

文章编号:1001-5078(2014)12-1360-04

· 全息技术 ·

# 基于 LC-SLM 的 CT 图像全息三维重构与实时显示

杨上供,甘亮勤,熊飞兵

(厦门理工学院 光电技术福建省高校重点实验室,福建 厦门 361024)

**摘要:**提出了一种将计算全息技术与液晶空间光调制器相结合的 CT 图像三维重构与实时显示的方法。用计算全息技术对一系列 CT 图片进行三维信息融合,并根据 CT 图片数目的不同,制作了不同的计算全息图,基于 CT 图片本身是数字化二维图像的特点,采用了快速傅里叶变换算法。用液晶空间光调制器作为全息图显示载体,设计了 CT 图像三维实时显示系统,利用计算机控制实时输出不同的计算全息图到空间光调制器,通过光学再现获得不断变化的三维再现像,实现 CT 图像的三维实时显示。

**关键词:**全息;CT;空间光调制器;三维;实时

**中图分类号:**TB877 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.12.014

## Three-dimension reconstruction and real-time display of CT images using holography based on LC-SLM

YANG Shang-gong, GAN Liang-qin, XIONG Fei-bing

(University Key Laboratory of Optoelectronic Technology of Fujian Province, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

**Abstract:** Combining computer-generated holography with liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM), a new method for three-dimension reconstruction and real-time display of CT images is proposed. The two-dimension informations of a series of CT images are transformed into three-dimension informations, and a series of different computer-generated holograms which are connected with the number of CT images are obtained by computer. In the process, Fast-Fourier-transform algorithm is used to speed up the calculation by taking full advantage of the characteristic that CT images are digital two-dimension images. The three-dimension digital real-time display system of CT images is set up, in which the traditional holographic plate is replaced by LC-SLM. Controlled by computer, holograms are sent to LC-SLM in sequence, the three-dimensional reconstructed images that change with the holograms are observed, and the real-time display of three-dimensional CT images is realized.

**Key words:** holography; CT; LC-SLM; three-dimensional display; real-time

### 1 引言

CT(computer tomography)图片是通过计算机断层扫描成像得到的一组二维断层图片<sup>[1-4]</sup>,医生借助这些二维图片对病变情况进行分析。但是,由于CT图片只提供断层平面的二维信息,如要准确确定病变体的大小、形状、位置以及与周围组织的空间关系,还需借助医生的专业知识、空间想象力和主观经验,对于较复杂的组织结构,即使是经验丰富的医生,这也不是一件十分容易的事。因此利用这些断层图片所提供的二维信息重构出人体组织器官的三维图像在医学诊疗上具有重大的意义。目前的计算

机断层扫描摄影(CT)虽说也可通过计算机软件合成三维图像<sup>[2-4]</sup>,但实质上得到的并不是真正的三维图像,而是三维图像在二维平面上的投影。全息图能同时记录物体的强度信息与相位信息,在一定条件下再现可以获得真正的三维再现像<sup>[5-9]</sup>,是当前最理想的真三维显示技术,因此,用全息技术对CT图像进行三维重构与显示是一种可行的方法。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11104234)资助。

作者简介:杨上供(1977-),男,硕士研究生,实验师,主要从事计算全息与三维立体显示技术的研究。E-mail: wzyzg@126.com

收稿日期:2014-05-04;修订日期:2014-06-19

现有的关于这方面的研究多采用光学全息方法<sup>[10-11]</sup>,技术复杂、过程繁琐、效果不甚理想,且无法实现实时再现。与光学全息相比较,计算全息具有灵活、方便的特点,全息图可以数字化存储、传输和复制。此外,随着电子显示技术的发展,高分辨率的液晶空间光调制器(LC-SLM)已经开始商用化,并在光学显示领域得到了广泛的应用,为计算全息图的光电实时再现提供了技术基础<sup>[12-14]</sup>。因此,提出了基于液晶空间光调制器的 CT 图像计算全息三维重构与实时显示,用计算全息的方法对 CT 图像进行三维重构,通过计算机控制的液晶空间光调制器实现三维实时再现。

