

基于小波变换的 X 射线光栅成像多信息融合技术

武杰 韩跃平

(中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要 X 射线光栅成像技术可以利用传统 X 射线机在一次成像中同时获取被检测体的衰减、相衬与暗场信息。介绍了当前 X 射线光栅成像的基本原理与系统结构, 分析了同一成像传感器在同一时空场景下获取的三种信息的各自特性以及相互之间的影响与相关特性, 利用基于小波变换的图像融合方法对衰减、相衬与暗场信息进行融合。对 Pfeiffer 等的原始实验数据的仿真验证表明: 合理的图像融合技术可以实现对同时包含有多种轻、重元素物质在内的大动态范围高分辨率一次性单图成像检测。

关键词 图像处理; X 射线; 光栅成像; 图像融合; 小波变换

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.111003

Information Fusion Technology of X-Ray Grating Imaging Based on the Wavelet Transform

Wu Jie Han Yueping

(Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory,
North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract X-ray grating imaging technology can use traditional X-ray machine to get the attenuation, phase contrast and dark information of the object to be tested in one image. The basic principle and system structure of the X-ray grating imaging are introduced. And then, the respective characteristics, mutual influence and relevant features of three kinds of information of the same scene are analyzed, which are obtained by the same sensor in the same space and time. The attenuation, phase contrast and dark information are used to fuse based on the wavelet transform. The simulation results of the original Pfeiffer's experimental data show that, reasonable image fusion technology can realize a one-time high resolution imaging detection in large dynamic range, including various light and heavy elements.

Key words image processing; X-ray; grating imaging; image fusion; wavelet transform

OCIS codes 100.2960; 110.7440; 110.2960

1 引言

自 1895 年德国科学家伦琴发现 X 射线以来, X 射线影像技术已经在工业无损检测、生物医学诊断和食品安全检查等与人们息息相关的领域取得了令人瞩目的成果^[1]。传统的 X 射线成像技术的成像基础是利用物质对 X 射线的衰减特性来对物体进行成像^[2]。然而, 对于以碳、氢、氧和氮等轻元素构成的物质及生物软组织来说, 它们对 X 射线的吸收作用很弱, 所以传统的 X 射线成像技术几乎无法看到它们的内部结构。即使增加剂量和给生物打上造影剂也很难得到清晰的图像。随着 X 射线相位衬度成像(PCI)的出现, 为生物软组织和病变组织的发现以及小器官的微观结构观察和评价提供了新的研究途径。它是通过探测物质引

收稿日期: 2012-06-04; **收到修改稿日期**: 2012-07-17; **网络出版日期**: 2012-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61171178, 61171179)、博士后科学基金(20110490366)和山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划资助课题。

作者简介: 武杰(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事 X 射线无损检测与图像处理技术等方面的研究。

E-mail: wujie3358009@126.com

导师简介: 韩跃平(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事 X 射线无损检测、图像处理与模式识别等方面的研究。

E-mail: hanyueping@nuc.edu.cn

起 X 射线的相移(即相位变化)来进行成像^[3]。

20 世纪 90 年代,各种成像技术的发展很大程度增加了样品的对比度,主要包括相衬成像法、暗场成像法和光栅成像法^[4]。其中光栅成像法是利用相位光栅和吸收光栅,对 X 射线穿透样品时产生的透射光、折射光和散射光分别进行成像,由于提高了 X 射线成像的衬度分辨率和空间分辨率,因而获得了广泛的研究和应用。Pfeiffer 等^[5-7]应用 Talbot-Lau 干涉法获取了微分相位信息和小角散射信息(即暗场信息),之后利用计算机断层扫描术(CT)重建了样品的折射指数和散射参数的分布,并于 2007 年在同步辐射光源下实现了基于一个相位光栅的相衬成像技术。2009 年,Huang 等^[8]提出了一种基于经典光学的光栅成像方法,摆脱了 Talbot 效应对部分相干 X 射线的要求和限制,可直接使用非相干 X 射线照射两块光栅产生叠栅条纹。基于光栅的相衬成像方法的一个重要突破是 2006 年 Pfeiffer 等^[9]利用三个光栅实现 Talbot-Lau 干涉法,在常规 X 光机上实现了对小鱼样品的相衬成像实验;另外,在 2008 年,他们基于同样的实验系统配置,提出了新的信息提取算法,在一次成像过程中同时获取了鸡翅膀等软体模型的衰减、相衬与暗场图像,利用源光栅将大尺寸射线源切分为具有部分相干的线状射线源阵列,包含有一个相位光栅和一个吸收光栅的 Talbot 干涉仪测试到多重信息。

