

# 基于毛细管分光的同步辐射 X 射线立体成像

王飞翔<sup>1,2</sup> 邓彪<sup>1\*</sup> 王玉丹<sup>1</sup> 任玉琦<sup>1</sup> 孙天希<sup>3</sup> 肖体乔<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

<sup>3</sup>北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875

**摘要** 建立了一种基于同步辐射 X 射线的立体成像系统用于上海光源成像线站(BL13W)。该系统使用两个弯曲毛细管将同步辐射光引出并分为交叉的两束光, 实验样品置于两束 X 射线交叉的位置, 在其后一定距离处用成像探测器记录样品的两个投影。根据视差方程和相应算法计算出样品各组分的深度信息, 得到样品的伪三维图像。与 X 射线计算机断层扫描技术相比, 该方法成像的时间分辨率大大提升甚至接近单次曝光的时间, 可以进行实时成像, 并降低了样品受辐射的剂量。选用老鼠肝脏毛细血管的投影图像进行数值模拟, 得到了理想的模拟效果。选取螺旋形金属丝在搭建的实验平台上进行立体成像, 得到了初步的实验结果。螺旋形金属丝的立体信息可以清楚辨认。

**关键词** X 射线光学; 同步辐射; X 射线立体成像; 立体匹配; 毛细管

**中图分类号** O434.19 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0834004

## Synchrotron Radiation X-Ray Stereo Imaging Based on Capillary Beam Splitting

Wang Feixiang<sup>1,2</sup> Deng Biao<sup>1</sup> Wang Yudan<sup>1</sup> Ren Yuqi<sup>1</sup> Sun Tianxi<sup>3</sup> Xiao Tiqiao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract** A stereo imaging system based on synchrotron radiation X-rays is built in the BL13W beam line of the Shanghai Synchrotron Radiation Facility. The system uses two bending capillary tubes to extract synchrotron radiation photons and divides them into two intersected beams. The experimental sample is placed at the intersection of two X-ray beams and two projections of the sample are recorded simultaneously by a detector placed close to the sample. The depth information of each element of the sample is calculated by parallax equations and relevant algorithms, and the pseudo three-dimensional image of the sample is produced. Compared with X-ray computed tomography, the proposed method improves the time resolution notably, which is even close to the duration of a single exposure. It can be used for real-time imaging and reduce the radiation dose of the sample. A numerical simulation is performed with the projection of blood capillary in the mouse liver and achieves an ideal result. A spiral wire model is then taken as a sample to conduct stereo imaging in the experimental platform. The preliminary experimental result demonstrates that the stereo information of the spiral wire can be recognized clearly.

**Key words** X-ray optics; synchrotron radiation; X-ray stereo imaging; stereo matching; capillary

**OCIS codes** 340.7440; 340.6720; 110.7440; 110.6880; 100.3010

**收稿日期:** 2016-03-09; **收到修改稿日期:** 2016-04-06

**基金项目:** CAS-CSIRO 国际合作项目(GJHZ1303)、国家自然科学基金(U1532118, 81430087, 11405260, 11475248, 11275257, U1232205)

**作者简介:** 王飞翔(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事 X 射线成像光学等方面的研究。E-mail: wangfeixiang@sinap.ac.cn

**导师简介:** 肖体乔(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事成像光学和 X 射线光学等方面的研究。

E-mail: xiaotiqiao@sinap.ac.cn

\* **通信联系人.** E-mail: dengbiao@sinap.ac.cn

## 1 引言

近年来,各种同步辐射 X 射线成像技术层出不穷,并且在生物学、医药学、材料学等学科领域取得了广泛的应用<sup>[1]</sup>。基于同步辐射的 X 射线成像技术按所得影像空间信息方面的差异可分为三维 X 射线计算机断层扫描(CT)技术和二维 X 射线照相术。X 射线 CT 技术由样品在  $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$  范围内的大量投影图重构得到,结合吸收衬度或相位衬度成像技术可以实现样品三维信息的精确重构<sup>[2]</sup>,但是由于需要对样品进行大量的投影,难以开展对时间分辨率要求较高的实时观测实验,辐射剂量也相对较大,有一定的局限性。二维 X 射线照相术可以进行实时成像,但成像结果是样品各深度组分的重叠投影,无法区分投影的深度信息,也无法准确观测样品的内部结构。

