

文章编号: 0253-2239(2006)03-0341-6

基于高速公路裂纹局部线性特征内容的脊波 变换域算法研究*

王 刚^{1,2} 贺安之¹ 肖 亮³

1 南京理工大学信息物理与工程系, 南京 210094
2 鲁东大学物理与电子工程学院, 烟台 264025
3 南京理工大学计算机科学与技术学院, 南京 210094

摘要: 利用频域中傅里叶变换投影定理, 提出一种新的离散脊波实现算法, 应用于高速公路局部线性裂纹的检测取得较好效果。详细阐述了离散脊波的实现步骤以及对标准图像进行脊波变换的模拟结果, 并提出拉东(Radon)变换重建原图像的基本条件。上述定理应用于复杂背景下的路面检测, 结合直方图均衡化算法消除背景噪声; 选用基于样本估计的阈值方法对脊波分解的各层系数进行处理去除随机噪声。选用不同的重构系数进行计算, 得到脊波变换后重构图像的信噪比优于二维小波变换(低频大于 20 dB)以及二维小波变换加魏纳滤波变换(平均大于 3 dB)。通过图像的二值化处理提取局部线性裂纹, 其分辨力极限达到 2 mm 精度。

关键词: 图像处理; 脊波变换; 拉东变换; 线性裂纹; 小波变换

中图分类号: TP751 文献标识码: A

Algorithm Research in Ridgelet Transform Domain Based on the Image Content of Freeway Local Linear Crack

Wang Gang^{1,2} He Anzhi¹ Xiao Liang³

1 Department of Information Physics and Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094
2 School of Physics and Electronic Engineering, Ludong University, Yantai 264025
3 School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094

Abstract: A new algorithm is proposed, through Fourier transformation projection theory using frequency-domain analysis, to detect local linear cracks on the freeway surface. And valid results are obtained. The steps of discrete ridgelet algorithm and the ridgelet transform results of the standard image are represented in detail. The basic condition of reconstructing the original image through Radon transformation is proposed. The method is used to detect actual complex surface, and denoise background noise combined with the histogram equilibrium algorithm. Estimated sample threshold is used to treat the level coefficients of ridgelet transform and get rid of the Random noise. The signal-to-noise ratio of ridgelet transform is better than that of the two-dimensional wavelet transform (greater than 20 dB in the state of low-frequency) and wavelet transform plus Weiner filtering (greater than 3 dB on the average) through counting the different reconstruction coefficients. The local linear crack is picked up through binary image and the resolution factor is within 2 mm.

Key words: image processing; ridgelet transform; Radon transform; linear crack; wavelet transform

1 引 言

高速公路路面裂纹问题是影响公路服务水平的一个很大的指标, 若能在裂纹的出现初期就发现, 那么它的维护费用将大大降低^[1]。目前, 对于裂纹特征的提取一般有两种方法: 空间域方法和变换域法。根据路面灰度图像的成像特点, 裂纹信号是一种高

幅值负信号, 在其边缘有着很高的频率, 多表现为较长的线段; 而随机噪音是一种高频但幅值相对较低的信号, 表现为离散的点及较短的线。直接利用空间域方法进行边缘(路面裂纹)检测会由于噪声信号过强导致效果较差; 变换域方法由于对图像压缩、滤波以及噪声抑制均有一定的鲁棒性且更易于结合图

* 南京理工大学青年学者基金(200401)资助课题。

作者简介: 王 刚(1970~), 男, 南京理工大学博士研究生, 主要从事模式识别与图像处理的研究。

E-mail: happy_wg@163.com

收稿日期: 2005-04-28; 收到修改稿日期: 2005-09-05

像的局部统计特性和人类的视觉系统特性等优势正变得日益普遍。变换域中的小波变换方法在表示有点奇异性的目标函数时被认为是最优基^[2,3],且解决了噪声的抑制问题,但在表现图像边缘方面,小波基和傅里叶基均不是最优基^[4],突出表现在利用小波变换和傅里叶变换处理的图像信噪比不高。1998年,Donoho和Candes^[4~6]提出了以脊波(Ridgelet)为代表的几何多尺度分析理论,也被称为“Beyond Wavelet”问题,即超小波理论,并完成了脊波的理论框架^[7]。脊波分析等价于目标函数拉东(Radon)变换域的小波分析,即通过拉东变换将不同方向的线奇异性映射为点的奇异性,从而实现图像中局部线性特征的有效表示。本文在脊波分析的框架下,提出了一种结合二进小波变换的局部脊波变换提取图像中的局部线性特征的新型算法,应用在含有线性裂纹的高速路面,通过寻找奇异点来得到裂纹的位置及宽度,且具有较高的几何逼近程度及信噪比。