从 20 世纪 80 年代至今,图像融合在各领域内有着广泛的应用前景,引发了世界范围的研究热潮^[10]。无论是已经成熟的算法,还是各种相关应用领域等,都是针对不同传感器在不同方位或视角(或同一传感器在不同时间)拍摄的信息的融合,涉及到坐标变换、图像分割、拼接与配准等技术。与多传感器获得的多数据信息融合不同,本文由同一传感器一次性获得数据(包含了三种不同的信息),提取三种信息后进行多信息融合,得到更为优化的图像,最后在一张图片上获取高分辨率大动态范围信息的单图成像。

2 成像装置与工作原理

2.1 成像系统

图 1 显示了基于 Talbot-Lau 干涉法的 X 射线光栅成像方法^[11],这一系统使用了三块光栅:源光栅 G_0 、相位光栅 G_1 和吸收光栅 G_2 。 G_0 将光源分成了很多个自身相干但互相之间不相干的若干小的线光源阵列,且单个小光源对相位光栅具有部分相干性^[12]。根据 Talbot-Lau 效应,当 G_1 的周期满足

$$l_{\text{coh}} = L\lambda/S > p_1, \quad (1)$$

时,可产生 Talbot 自成像效应。其中 L 为光源与光栅 G_1 之间的距离, S 为照明光源直径, λ 为入射 X 射线波长, p_1 为光栅 G_1 的周期。

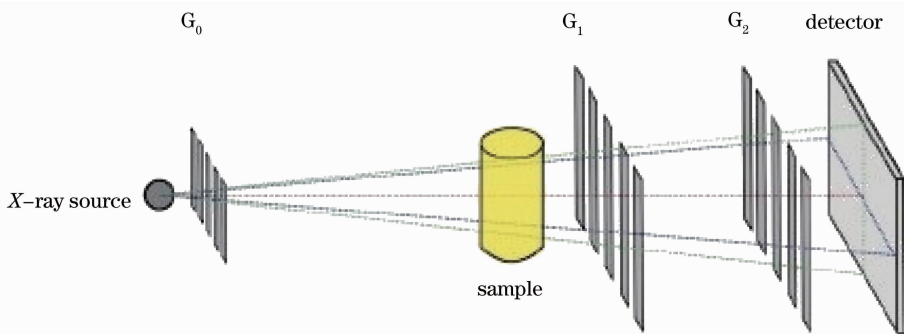


图 1 X 射线光栅成像系统

Fig. 1 X-ray grating imaging system

最大的干涉发生在距离 G_1 的分数阶泰勒距离处:

$$d_n = np_1^2/(8\lambda), \quad (2)$$

式中 n 为分数泰勒阶数。相位光栅 G_1 在各个线光源照射下各自产生的 Talbot 自成像互相错开一个周期叠加在一起,从而使得自成像的条纹对比度得到增强。当把吸收光栅 G_2 放置在 Talbot 距离上,则产生叠栅条纹现象。由被检测样本引起的衰减、折射和散射,明显地改变了干涉图像,衰减导致强度降低,折射造成了条纹的横向移动,散射降低了条纹的可见度。

2.2 多信息的获取

在此实验系统中,被测样品不断旋转用以实现计算机断层摄影术的扫描过程。在每个投影方向,通过采用相位步进法测量出探测器的每个像素单元的背景位移曲线和物体位移曲线,同时提取出衰减、相衬和暗场三种物理信息。相应地,可用余弦曲线近似表示为

$$I_s(k) \approx a_s + b_s \cos(k\Delta x + \phi_s), \quad (3)$$

$$I_b(k) \approx a_b + b_b \cos(k\Delta x + \phi_b), \quad (4)$$

式中 $I_s(k)$ 和 $I_b(k)$ 分别为物体位移曲线和背景位移曲线, k 为相位步进数的序号, Δx 为步长, 相位偏移 $\Delta\phi = (\Delta\phi_s - \Delta\phi_b)$ 。