## 2 CT 图片计算全息三维重构原理

CT 图像本身是二维灰度图像,其灰度分布可视为 CT 图片透射光场的振幅分布。将  $n$  幅 CT 图片按一定间隔垂直于  $z$  轴排列(如图 1 所示),设第  $i$  幅 CT 图片的透射光场为  $u_{io}(x_o, y_o)$ ,到全息记录平面  $H$  的距离为  $z_i$ ,则经菲涅耳衍射到达  $H$  的复振幅为:

$$\begin{aligned} u_i(x, y) &= \frac{1}{j\lambda z_i} \exp(j \frac{2\pi z_i}{\lambda}) \iint_{\Sigma} u_{io}(x_o, y_o) \cdot \\ &\quad \exp\left\{ \frac{j\pi(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2}{\lambda z_i} \right\} dx_o dy_o \\ &= \frac{1}{j\lambda z_i} \exp(j \frac{2\pi z_i}{\lambda}) \exp\left\{ \frac{j\pi}{\lambda z_i} (x^2 + y^2) \right\} \cdot \\ &\quad \iint_{\Sigma} u_{io}(x_o, y_o) \exp\left\{ \frac{j\pi}{\lambda z_i} (x_o^2 + y_o^2) \right\} \cdot \\ &\quad \exp\left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda z_i} (xx_o + yy_o) \right\} dx_o dy_o \quad (1) \end{aligned}$$

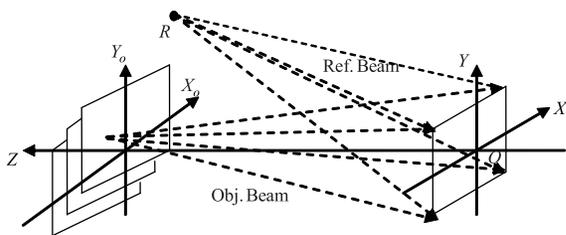


图 1 全息图的记录

Fig. 1 Schematic diagram of recording hologram

其中,  $\lambda$  为光波长。显然,在计算过程中可将上式可以看作是  $u_{io}(x_o, y_o) \exp\left\{ \frac{j\pi}{\lambda z_i} (x_o^2 + y_o^2) \right\}$  的二元傅里叶变换(用  $F$  表示)与二次相位因子  $\frac{1}{j\lambda z_i} \exp(j \frac{2\pi z_i}{\lambda}) \exp\left\{ \frac{j\pi}{\lambda z_i} (x^2 + y^2) \right\}$  的乘积。

因而式(1)可改写为:

$$u_i(x, y) = \frac{1}{j\lambda z_i} \exp(j \frac{2\pi z_i}{\lambda}) \exp\left\{ \frac{j\pi}{\lambda z_i} (x^2 + y^2) \right\} \cdot F\left\{ u_{io}(x_o, y_o) \exp\left[ \frac{j\pi}{\lambda z_i} (x_o^2 + y_o^2) \right] \right\} \quad (2)$$

$n$  幅 CT 图片各自的复振幅非相干叠加即为到达全息记录平面的总的物光波分布:

$$u(x, y) = \sum_i^n u_i(x, y) \quad (3)$$

由全息理论可知,采用球面参考光的全息图(亦称无透镜傅氏变换全息图)具有较窄的带宽,并且采样频率和全息图大小无关,故引入球面参考光  $R(x, y)$ ,制作无透镜傅氏变换全息图。

$$R(x, y) = \frac{a_o}{z_r} \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} z_r) \cdot \exp\left\{ \frac{j\pi}{\lambda z_r} [(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2] \right\} \quad (4)$$