2 脊波变换原理

2.1 连续脊波变换

根据Donoho和Candes提出的思想^[5],对于一

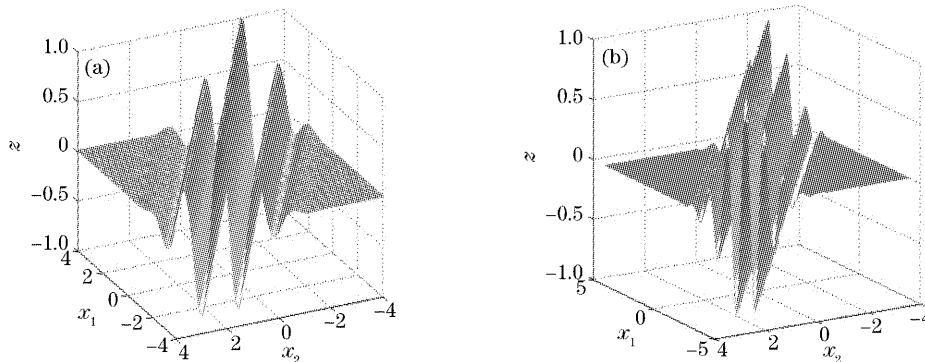


图1 由Morlet小波生成的脊波函数。(a)原始脊波函数,(b)尺度变换后的脊波结构

Fig.1 Ridgelet function generated from Morlet. (a) Original ridgelet, (b) after rescaling ridgelet

2.2 脊波的离散算法实现及模拟

对于在有限二维图像中进行的局部线性特征的提取,本文提出一种简易且分析精度较高的离散算法。考虑到通过拉东变换和一维的小波变换可实现脊波的变换,对应于离散的情形,文献中早已提出一维小波的离散变换,关键是离散拉东变换的实现。这里采用变换的基础是傅里叶变换投影定理。假设 $G(\theta, \lambda)$ 是对应于拉东变换 $[R(\theta, t)]$ 中不同截距 t 的一维傅里叶变换, $F(X, Y)$ 是对应于图像 $f(x, y)$ 的二维傅里叶变换。则可以证明如下定理^[8,9]:

个在二维实数空间(IR^2),脊波函数定义为

$$\psi_{a,b,\theta}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi[(x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta - b)/a], \quad (1)$$

式中 $\psi(t)$ 是满足一定消失矩和光滑性的振荡的小波函数。则对于 $f: R^2 \rightarrow R^2$ 可积空间的连续脊波变化为

$$\mathcal{R}_f(a, b, \theta) = \langle f, \psi_{a,b,\theta} \rangle, \quad (2)$$

其中 $a, b \in R, a > 0$ 如同小波定义类似, a 表示脊波的尺度, b 表示脊波的位置, $(\cos \theta, \sin \theta), \theta \in [0, 2\pi)$ 表示在 $x_1 - x_2$ 平面内的方向向量,且Candes已经证明存在完全重建公式^[6],由(2)式可见,对于任意的 $f(x)$ 均可表示为一系列脊波函数的叠加。脊波函数是局部在窄带 $\{(x_1, x_2) | x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta - b < a\}$ 上的,图1所示为经典小波(Morlet)生成的脊波函数及尺度变换后的脊波结构,在垂直于脊线($x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta = \text{const}$)方向的横截面上是一条类似小波的曲线,正是脊波函数采用表示直线的参量 (b, θ) ,而不是小波函数采用的点的参量 (b_1, b_2) ,所以能有效地处理图像中局部线性状和超平面状的奇异性。另外脊波变换可以表示为该函数拉东变换切片上的一维小波变换。

$$G(\theta, \lambda) = F(\lambda \cos \theta, \lambda \sin \theta), \quad (3)$$

上式可以解释为 $f(x, y)$ 在与 X 轴成 θ 角的直线上投影的傅里叶变换是 $f(x, y)$ 的傅里叶变换在朝向角 θ 上的一个截面,因此可以通过二维离散傅里叶变换映射方法实现离散拉东变换。至此,通过离散拉东变换与一维离散小波变换完全可以实现离散脊波变换且具有准帕色渥(Parseval)定理的性质^[10]。具体实现步骤如下:

1) 对数字图像 $f(k_1, k_2) (1 \leq k_1, k_2 \leq M)$ 作二维傅里叶变换,计算得到 $F(K_1, K_2) (1 \leq K_1, K_2 \leq$

M)。

2) 定义整数 M^+ 和 M^- :

$$\begin{cases} M^+ = (M-1)/2, \\ M^- = -(M-1)/2, \end{cases} \quad M \in \text{odd number}$$

$$\begin{cases} M^+ = M/2 - 1, \\ M^- = -M/2, \end{cases} \quad M \in \text{even number}$$

则 $M^- \leq k_1, k_2, K_1, K_2 \leq M^+$ 。

3) $F(0,0)$ 为原点,考虑在 p 个相差 $\Delta\theta$ 的角度上(均匀采样)作径向变换,每个方向取 q 个点,从文献[11]可知,对于 b 限带的待测图像,一定可以由其在 $[0, \pi]^n$ 上的 p 个互不相同的方向角 θ 上的投影可靠地恢复,此时 $p > b^{n-1}/(n-1)!$ 。优化的采样条件是 $p = \frac{\pi^{n-1}}{(n-1)!} q^{n-1}$, n 为待测图像的空间维数。在本文中,只需要检测图像中的局部线性特征(路面的线性裂纹),并不需要完全重构原场图像。因此可根据实际图像的特点选择灵活的采样精度,求取裂纹的位置与宽度。在从矩形网格频域数据变换到径向频域矩阵过程中,变换的准确性将直接影响到重构图像的质量,如图 2 所示。首先,把整个 $(K_1 \times K_2)$ 频域数据的矩形网格分成两个部分进行径向数据转换,

即 $S_1 \subset \left\{ -\frac{\pi}{4} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{4} \right\}$ 和 $S_2 \subset \left\{ \frac{\pi}{4} < \alpha < \frac{3\pi}{4} \right\}$ 。对应 p 个不同的角度分别求取径向坐标:

$$\begin{cases} k_{2q}^{S_1} = k_{1q}^{S_1} \cdot \tan \alpha, \\ \alpha \in S_1, M^- \leq k_{1q}^{S_1} \leq M^+, \\ k_{1q}^{S_2} = k_{2q}^{S_2} \cdot \cotan \alpha, \\ \alpha \in S_2, M^- \leq k_{2q}^{S_2} \leq M^+, \end{cases} \quad (4)$$

式中 $k_{1q}^{S_1}, k_{2q}^{S_2}$ 为取样点的直角坐标,其随 p, q 取值的范围而变化。然后,将得到的新的径向坐标对原直角坐标下的二维傅里叶变换值进行插值,得到在笛卡儿坐标下的变换值。通常采用的插值方法有线

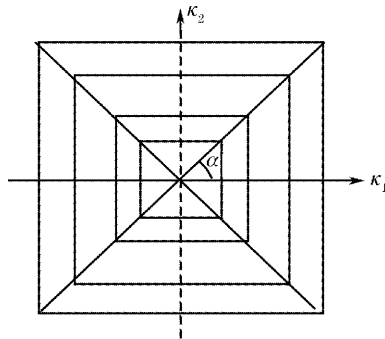


图 2 直角坐标转换为极坐标示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rectangular to polar coordinate

性内插法,三次样条内插法,三次多项式内插法等。并按照逆时针方向($0 \rightarrow \pi$)将 p 行傅里叶变换值自上而下组成一个新二维矩阵。

4) 对得到的笛卡儿坐标下的径向频域矩阵 $(p \times q)$ 的每行作一维快速傅里叶变换,所得到的时空域中的数据即是拉东变换后的函数投影值,新矩阵的行表示投影角度,列表示每个角度上的投影点数。