由于样品的吸收效应对入射 X 射线强度的衰减不同而形成衰减成像信息, 可表示为

$$P = \int \mu(l) dl = -\ln \left[\frac{\sum_k I_s(k)}{\sum_k I_b(k)} \right], \quad (5)$$

式中 P 为衰减投影, μ 为线性衰减系数。

物质密度不同而引起的折射改变入射光线的相位信息而形成相衬图像信息, 可表示为

$$\Delta\varphi = \int \nabla \delta(l) dl = \frac{P_2 \Delta\phi}{2\pi D}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为折射光束的折射角, δ 为折射率, l 为光束路径, D 为两块吸收光栅的距离, P_2 为分析光栅的周期。

密度接近但有微小波动的密度不均匀性引起的样品小角散射导致条纹对比度降低, 样本的“暗场”图像信息, 可表示为

$$\sigma^2 = \int f_s(l) dl = -\frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{P_2}{D} \right)^2 \ln \left(\frac{V_s}{V_b} \right), \quad (7)$$

式中 f_s 为广义散射参数, l 为光束路径, D 为两块吸收光栅的距离, P_2 为分析光栅的周期, $V_s = \frac{b_s}{a_s}$ 为物体位移曲线对比度, $V_b = \frac{b_b}{a_b}$ 为背景位移曲线对比度。

线性衰减系数的信息, 通过常规的计算机断层扫描重建程序可以完美地重建线性衰减系数的分布。而基于折射的计算机断层扫描中, 有两种重建值: 分布的梯度折射率值和折射率值^[13]。前者表示为

$$\Delta\varphi \cos \alpha = \int \frac{\partial \delta(x, y)}{\partial x} dl, \quad \Delta\varphi \sin \alpha = \int \frac{\partial \delta(x, y)}{\partial y} dl, \quad (8)$$

式中 α 为投影角, $\frac{\partial \delta(x, y)}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial \delta(x, y)}{\partial y}$ 可以通过计算机断层扫描重建程序进行重建。后者可以通过平行术扫描、扇形术扫描、锥形束扫描等计算而得。根据文献[14]的结论, 广义散射参数的信息也可以通过计算机断层扫描重建程序进行重建。

3 图像融合

3.1 获取的信息特点

衰减信息是基于 X 射线对各物质的吸收系数不同所致, 得到的图像对比度依赖于物体与周围环境、物体中各部位之间对 X 射线吸收系数的差异, 即不同部位的吸收系数差别越大, 得到的图像质量越好。X 射线穿过物体后, 其振幅和相位都会发生变化, 而振幅的衰减很大部分与光电吸收所造成的 X 射线衰减相关。同时, 物质内部电子密度的变化, 即使是微弱的变化, 也能引起 X 射线的相位变化。

而相衬信息以探测 X 射线在穿透物体组织后因相位变化而产生的衬度。这种相位的变化主要与物体折射率的实部相关, 而衰减信息是由折射率的虚部决定的。物体对 X 射线的复折射率可表示为 $1 - \delta - i\beta$ ^[15], 在医学与材料学等领域, 由 C、N、H 等轻元素构成的物质对 X 射线相位项 δ 的改变量是吸收项 β 的 1000 倍以上^[16], 非常适合低密度、弱吸收物质的内部结构成像, 具有较高的图像分辨力。

对于暗场信息是一种新提出的小角散射信息, 与衰减信息和相衬信息相比有独特优势, X 射线小角散射

是由物体内部微米或者亚微米结构尺度上的不均匀性引起的散射,散射射线在一个很小的角度范围内分布,其图像细节信息更为丰富,提供了不同于衰减信息和相衬信息的新的图像信息。它的分辨能力在有些时候比衰减图像和相衬图像都要高。X射线小角散射能够反映物质在细微结构上的信息,常用于分析大分子或晶体结构,也可以进行物质的鉴别。X射线暗场成像对散射及弱吸收物质的成像具有很重要的意义,同时是对传统X射线衰减成像和相衬成像的有力补充^[17]。

本文针对以上三种信息的融合,融合后的图像已经不是简单地体现多信息,而是扩展三种信息在各自的单一图像中表现不出来的动态范围。吸收衰减图像能看骨头看不清肌肉,而相衬能看到肌肉组织看不清骨头;相衬能看到软组织却难以区分密度接近但组织结构不均匀的物质,而暗场则可以。融合后的图像理想情况下是在同一幅图像中既能看到骨头,也能看到结构均匀或不均匀的软组织如肌肉、肿瘤等。