在可见光中,双目立体视觉技术近年来得到了很大的发展。该技术基于视差原理,由双摄像机从不同角度同时获取同一物体的两幅数字图像,从而恢复出物体三维几何信息<sup>[3-4]</sup>。随着近 20 多年来的迅速发展,双目立体视觉技术已经逐渐完善并应用于机器人视觉导航、航空测绘、医学成像和工业检测等诸多领域<sup>[5-6]</sup>。但 X 射线立体成像和可见光立体视觉还有一定的差异<sup>[7]</sup>。一方面,同步辐射 X 射线投影图像是物体的透射图,各深度图像重叠在一起,而可见光立体视觉技术中摄像机拍摄到的只是物体表面的影像。因此,同步辐射立体成像的图像匹配和三维还原更为复杂。另一方面,同步辐射光为平行光,CCD 探测器得到的图像是样品的平行投影,因此其图像获取和摄像机标定步骤较为简单。此外,由于 CCD 探测器得到的图像是物体的平行投影,同一物点在左右两幅投影图像中应有相同的纵坐标,因此相应的图像匹配算法存在差别。

本文提出了一种可以实时获取三维信息的立体成像技术。搭建了一套立体成像系统,可以同时对接样品进行两个不同角度的投影。选取螺旋形金属丝进行实验,并得到了初步的实验结果。与 CT 技术相比,该方法只能得到某一视角下的三维信息,但是不需要对物体进行  $180^{\circ}$  扫描,减少了成像时间,降低了成像复杂度,使成像的时间分辨率大大提高甚至接近单次曝光的时间,可以进行实时成像,减少了样品受辐射的剂量,有着广阔的应用前景。

## 2 数值模拟

人类的视觉本质上是三维的。因为两只眼睛之间存在间距(瞳距),所以左右两眼在观看具有一定距离的同一物体时,获得的图像略有差异。大脑综合了左右眼所获得的图像信息,利用视差原理感知到场景的深度,产生了立体感,这就是双目立体视觉的基本原理,即通过两幅有差异的二维图像得到三维画面。因此,立体成像系统的核心是两幅不同角度下的二维图像的获取。

### 2.1 二维投影图像的产生

得到了不同角度下的二维投影后,即可通过两幅略有差异的二维图像结合视差原理得到三维立体图像。不同角度二维投影图像的获取主要有两种方法。一种方法是只用一束光,获取样品投影图像后,将样品旋转一定角度再获取第二张图像<sup>[8]</sup>。另一种方法是用两束方向不同的交叉光束对物体进行投影成像,光路图如图 1 所示。第一种方法得到两幅不同角度的投影图像所耗费的时间比第二种方法长,这不利于对样品进行实时观察,因此实验系统采用第二种方法来获取两幅不同角度下样品的二维投影图像。由于数值模拟对二

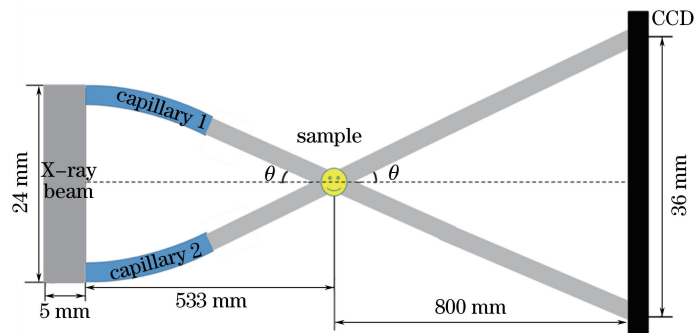


图 1 立体成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of X-ray stereo imaging system

维投影图像的质量有很高的要求,因此数值模拟时采用第一种方法获取两幅不同角度下样品的二维投影图像。

考虑到 X 射线立体成像方法主要应用于活体生物样品成像,且血管组织具有一定的空间立体分布,所以采用的模拟样品为一段用 X 射线 CT 拍摄得到的老鼠肝脏末端毛细血管图像,如图 2(a)所示。在 Matlab 中对其进行不同角度的投影操作,便得到许多不同角度下此样品的二维投影图像。图 2(b)为两幅角度相差  $4^\circ$  的投影图像。