其中,  $a_o$  为常数;  $(x_r, y_r, z_r)$  为参考光点源坐标。通过计算可得到物光波  $u(x, y)$  与参考光波  $R(x, y)$  干涉产生的计算全息图  $H$ 。

计算全息图  $H$  经光学再现,便可获得三维再现像。三维再现像的形状与参与三维重构的 CT 图片的数目  $n$  有关,并随着  $n$  的变化而有所不同。设 CT 图片的总数目为  $N$ ,我们让  $n$  在 1 至  $N$  之间逐渐变化,每次增加一幅 CT 图片,这样可以计算得到  $N$  幅计算全息图,记为  $H_1, H_2, \dots, H_N$ ,即  $H_1$  为一幅 CT 图片的全息图,  $H_2$  为两幅 CT 图片重构所得到的全息图,依此类推,  $H_N$  为  $N$  幅 CT 图片重构所得到的全息图。当这  $N$  幅计算全息图顺序或逆序再现时,便可得到  $N$  个渐进变化的三维再现像,每个再现像相差一片 CT 图像,从  $H_1$  到  $H_N$ ,三维再现像经历了从局部变到整体的变化过程,从  $H_N$  到  $H_1$ ,则经历了从整体变到局部的变化过程,这样不仅能获得组织器官的整体结构,也可知道内部信息,有助于医学诊疗。

## 3 计算全息实时显示系统设计

计算好的全息图可以通过光学缩微的方法输出到全息干板上<sup>[15]</sup>,经光学再现获得三维再现像。但这种方法适合于静态物体的三维再现,无法实现全息图实时、动态的三维显示。近年来,伴随着液晶显示技术的发展,LC-SLM 的分辨率越来越高,其像素尺寸已经达到微米数量级,基本满足了计算全息图光学再现时对分辨率的要求,因此可以用 LC-SLM 代替全息干板,实现计算全息的光电实时显示。设计的光电实时显示系统原理图如图 2 所示,计算机与透射式的 LC-SLM 相连接,全息图通过计

计算机输出并显示在 LC-SLM 上。激光经 L1 扩束和 L2 会聚后,获得参考光波  $R(x,y)$  的共轭光波  $R^*(x,y)$  作为再现光波。再现光波照射到 LC-SLM 上,经计算全息图衍射后的透射光包含了物光波的信息,当人眼获得这些物光波信息时,便观察到了三维再现像。将计算好的一系列计算全息图存储在计算机中,当计算机以一定频率向 LC-SLM 输出计算全息图时,人眼便可直接观察到不断变化的三维再现像,实现了计算全息的实时光电三维显示。

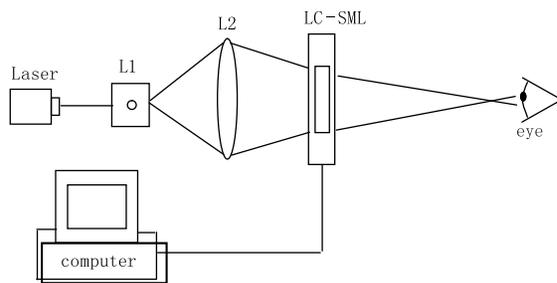


图2 CT图像三维实时显示系统

Fig. 2 3D real-time display system of CT images

这里必须指出的是,LC-SLM 作为一种光调制器件,其像素是离散化的,用它代替全息干板作为计算全息显示载体时,其本身的栅格结构和参数对计算全息图的再现存在重要的影响。LC-SLM 的像素间隔决定了计算全息图的采样频率,即 LC-SLM 的像素间隔要满足计算全息图对采样间隔的要求,为了充分利用空间带宽积,一般让二者相等。

#### 4 实验与结果

在实验中,将最多48幅人体肺组织的CT图片进行了三维重构,每幅CT图片为 $512 \times 512$ 像素,用MATLAB计算机程序将所有CT图片读入计算机,则每幅CT图片对应一个 $512 \times 512$ 的强度矩阵,给每个矩阵乘以一个随机相位,模拟散射光的传播,即得到CT图片的透射光场分布。所有CT图片按原顺序排列。