3.2 基于小波变换的图像融合算法

Mallat 提出的小波变换快速分解与重构算法是利用两个一维滤波器实现对二维图像的快速小波分解,再利用两个一维重构滤波器实现图像的重构^[18]。设 H (高通)和 L (低通)为两个一维镜像滤波算子,其下标 i 和 r 分别对应于图像的行和列,Mallat 算法在尺度 $j-1$ 上的分解公式为

$$\begin{cases} C_j = L_r L_i C_{j-1} \\ D_j^1 = H_r L_i C_{j-1} \\ D_j^2 = L_r H_i C_{j-1} \\ D_j^3 = H_r H_i C_{j-1} \end{cases}, \quad (9)$$

式中 C_j 、 D_j^1 、 D_j^2 、 D_j^3 分别表示低频成分、垂直、水平和对角分量。相应的小波重构算法为

$$C_{j-1} = L_i^* L_r^* C_j + L_i^* L_r^* D_j^1 + H_i^* H_r^* D_j^2 + H_i^* H_r^* D_j^3. \quad (10)$$

式中 L^* 、 H^* 分别为 L 、 H 的共轭转置矩阵。

图像融合的方法很多,本文选用基于小波变换的图像融合方法。具体融合规则和融合算法为:

- 1) 对源图像 A 、 B 分别进行 N 层小波分解。
- 2) 融合图像 F 的低频部分,取源图像 A 、 B 分解后的加权平均,即

$$C_{N,F} = (C_{N,A} + C_{N,B})/2, \quad (11)$$

式中 $C_{N,F}$ 、 $C_{N,A}$ 、 $C_{N,B}$ 分别表示融合图像和源图像在小波分解尺度 N 上的低频分量。

- 3) 在高频分解层上,取源图像三个方向高频分量绝对值大的小波系数作为融合图像 F 小波系数,即

$$\begin{cases} D_{N,F}^l = D_{N,A}^l, & \text{if } |D_{N,A}^l| \geq |D_{N,B}^l| \\ D_{N,F}^l = D_{N,B}^l, & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

式中 $D_{N,F}^l$ 、 $D_{N,A}^l$ 和 $D_{N,B}^l$ 分别为融合图像和源图像在小波分解尺度 N 上 l 方向上的小波系数。

- 4) 在中间分解层上,在当前处理像素的局部区域,取均值方差最大的源图像的小波系数作为融合图像 F 对应的小波系数,即

$$\begin{cases} D_{j,F}^l = D_{j,A}^l, & \text{if } R_{\text{MSE}_A} \geq R_{\text{MSE}_B} \\ D_{j,F}^l = D_{j,B}^l, & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

式中分解尺度取 $1 \sim N-1$; R_{MSE_A} 、 R_{MSE_B} 为源图像在分解尺度上对应局部区域的方差。

- 5) 确定融合图像的各小波系数后,对融合的小波金字塔进行二维离散小波逆变换,即图像重构,所得的重构图像即为融合图像 F 。

3.3 仿真实验与结果分析

为了验证基于小波变换的图像融合效果,利用生物样品做了实验。图 2 为鸡翅膀的光栅成像结果。实验采用周期为 $110 \mu\text{m}$ 的源光栅,周期为 $10 \mu\text{m}$ 的第一吸收光栅和周期为 $11 \mu\text{m}$ 的第二吸收光栅。X射线能量取 $30 \text{ kV}/10 \text{ mA}$,光源尺寸为 $600 \mu\text{m}$,探测器大小为 $36 \mu\text{m}$,其探测区域大小为 $105 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$,源光栅和第二吸收光栅的距离为 1.5 m 。通过使用 11 步的相位步进法获取衰减、相衬、暗场三种信息。图 2(a)为衰减成像,从图中可以看出,衰减图像比较模糊,其图像、衬度分辨率都较低,致使皮毛等软组织细节无法看清楚,这是由于在传统的 X 射线成像中,X 射线穿过样品后,方向发生偏离的折射、散射光混杂在