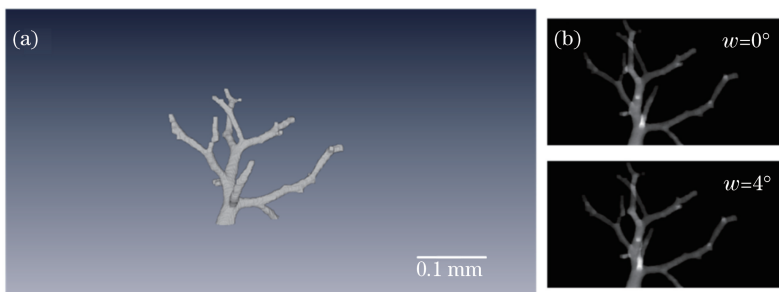


图 2 模拟样品。(a)三维图像;(b)不同方向的投影图像

Fig. 2 Simulation sample. (a) Three-dimensional image of the sample; (b) projected images in different directions

## 2.2 视差原理和样品立体信息的还原

利用视差原理恢复样品的深度信息是立体成像研究的最基本目标,为实现这一目标,一个完整的立体成像图像处理过程需要包含图像获取、探测器标定、特征提取、立体匹配和三维重建 5 个步骤<sup>[3]</sup>。

1) 图像获取。常用的立体成像图像至少应为双目图像,或者采用多目图像。

2) 探测器标定。在两幅投影图像中与同一物点对应的像点之间的位置差异即称为视差,视差由探测器的方向、位置和参数以及图像点对自身的位置决定。探测器标定的目的是在已经建立的成像模型中,建立三维场景中目标点的计算机图像(像素)坐标与其对应的世界空间坐标之间的映射关系。同步辐射光为平行光,CCD 探测器得到的图像是物体的平行投影,因此图像获取和摄像机标定步骤较为简单。在数值模拟中,样品投影的旋转轴即为投影图像的中心竖线。

3) 特征提取。特征提取的目的是获取用于图像匹配的图像特征,特征可以是像素或者是像素的集合,也可以是它们的抽象表达,如点特征、边缘特征和区域特征等。

4) 图像匹配。图像匹配是通过一定的标准来计算从左右图像提取的特征之间的对应关系,其目的是找出同一个空间点在左右图像上对应的投影点对,然后求出它们的视差。

5) 三维重建。利用视差通过公式结合适当的算法对被测样品进行三维信息(深度)的恢复。三维重建的公式推导过程如下。

如图 3(a)所示,若两幅投影图像是通过旋转样品拍摄得到的,将其放在同一坐标系中分析即可得到样品立体信息与视差的关系<sup>[9]</sup>。假定样品两幅投影图像是在  $0^\circ$  和  $\theta$  角度下得到的, $\theta$  为两束 X 射线的交叉角

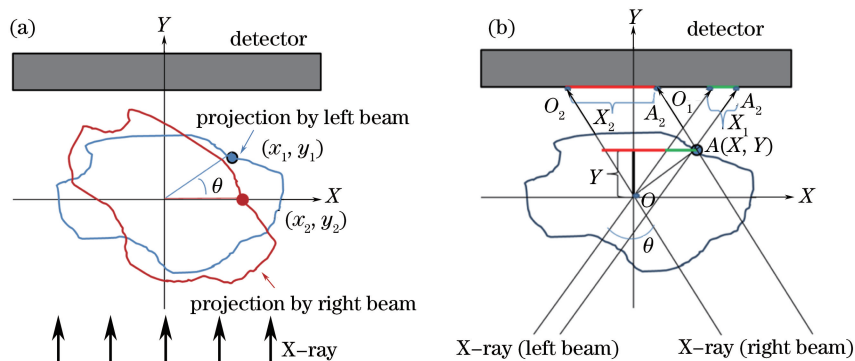


图 3 从两幅投影中得到样品立体信息的原理图。(a)两幅投影图通过旋转样品得到;(b)两幅投影图由交叉 X 射线得到

Fig. 3 Schematic for obtaining the depth information of a sample from two projection images.