依据式(2)和式(3)模拟物光波,由于每幅CT图片都是二维的,可以用快速傅里叶变换算法进行计算,大大加快了计算速度。依据式(4)模拟参考光波,物光与参考光波长设为 $\lambda = 632.8\text{nm}$ ,LC-SLM的参数如表1所示。参与三维重构的CT图片数目从1~48逐渐变化,每次增加一幅CT图片,计算得到48幅计算全息图( $H_1, H_2, \dots, H_{48}$ ),每幅计算全息图的像素为 $1920 \times 1080$ ,与LC-SLM像素相同。整个计算过程通过计算机程序自动完成。图3是实验中用到的一片普通的CT图片,图4为计算得的计算全息图放大后的局部图。

表1 LC-SLM 相关参数

属性	属性值	属性	属性值
调制类型	振幅型	液晶类型	TN型 TFT LCD
像元大小	$8.5 \mu\text{m}$	开口率	57%
像素数	$1920 \times 1080$	响应时间	7 ms 开启, 20 ms 关闭
像面尺寸	$16.3 \text{mm} \times 9.18 \text{mm}$	光谱范围	$380 \sim 1200 \text{nm}$

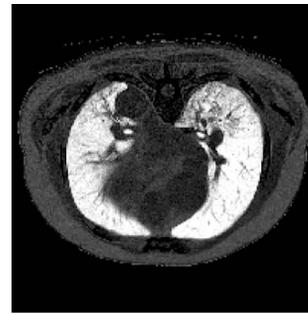


图3 一幅普通的肺CT图片

Fig. 3 A ordinary CT image of lung

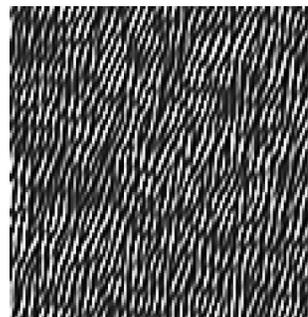


图4 放大后的计算全息图

Fig. 4 The partly enlarged computer generated hologram

通过计算机控制将48幅计算全息图依次输出到LC-SLM,如图2所示,再现激光波长为 $632.8 \text{nm}$ ,随着计算机输出的计算全息图依次变化,再现得到的三维CT图像也依次变化,从 $H_1$ 到 $H_{48}$ ,三维再现像逐渐“复合”;从 $H_{48}$ 到 $H_1$ ,三维再现像则逐渐“剥离”,实现了CT图像的三维实时显示。图5是实验中获得的一个三维CT再现像。

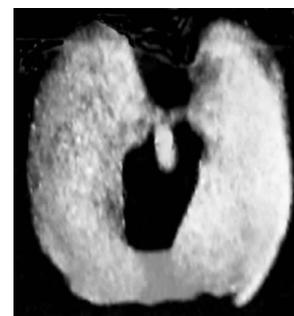


图5 人体肺CT图片的三维再现像

Fig. 5 3D Reconstructed image of human lung

## 5 结 论

本文研究了 CT 图像计算全息三维重构与实时显示技术,给出了 CT 图像三维重构算法,建立了基于液晶空间光调制器的 CT 图像三维实时显示系统,再现的三维 CT 图像随着输给空间光调制器的计算全息图的变化而变化。由于全息技术是真正的三维显示技术,因而通过该方法得到的是真三维 CT 图像,为人体组织器官的三维重构与显示提供了一种手段。从实验结果发现再现像存在一定程度的模糊,其主要原因在于我们所用的空间光调制器的尺寸与分辨率限制了再现像的显示效果,因而该技术要走向实用化还有待于相关器件分辨率与空间带宽积的改善与提高、计算全息算法的改进以及三维实时显示系统及其参数的优化,这是我们接下来要做的工作。