5) 对时空域矩阵的行向量作一维离散二进小波变换,便完成了有限空间域的离散二进脊波变换。现对一幅含有直角三角形的标准图像 $(256 \times 256, 8 \text{ units/pixel})$ 如图 3 所示进行脊波变换,运用二维傅里叶变换在径向方向的插值后,再求其反变换后得到原图像的拉东变换系数值。在此选用三次样条内插法,径向方向分别选取 $(1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ, 7^\circ, 8^\circ, 9^\circ)$ 的角度间隔进行频域值投影,每个角度的采样点间隔均为 $1/4 \text{ pixel}$ 值,图 4 所示为径向角度取 180 个不同值的拉东变换系数值。



图 3 含有局部线性特征的标准图像

Fig. 3 Standard figure containing local linear character

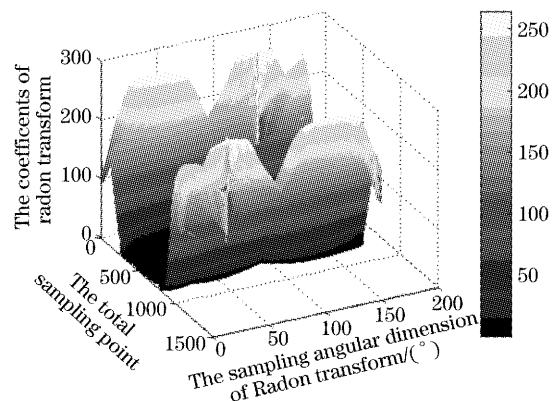


图 4 径向角度取 180 个不同值的拉东变换系数值

Fig. 4 Radon transformation coefficient of 180 radial angle

从图 4 可见,在径向角度为 $45^\circ, 135^\circ$ 附近对应拉东变换极大值,而在 100° 附近对应极小值。同时利用不同拉东采样精度后所得到的脊波变换值重建原图像,如图 5 所示,取样间隔及采样点数均满足步

骤(3)中的条件,从(a)~(d)采用角度间隔依次为 9° 、 5° 、 3° 、 1° ,由于图3对应有有限的空间域,其频域是无限的。因此,逆变换重构图像只是近似的逼近像,其重构精度取决于拉东变换投影角度数目和每个投

影角度上的投影点数。并且从图5中还可以看出,随着采样点数的密集,重建图像的卷绕效应有很大的消除。

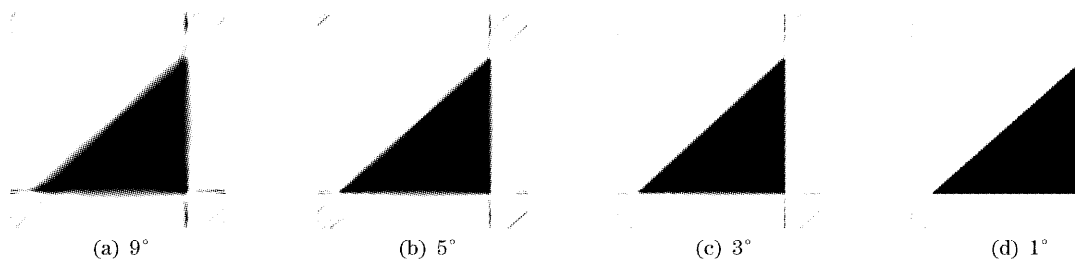


图5 不同采样精度下的脊波系数重建原图像

Fig. 5 Original figure reconstruction from ridgelet coefficients of different sampling accuracy