(a) Two projection images are obtained by rotating a sample; (b) two projection images are obtained by intersected X-rays

度,坐标系原点设在样品的几何中心, $Z$ 轴垂直于 $XY$ 平面且为样品的旋转轴,样品某一点在两幅投影中的坐标 $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$ 间的关系为

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

由于平行投影关系,其 $Z$ 坐标相同。如果该点在两幅投影图像中对应的横坐标 $x_1, x_2$ (对应视差)已知,则该点纵坐标 $y_1$ (即深度信息)的计算公式为

$$y_1 = \frac{x_2 - x_1 \cos \theta}{\sin \theta} \quad (2)$$

样品中该点的三维坐标 $(x_1, y_1, z_1)$ 都已知,立体信息便可顺利重建。若利用图1所示立体成像系统得到的两幅投影图像进行三维重建,则视差关系如图3(b)所示, $O$ 为样品几何中心, $O_1, O_2$ 分别为对应的投影中心。(2)式应改写为

$$y = \frac{x_2 - x_1}{2 \tan(\theta/2)} \quad (3)$$

立体匹配是X射线立体成像研究中的关键问题。对于可见光双目视觉立体匹配算法,已开展大量的工作对其进行不断的完善<sup>[10-11]</sup>。基于如上几何关系,编写了一种基于灰度值相似点匹配的图像匹配和三维还原算法的Matlab程序,可以实现对两幅投影图像较为迅速的立体处理。算法的处理步骤简述如下。首先在两幅投影中,按纵轴逐次取出每一层图像的灰度值数据,对比数据,寻找灰度值变化的极值处将其作为特征点。将特征点在两幅图像中对应的投影点相匹配,其他点则分段进行验证匹配,再根据坐标差值计算出深度信息。如此对所有层进行计算,然后将每一层的数据输出为一个切片。三维重建软件为Amira 4.1。Amira是一款三维可视化及建模软件,能实现各领域科学数据的可视化,同时也是一套面向对象的模块化系统,模块和数据对象是其基本系统组件,在生物医学、材料科学、地球物理及工程等方面得到了广泛应用。将数据导入Amira即可得到样品的立体图像。

### 2.3 模拟结果

两束X射线间的夹角 $\theta$ 对图像特征点的提取和特征点的匹配有很大的影响,这是因为X射线投影图像是物体的透射图像,各深度图像重叠在一起,而且在不同的角度下会有不同的重叠,进行特征点提取和图像匹配时存在相当大的困难。两X射线间角度越小,重叠的变化差异越小,图像匹配越简单;但是两X射线间角度越小,投影图的差异也越小,视差越不明显,还原的三维效果越差。同理,样品越简单,图像越稀疏,越好还原。

首先模拟不同角度差的两幅投影图三维重建后的效果。模拟的样品为一段用X射线CT拍摄得到的老鼠肝脏末端毛细血管图像,如图2(a)所示。图4(a)依次为该样品旋转 $0^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ$ 时的投影图,图4(b)依次为 $0^\circ$ 投影图分别和 $2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ$ 投影图组合时三维重建后的效果。对比可知,两投影图间角度差越小,还原的信息越多。这是因为两X射线间角度越小,样品重叠的变化差异以及两投影图的差异越小,图

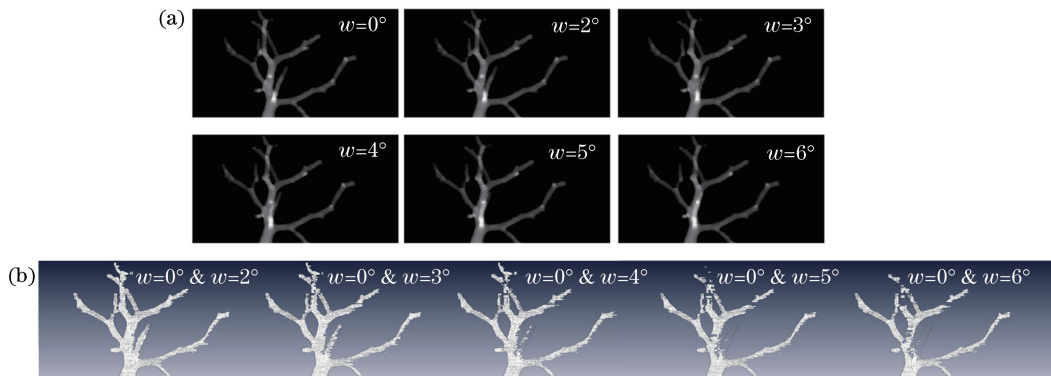


图4 样品投影图及其三维重建。(a)不同角度下样品的投影图;(b)不同组合下三维重建效果图

Fig. 4 Projection images and 3D renderings of the sample. (a) Projection images of the sample with different angles; (b) 3D renderings of the sample under different combinations