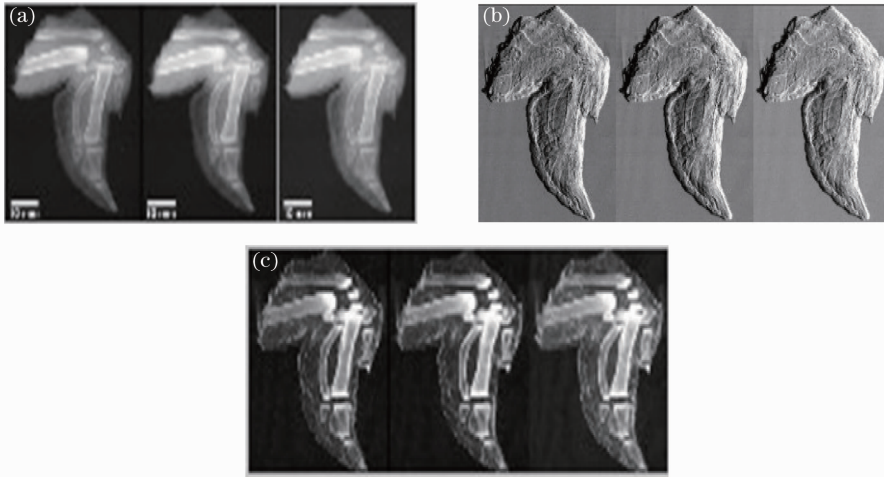


图 2 鸡翅的光栅成像结果。(a)衰减像；(b)相衬像；(c)暗场像

Fig. 2 Chicken wings of the X-ray grating imaging. (a) Attenuation; (b) refraction; (c) dark-field

透射光中参与成像而引起像斑模糊,从而导致图像、衬度分辨率降低。图 2(b)为折射成像,可以清楚地看到更多鸡翅的结构信息,特别是上面的纹理也能清楚观察到。图 2(c)为暗场成像,可以清楚看到密度接近,但组织结构不均匀的物质、纹理和骨骼都能清晰识别。从上述可知,传统的 X 射线成像只能获得鸡翅的钙化组织信息,而利用 X 射线光栅成像方法,可以同时获得更加清晰的鸡翅钙化组织以及软组织信息。

图 3 为鸡翅的衰减信息和暗场信息的融合结果,可以看出,它既反映出样品的衰减特性,同时又反映出样品的小角散射信息。图 4 是鸡翅中的折射信息和小角散射信息的融合结果,它综合了样品折射和小角散射的特点。

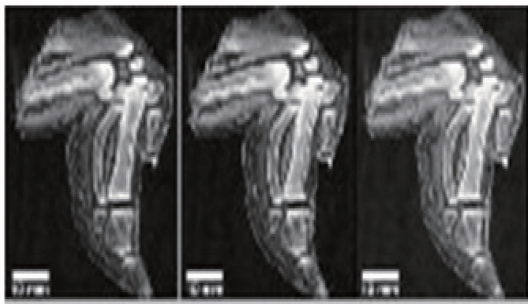


图 3 衰减和暗场信息融合

Fig. 3 Attenuation and dark-field information fusion

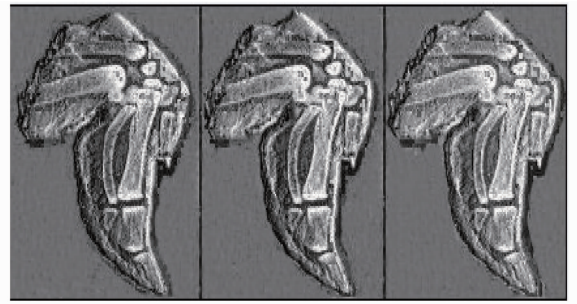


图 4 相衬和暗场信息融合

Fig. 4 refraction and dark-field information fusion

4 结 论

X 射线光栅成像技术从一开始就是以利用传统 X 光源对弱吸收物质的相衬成像为目的,近期众多学者的研究更多地集中在系统的改进与检测对象的验证等方面,检测对象更多地集中在生物医学与材料学领域,但忽略了其同时获取的衰减信息对重元素的检测,而且对衰减、相衬与暗场三种信息之间的互相影响与相关特性缺乏更深入的剖析。