3 路面实验结果

运用脊波变换对含有横向或纵向裂纹的路面进行检测,可以消除路面上残留的油滴、污垢以及微小的坑洞对检测结果的影响,可以直观地观测到裂纹的形状、位置。文中对2004年12月6日对沪宁高速公路马群段某处所拍摄的图片进行了处理,当时路上有水渍,图像所含的各种干扰噪声较大。首先一幅CCD摄像机拍摄的含有裂纹的灰度图像由于非均匀光照和成像系统所形成的缓慢变化部分,即图像中间亮、四周暗,直接进行脊波变换将导致部分裂纹信息的丢失。因此首先需要对图像的灰度进行均匀化处理,以消除背景噪声的干扰。在此选用直方图均衡化的变换算法使输出图像直方图近似为均匀分布。转移函数如图6所示,图中横、纵坐标分别表示输入、输出直方图的归一化灰度级,变换后的结果如图7(a)所示。然后,运用脊波的离散算法进行脊波分解与重构。原图像经二维傅里叶变换,得到其限带宽度为193 cycles/pixel,由脊波变换定理(3)式可知,应用拉东变换在 $[0, \pi]$ 上至少需要193个互不相同的方向角 θ 上的投影可靠地恢复,在 T 方向上的采样点数至少为61个。在运用脊波提取

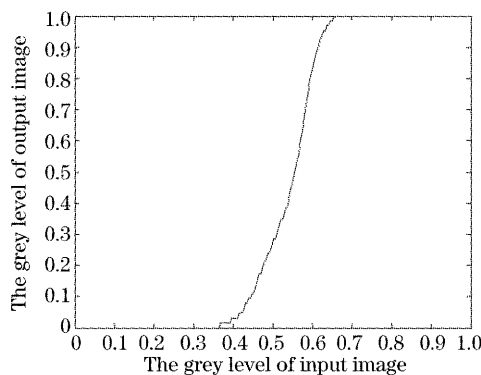


图6 直方图均衡化转移函数

Fig. 6 Transfer function of histogram equalization

裂纹过程中,选用基于样本估计的阈值的方法(最小极大方差阈值)对脊波分解的各层系数进行处理,具体做法是:用‘sym6’型小波进行4层分解,采用的阈值为34.9244,用此参量对各高频层进行处理,并且保留低频系数,最后进行图像的重构。图7(b)为用‘Sym6’小波对图7(a)进行二维空间处理的结果,从图7(b)中可见,提取的裂纹连续性较差,且对于裂纹外的大噪声点抑制不好,其原因为小波主要提取二维空间中点的奇异性。图7(c)为使用脊波处理过的图片,图中清楚显示出裂纹的形状和方向

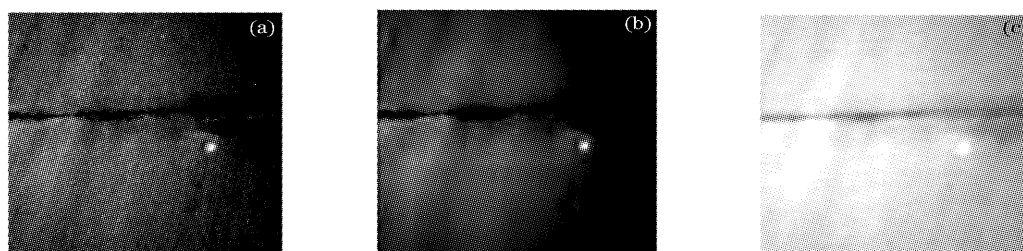


图7 沪宁高速公路马群段某处裂纹检测图片(2004.12.6)

Fig. 7 Cracks detection figure somewhere in Maqun of Huning freeway (6 December 2004)

性,且对噪声的抑制较好,显示出多尺度几何逼近的优势。同时,可以认为待处理的路面图像是由处理后的路面图像加噪声组成,则定义输出图像($M \times N$)的信噪比(R_{SN})为:

$$R_{SN} = 10 \times \lg \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} g^2(x, y)}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [g(x, y) - f(x, y)]^2}, \quad (5)$$

式中 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 分别表示原图像及处理过图像的对应像素点。选用不同的重构系数进行计算,得到二维小波变换、二维小波变换加魏纳滤波变换、脊波变换后重构图像的信噪比如图 8 所示,横坐标表示不同的重构系数,在此保留低频系数,按比例增加高频系数来改变重构系数。可以看出,脊波变换后的信噪比远大于小波变换后的,且在低频情况下尤其显著(大于 20 dB)。小波变换加魏纳滤波之后的信噪比较稳定(位于 18~19 dB 之间),而三者在大高频系数比例之后逐渐趋于稳定。