像匹配越简单,漏匹配的点也越少,样品越容易还原。但是两 X 射线间角度越小,其投影图的差异越小,视差就越小,还原的三维效果不明显。相反地,两投影图间角度差越大,视差就越大,还原后虽然漏匹配的点多,还原的信息少,但还原的深度信息准确,有清晰的深度关系。从模拟的效果图上可以看到两 X 射线间角度在  $4^\circ$  以上时,三维还原的信息缺失比较多,因此在立体成像系统中,交叉的两束 X 射线间角度设为  $4^\circ$ 。

基于以上分析,综合大、小角度差的三维还原效果,可以得到更多的信息,因此设计了一种能改进成像效果的立体成像方案。该方案在原有方案的基础上,在两束 X 射线之间再加一束 X 射线,可同时得到三幅不同角度的样品投影。相邻 X 射线间的角度为  $2^\circ$ ,如图 5 所示。

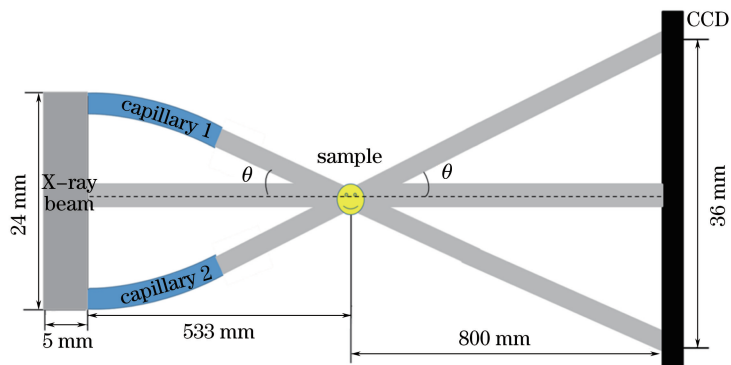


图 5 改进方案装置图

Fig. 5 Schematic of the improved X-ray stereo imaging system

对 Matlab 程序进行相应的修改。使用图 4(a)中样品旋转  $0^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $4^\circ$  时的三幅投影图像进行三维还原。首先用相差  $4^\circ$  的两幅投影图像进行三维还原,在损失一定信息的条件下保证了正确的深度信息,再利用  $0^\circ$ 、 $2^\circ$  组合和  $2^\circ$ 、 $4^\circ$  组合间的投影图像将漏匹配的信息点补上,获得了质量更高的立体图像。模拟结果如图 6 所示,图 6(a)为两幅投影图像还原得到的立体图像,图 6(b)为三幅投影图像还原得到的立体图像。对比可知改进后的图像质量有明显的提升。

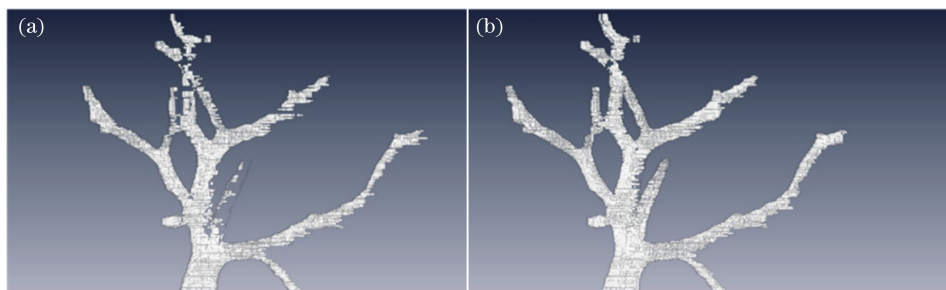


图 6 (a)两幅投影图像和(b)三幅投影图像三维还原的立体图像

Fig. 6 3D renderings of the sample using (a) two projections and (b) three projections