区别于传统意义上的多传感器信息融合技术,对单一传感器在完全相同的时空与设备环境下获取的统一数据不同成分做更深入的挖掘性研究。无论是从行业领域的角度,还是便于研究人员分析、存储等的角度,能在一张图片上获取高分辨率大动态范围信息的单图成像技术,本身就具有很重要的实际意义。本文可实现对诸如芯片金属引脚与半导体衬底结构、牙齿和牙龈甚至假牙与镶牙合金材料、骨骼与肌肉甚至包含手术钢针等的大动态范围图像显示,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhentian. Research on Grating-Based Imaging Method and Technique with Conventional X-Ray Tube [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. 4
王振天. 常规 X 光源光栅成像相关方法和技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. 4
- 2 D. Chapman, E. Pisano, W. Thomlinson *et al.*. Medical applications of diffraction enhanced imaging[J]. *Breast Disease*, 1998, **10**(3-4): 197~207
- 3 A. Momose. Demonstration of phase-contrast X-ray computed tomography using an X-ray interferometer [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1995, **352**(3): 622~628
- 4 Li Jing, Liu Wenjie, Zhu Peiping *et al.*. Reconstruction algorithm of fan-beam helical X-ray computer tomography based on grating imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 421~427
李 镜, 刘文杰, 朱佩平等. 基于光栅相衬成像的扇束螺旋 CT 重建算法[J]. 光学学报, 2010, **30**(2): 421~427
- 5 T. Weitkamp, A. Diaz, C. David *et al.*. X-ray phase imaging with a grating interferometer [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6296~6304
- 6 F. Pfeiffer, M. Bech, O. Bunk *et al.*. Hard-X-ray dark-field imaging using a grating interferometer [J]. *Nat. Mater.*, 2008, **7**(2): 134~137
- 7 Y. Takeda, W. Yashiro, Y. Suzuki *et al.*. X-ray phase imaging with single phase grating [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(3): L89~L91
- 8 Z. F. Huang, K. J. Kang, L. Zhang *et al.*. Alternative method for differential phase-contrast imaging with weakly coherent hard X-rays [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **79**(1): 013815
- 9 F. Pfeiffer, T. Weitkamp, O. Bunk *et al.*. Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources [J]. *Nat. Phys.*, 2006, **2**(4): 258~261
- 10 Xia Mingge, He You, Ou Yangwen. Pixel level image fusion methods and fusion performance evaluation [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2002, **17**(4): 224~229
夏明革, 何 友, 欧阳文. 像素级图像融合方法与融合效果评价[J]. 遥感技术与应用, 2002, **17**(4): 224~229
- 11 Zhili Wang, Kun Gao, Peiping Zhu *et al.*. Grating-based X-ray phase contrast imaging using polychromatic laboratory sources [J]. *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2011, **184**(3-6): 342~345
- 12 Liu Xin, Guo Jinchuan, Niu Hanben. New method of detecting interferogram in differential phase-contrast imaging system based on special structured X-ray scintillator screen[J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(7): 070101
- 13 Jin Feifei, Zhu Xiaoli, Li Hailiang *et al.*. Study on properties of 2000 lp/mm X-ray transmission varied line-space gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1857~1860
靳飞飞, 朱效立, 李海亮等. 2000 lp/mm X 射线透射变栅距光栅的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1857~1860
- 14 M. Ando, H. Bando, Z. Chen *et al.*. 2D and 3D refraction based X-ray imaging suitable for clinical and pathological diagnosis [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, **879**(1): 1899~1902
- 15 A. Momose. Recent advances in X-ray phase imaging [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(9A): 6355
- 16 Huang Jianheng, Lin Danying, Liu Zhenwei *et al.*. Analysis and simulation of mid-energy X-ray grating phase contrast microscopy imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1034001
黄建衡, 林丹樱, 刘振伟等. 中能 X 射线光栅相衬显微成像分析及模拟[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1034001
- 17 Chen Xin, Sun Yi, Zhu Peiping. Reconstruction algorithm of cone-beam phase X-ray computer-tomography based on grating imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1079~1084
陈 欣, 孙 怡, 朱佩平. 光栅成像的锥束相位 CT 重建算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1079~1084
- 18 Cui Yanmei, Ni Guoqiang. One multiscale and multioperator image fusion algorithm based on wavelet transform [J]. *Optical Technique*, 1994, (4): 37~39
崔岩梅, 倪国强, 王 毅等. 一种基于小波变换的多尺度多算子图像融合方法[J]. 光学技术, 1999, (4): 37~39