为了清楚地说明图 7 所得到的结果,将图 7 中的各图对应进行二值化映射,得到图 9 所示的结果。采用坎尼(Canny)算子边缘提取准则,在映射灰度为 [0 1] 区间内边缘阈值设定为 [0.0438, 0.1094] 进行边缘提取,从图 9 看出,从含有随机噪声比较强的原图中提取局部线性特征,应用小波的方法[图 9(b)]边缘的线性不好,主要表现为边缘是由一系列离散的点所

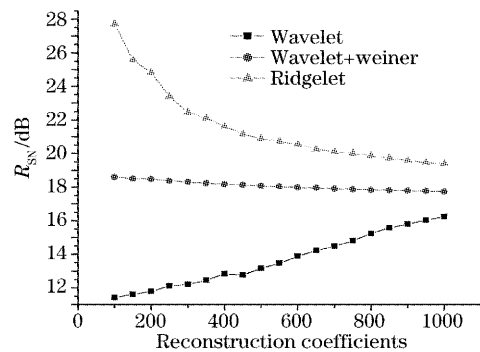


图 8 脊波变换、二维小波变换以及二维小波变换加魏纳滤波变换后不同系数重构的信噪比

Fig. 8 Reconstruction signal-to-noise ratio R_{SN} of ridgelet, two-dimensional wavelet and wavelet plus Weiner transformation coefficients

组成,这与前面所分析的原理相符。图 9(c)则基本将原图的边缘提取出来,且对离散点噪声抑制较好。从试验结果分析,脊波变换在提取路面上含有线性裂纹及消除路面上的油滴、石子等点奇异性方面具有独特的优势,图像二值化后,基于图 9(c)得出的裂纹形状进行法向方向的测量,共测量十次,取其平均值,对于每幅图像对应实际路面(0.9 m × 0.9 m)来讲,换算后得到的横向裂纹宽度约为 8.9 mm,与实际的裂纹宽度对比,误差范围在 1.5 mm 以内。为后期精确地评价路面质量及相应的保养措施提供了依据。

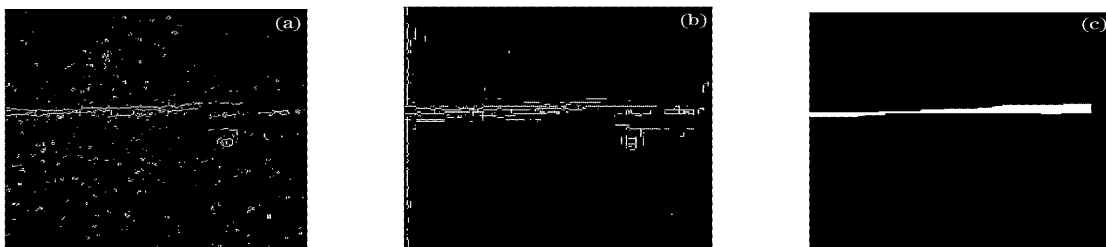


图 9 裂纹检测图片的二值化映射提取边缘结果

Fig. 9 Binary edge result of cracks detection image

4 讨 论

本文提出一种基于拉东变换与一维小波变换相结合的新型算法提取图像中的局部线性边缘,用于路面的线性裂纹的检测收到了很好的效果。理论模拟显示对于具有局部线性和超平面奇异性的高维信号,该算法具有较高的几何逼近精度和信噪比。实验结果显示,脊波变换在对图像中被噪声中断的边缘提取中及抑制点奇异性方面有独特的效果。不过,在对复杂图像的处理中,特别是含有曲线型边缘

及纹理特征的图像,此方法并不是最优选择。当然,通过图像分割的方法,把分块图像中的曲线看成是近似的直线然后把脊波变换应用于局部图像进行检测,也能收到较好的效果。

参 考 文 献

- 1 Janne Huiskonen. Maintenance spare parts logistics, special characteristics and strategic choices [J]. *International J. Production Economics*, 2001, 71(1~3): 125~133
- 2 S. Mallat, S. Zhong. Characterization of signal from multi-scale edges[J]. *IEEE Transaction On Pattern Analysis and Machine*