### 3 实验装置

图 7 为在上海光源 BL13W 线站上搭建的立体成像实验平台,实验所用毛细管的口径形状为正六边形,平行的两面间隔为 5 mm,全反射材料为硼硅玻璃纤维。各实验参数如图 1 所示,其中  $\theta$  为  $2^\circ$ ,即两束 X 射线的夹角为  $4^\circ$ 。

### 4 实验结果

利用如上实验装置,使用螺旋形金属丝作为实验样品进行立体成像实验,得到了初步的成像结果。图 8 (a)为拍摄的两幅不同角度的样品投影图,两幅投影角度差为  $4^\circ$ 。可以看出,位于光斑中心的图像质量优于光斑边缘部分的图像质量。这是因为边缘部分的毛细管长度和曲率比中心位置大,使出射光斑呈高斯分布,

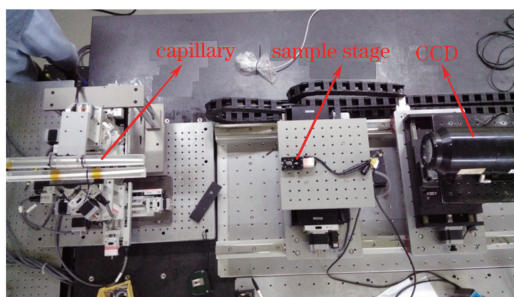


图 7 立体成像实验装置

Fig. 7 Experimental setup for X-ray stereo imaging system

光斑中心的增益系数及传输效率优于光斑边缘。实验中,随着毛细管与 CCD 之间距离的增加,所得图像的对比度逐渐下降<sup>[12-13]</sup>。另一方面由于毛细管较长,精确调节难度较大,导致出射光束质量不理想,也会影响成像质量。图 8(b)为图 8(a)中切割出来的样品部分。图 8(c)为利用图 8(b)中投影图像还原得到的立体图像。从图中可以看出样品的螺旋缠绕关系,得到了明确的样品立体信息,这在 X 射线投影图中是不能直接得到的。说明了立体成像装置和三维重建算法的有效性。立体成像技术在不透明的简单样品中有广泛的应用,可以对此类样品进行形态学观测和动力学研究。

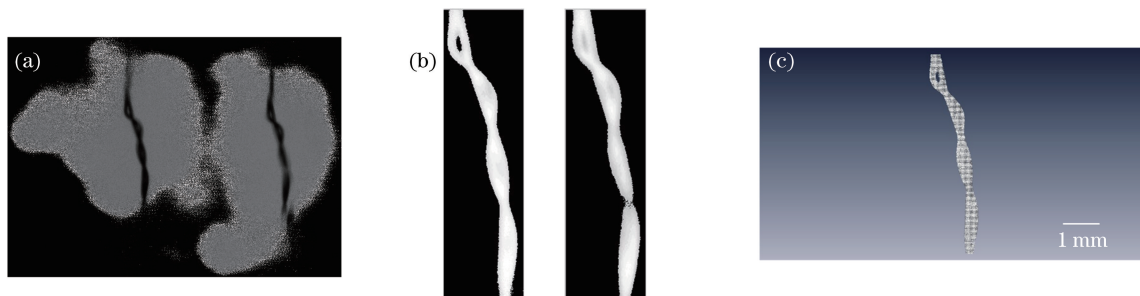


图 8 实验结果。(a)拍摄到的样品投影图;(b)图 8(a)中切割出来的样品部分;  
(c)利用图 8(b)中投影图像还原得到的立体图像

Fig. 8 Experimental results. (a) Captured projections of the sample; (b) sample parts from Fig. 8(a);  
(c) 3D rendering of the sample reconstructed with the projections in Fig. 8(b)

## 5 结 论

提出了一种新的成像方法——X 射线立体成像。在上海光源 BL13W 线站建立了一套基于毛细管分光的同时步辐射 X 射线立体成像系统。该系统使用两个毛细管将同步辐射光引出并分为两束交叉的射线,采用 CCD 探测器记录样品的两个投影。毛细管方案简单易行,光斑质量满足成像要求。推导得出由单个 CCD 探测器记录的两幅投影还原样品深度信息的计算公式,并编写了一套立体信息的还原算法程序。该方案经数值模拟和实验验证均得到了良好的成像结果。此外,还模拟了一种基于三束 X 射线的立体成像方法,与两束射线系统相比,该方法能够得到更多的深度信息。

