 150 列至 250 列的灰度值比较曲线,如图 4 所示。图中实线代表 MAP 图像灰度曲线,空心方框轨迹表示增强 MAP 图像曲线。从中可以看出,在 $k=0.5, 1$ 时,增强 MAP 与 MAP 灰度值差异不大;从 $k=1.5$ 开始两者间的灰度值差异开始加大,到 $k=3$ 时,差异达到最大。灰度值差异越大,说明增强 MAP 降噪图像的 PSNR 值下降的幅度越大。

总之, k 值越小,图像增强的视觉效果越不明显; k 值越大,噪声会过度放大,同样使得视觉效果下降。在实际应用中,应该根据图像的特点合理选择增强系数 k ,以便在峰值信噪比和图像细节增强之间找到平衡。

结束语 本文针对红外成像易受噪声干扰造成图像模糊、分辨率低、对比度弱等特点,提出了带增强效果的基于最大后验概率准则的小波域自适应降噪算法。该方法通过考虑不同尺度和不同方向能量因素,对系数萎缩因子进行修正,使得在保证较高 PSNR 值的基础上,图像细节和边缘得到不同程度的增强。试验结果表明,本文提出的方法可以得到信噪

比明显提高、细节突出、对比度提高的图像,缓解了图像降噪和边缘细节模糊的矛盾,获得了较好的视觉效果。如果利用小波系数根据尺度间的相关性进一步滤除基于最大后验概率准则降噪遗留下来的噪声后再进行增强,便会获得更好的处理效果。本文提出的小波系数增强方法可以应用于基于其它降噪准则的比例萎缩算法中。

参考文献

- [1] 谢杰成,张大力,徐文立.小波图像去噪综述[J].中国图象图形学报,2002,7(3):209-217
- [2] 李旭超,朱善安.小波域图像降噪概述[J].中国图象图形学报,2006,11(9):1201-1209
- [3] 潘泉,孟晋丽,张磊,等.小波滤波方法及应用[J].电子与信息学报,2007,29(1):236-242
- [4] 熊江.小波域图像降噪概述[J].计算机科学,2007,34(7):232-234
- [5] Donoho D L,Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. Biometrika,1994,81(3):425-455
- [6] Donoho D L. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory,1995,41(3):613-627
- [7] Shark L K, Yu C. Denoising by optimal fuzzy thresholding in wavelet domain[J]. Electronics Letters,2000,36(6):581-582
- [8] Malfait M, Roose D. Wavelet-based image denoising using a Markov random field a priori model[J]. IEEE Transactions on Image Processing,1997,6(4):549-565
- [9] 王文,芮国胜,王晓东,等.图像多尺度统计模型综述[J].中国图象图形学报,2007,12(6):961-969

(上接第 273 页)

参考文献

- [1] Haruhisa O, Manabu H, Kazuhiko S, et al. Optimum selection algorithm of motion estimation blocks for fast and robust digital image stabilization[C]//Proc. IEEE International Conference on Consumer Electronics. Los Angeles, CA, USA, June 2003:396-397
- [2] Kim P. Image sequence stabilization scheme using FIR filtering [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2003,1(4):515-519
- [3] Kurazume R, Hirose S. Development of image stabilization system for remote operation of walking robots [C]//Proc. 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. San Francisco, CA, USA, April 2000:1856-1861
- [4] Jin J S, Zhu Z, Xu G. A stable vision system for moving vehicles [J]. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2000,1(1):32-39
- [5] Carmona C. Vegetation L-band image processing system, geometric performances and spatio-temporal stability [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004,25(9):1769-1777
- [6] Duric Z, Rosenfeld A. Image sequence stabilization in real time [J]. Real-Time Imaging, 1996,2(5):271-284
- [7] Marc C, Purnendu S. Survey of motion estimation techniques for video compression [C]//Proc. of SPIE. vol. 4796, Seattle, WA, United States, 2002:218-226
- [8] 周渝斌. 数字图像稳定算法研究和系统设计 [D]. 北京:北京理工大学, 2004
- [9] Derby J H, Moreno J H. A high-performance embedded DSP

- core with novel SIMD features [C]//Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (IC-ASSP). Hong Kong, April 2003:301-304
- [10] Brown R G, Hwang P Y C. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering (2nd edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, 1992:190-288
- [11] Ertürk S. Real-time digital image stabilization using Kalman filters [J]. Real-Time Imaging, 2002,8(5):317-328
- [12] Cheresiz D, Juurlink B, Vassiliadis S, et al. Architectural support for 3D graphics in the complex streamed instruction set [J]. International Journal of Parallel and Distributed Systems and Networks, 2002,5(4):185-193
- [13] Ahmad I, Yeung D K, Zheng W, et al. Software based MPEG-2 encoding system with scalable and multithreaded architecture [C]//Proc. of SPIE: Commercial Applications for High-Performance Computing. Denver, Colorado USA, August 2001, 4528:44-49
- [14] Servetti A, Rinotti A, De Martin J C. Fast implementation of the MPEG-4 AAC main and low complexity decoder [C]//Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Montreal, Canada, May 2004,5:249-252
- [15] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing [M]. Cambridge, U. K: Cambridge University Press, 1999
- [16] 张鹏,杜建国,解晓东,等.一种基于多核流水的多标准视频编解码器体系结构 [J]. 计算机研究与发展, 2008,45(ii):1985-1993
- [17] Rasmussen M S, Stuart M B, Karlsson S. Parallelism and Scalability in an Image Processing Application [J]. International Journal of Parallel Programming (JournalSeek), Apr. 2009
- [18] Terboven C, Dieter M, Schmid D. First Experiences with Intel Cluster OpenMP [C]//International Workshop on OpenMP. LNCS 5004. 2008:48-59