- Intelligence*, 1992, **14**(7): 710~732
- 3 Stephane Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing* [M]. Yang Lihua, Dai Daoqing, Huang Wenliang *et al.* transl., Beijing: China Machine Press, 2002 (in Chinese)
Stephane Mallat 著. 信号处理的小波导引[M]. 杨力华, 戴道清, 黄文良 等译, 北京: 机械工业出版社, 2002
- 4 D. L. Donoho. Orthonormal ridgelets and linear singularities [R]. *Technical Report. Stanford University*, 1998
- 5 E. J. Candes. *Ridgelet: Theory and Application*[D]. Stanford University, 1998
- 6 E. J. Candes. Monoscale ridgelets for the representation of images with edges[R]. *Technical Report. Stanford University*, 1999
- 7 E. J. Candes, D. L. Donoho. Curvelets; a surprisingly effective non-adaptive representation for objects with edges[R]. *Technical Report. Stanford University*, 1999
- 8 Yao Hongbing, He Anzhi. Improvement of the reconstruction algorithm of optical computerized tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 158~161 (in Chinese)
姚红兵, 贺安之. 光学层析重建算法改进的研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 158~161
- 9 Yao Hongbing, He Anzhi, Wu Yingchuan *et al.*. Three-dimensional tomography of incomplete data with fusion of virtual and real experiments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 479~484 (in Chinese)
姚红兵, 贺安之, 吴颖川 等. 虚拟实验和真实实验相融合的三维非完全数据层析[J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 479~484
- 10 D. L. Donoho. Emerging application of geometric multiscale analysis[C]. *International Congree of Mathematicians*, 2002, **1**: 209~233
- 11 Yao Wei. *Theories and Techniques on Phase Field Interferometric Tomography* [D]. Nanjing: Naning University of Science & Technology, 1998. 41~43 (in Chinese)
姚 卫. 相位场干涉层析的理论和方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 1997. 41~43



中国光学学会 2006 年学术大会 2006' General Congress of Chinese Optical Society

会议时间:2006 年 9 月 3~5 日

会议地点:中国·广州

主办单位:中国光学学会

承办单位:华南师范大学, 广东省光学学会

展馆地点:中国·深圳 (2006 年 9 月 6~9 日)

协办单位:清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 广州光学学会, 深圳光学学会, 中国光学学会国际会议展览工作委员会, 中国国际光电博览会(深圳), 广州光学光电子行业协会, 深圳光学光电子行业协会

会议宗旨:两年一次的中国光学学会年会, 将于 2006 年 9 月 3~5 日在广州举行。由华南师范大学和广东省光学学会具体承办。本次会议将总结交流我国光学、光子学和工程光学领域的最新成果, 展望 21 世纪的发展方向, 为新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台, 促进本领域的科技创新和成果转化。本次会议将与光学、光电子新技术和新产品大型国际展览会——中国国际光电博览会及中国光电产业高级论坛同期举行。

会议名誉主席:王大珩(中国科学院)

会议主席:母国光(南开大学)

节目委员会主席:金国藩(清华大学)

组织委员会主席:刘颂豪(华南师范大学)

大会秘书长:邢 达(华南师范大学)

大会安排 15 个专题会议(分会场): 1) 量子光学与非线性光学, 2) 生物与医学光学, 3) 激光物理与技术, 4) 光学功能材料, 5) 集成光子学与光纤光学, 6) 光通信与光传感, 7) 光学存储与光全息, 8) 工程光学与光学制造, 9) 光电技术与系统, 10) 光学薄膜技术, 11) 超快光学, 12) 光学微系统与微纳米技术, 13) 颜色光学、眼(科)光学和仪器, 14) 激光加工技术, 15) 光学教学研究

会议论文提交截止时间:2006 年 6 月 15 日(论文提交请见会议网站及第二轮通知)

承办单位地址:广州市华南师范大学信息光电子科技学院, 邮政编码: 510631

电话:+86-020-39310309, +86-020-85216848, **传真:**+86-020-39310311, **联系人:**崔红丽, 罗爱平

电子邮箱:guangd@scnu.edu.cn (崔红丽), luoaiping2003@126.com (罗爱平)

本会议建立了会议网页, 网址为: <http://laser.scnu.edu.cn/final/index2.htm>。敬请大家访问浏览, 了解会议细节和相关的最新信息。