X 射线立体成像与其他 X 射线成像方法相比具有特有的优势和适用范围。其成像的时间分辨率大大提升,可以进行实时成像,并降低了样品受辐射的剂量,可作为上海光源 BL13W 线站的另一个备选成像方法。该方法在样品内部显微结构的原位、无损研究中有广泛的应用,可以对样品进行形态学观测和动力学研究。实验中由于毛细管的固有属性,且毛细管较长,精确调节难度较大,导致出射光束质量不理想,影响了成像质量。下一步工作会完善升级立体成像装置,使其得到的图像质量更高,并寻找合适的动态样品进行实时动态观测。还将在原有装置的基础上安装第三路光束,可同时获得样品不同角度下的三幅投影图像,实现用三幅投影图还原出具有更高质量的立体图像。

## 参 考 文 献

- 1 Xiao Tiqiao, Xie Honglan, Deng Biao, *et al.* Progresses of X-ray imaging methodology and its applications at Shanghai Synchrotron Radiation Facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0100001.  
肖体乔, 谢红兰, 邓彪, 等. 上海光源 X 射线成像及其应用研究进展[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0100001.
- 2 Ye Linlin, Xue Yanling, Tan Hai, *et al.* X-ray phase contrast micro-tomography and its application in quantitative 3D imaging study of wild ginseng characteristic microstructures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1234002.  
叶琳琳, 薛艳玲, 谭海, 等. X 射线相衬显微层析及其在野山参特征结构的定量三维成像研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1234002.
- 3 隋婧, 金伟其. 双目立体视觉技术的实现及其进展[J]. *电子技术应用*, 2004(10): 4-6.
- 4 Feng Xiaofeng, Pan Difu. Study of single camera stereo vision sensor based on plane mirror imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0915002.  
冯晓锋, 潘迪夫. 基于平面镜成像的单摄像机立体视觉传感器研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0915002.
- 5 Zhu Zunshang, Yuan Yun, Li You, *et al.* High precision matching and 3D surface reconstruction of Chang'E 1 lunar images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0211002.  
朱遵尚, 苑云, 李由, 等. 嫦娥一号月面成像的高精度匹配及月貌三维重建[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0211002.
- 6 Zhang Qishen, Zhou Ya, Hu Xiaoming, *et al.* Hand vein recognition based on three dimensional point clouds matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0115005.  
张祺深, 周雅, 胡晓明, 等. 基于三维点云匹配的手掌静脉识别[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0115005.
- 7 Fu Liqin, Han Yan. Study on stereo matching technique for digital radiography images[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(12): 2363-2367.  
付丽琴, 韩焱. 射线图像的立体匹配技术研究[J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(12): 2363-2367.
- 8 Xiao Yongshun, Chen Zhiqiang, Zhang Li, *et al.* Method of multiple view stereoscopic radiography[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2003, 14(10): 1078-1080.  
肖永顺, 陈志强, 张丽, 等. X 射线多视角立体成像方法的研究[J]. *光电子 • 激光*, 2003, 14(10): 1078-1080.
- 9 Hoshino M, Uesugi K, Pearson J, *et al.* Development of an X-ray real-time stereo imaging technique using synchrotron radiation[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2011, 18(4): 569-574.
- 10 Di Hongwei, Chai Ying, Li Kui. A fast binocular vision stereo matching algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2180-2184.  
狄红卫, 柴颖, 李逵. 一种快速双目视觉立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2180-2184.
- 11 Zhu Shiping, Li Zheng. A stereo matching algorithm using improved gradient and adaptive window[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0110003.  
祝世平, 李政. 基于改进梯度和自适应窗口的立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0110003.
- 12 Sun X P, Liu Z G, Sun T X, *et al.* Application of polycapillary X ray lens to eliminate both the effect of X ray source size and scatter of the sample in laboratory tomography[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(9): 093401.
- 13 Peng Shiqi, Liu Zhiguo, Sun Tianxi, *et al.* Numerical simulation of polycapillary X-ray lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0234001.  
彭诗琪, 刘志国, 孙天希, 等. 基于多毛细管 X 光透镜的数值模拟[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0234001.