### 参考文献:

- [1] LI Yunda, LI Qi, DING Shenghui. Recent development of terahertz computed tomography imaging[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(12): 1372 - 1376. (in Chinese)  
李运达, 李琦, 丁胜晖. 太赫兹计算机辅助层析成像发展近况[J]. 激光与红外, 2012, 42(12): 1372 - 1376.
- [2] HUANG Xiaoyang, WANG Boliang, HUANG Shaohui. Three-dimensional reconstruction of Human head CT slices using VRML language[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2002, 41(6): 740 - 743. (in Chinese)  
黄晓阳, 王博亮, 黄绍辉. 用 VRML 语言实现头部 CT 图像三维重建[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2002, 41(6): 740 - 743.
- [3] Jan Rosella, Paolo Cabrasa. A three-stage method for the 3D reconstruction of the tracheobronchial tree from CT scans[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2013, 37(7): 430 - 437.
- [4] Jie Wu, Ashwin Belle, Rosalyn H Hargraves. Bone segmentation and 3D visualization of CT images for traumatic pelvic injuries[J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2014, 24(1): 29 - 38.
- [5] MA Jianshe, XIA Feipeng, SU Ping, et al. Survey on key techniques and systems of digital holographic 3D display[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 1141 - 1152. (in Chinese)  
马建设, 夏飞鹏, 苏萍, 等. 数字全息三维显示关键技术及系统综述[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 1141 - 1152.
- [6] CHEN Hong, QIAN Xiaofan, LI Bin, et al. Stability of refractive index matching liquids and its influence on the holographic recording and reconstruction[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(8): 932 - 935. (in Chinese)  
陈虹, 钱晓凡, 李斌, 等. 折射率匹配液的稳定性及其对全息记录与再现的影响[J]. 激光与红外, 2012, 42(8): 932 - 935.
- [7] Dzoho H, Tanaka A, Nishijima S, et al. Mapping of the 3D objects using computer generated hologram SOM[J]. Lecture Notes in Computer Science. 2011, 6731: 348 - 356.
- [8] GAN Liangqin, YANG Shangong, DU Xuri. New method of making color dynamic hologram[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(3): 339 - 342. (in Chinese)  
甘亮勤, 杨上供, 杜旭日. 真彩色动态全息图制作的新方法[J]. 激光与红外, 2010, 40(3): 339 - 342.
- [9] REN Zhenbo, SU Ping, MA Jianshe. Information content compression and zero-order elimination of computer-generated hologram based on discrete cosine transform[J]. Optical Review, 2013, 20(6): 469 - 473.
- [10] YANG Baohe, ZHAI Hongchen, WANG Mingwei, et al. Improving on parameter design and chromatism analysis of rainbow hologram for inverse tomographic 3 - D display[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2000, 11(2): 194 - 197. (in Chinese)  
杨保和, 翟宏琛, 王明伟, 等. 逆层析彩虹全息光路参数与色差分析[J]. 光电子·激光, 2000, 11(2): 194 - 197.
- [11] ZHAI Hongchen, WANG Mingwei, PAN Dong, et al. Vertical area partition of recording in the multiple-exposure rainbow hologram for 3 - D achromatic synthesis of tomographic patterns[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(9): 828 - 832. (in Chinese)  
翟宏琛, 王明伟, 潘栋, 等. 应用纵向分区彩虹全息术合成断层图像的三维消色像[J]. 中国激光, 2000, 27(9): 828 - 832.
- [12] LI Shuai, LI Haifeng, PENG Yifan. Novel 3D display based on spliced view-Field[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2010, 25(4): 601 - 604. (in Chinese)  
李帅, 李海峰, 彭祎帆. 基于视场拼接的体视三维显示[J]. 液晶与显示, 2010, 25(4): 601 - 604.
- [13] Yingbao Yang, Takeo Koito, Naoyuki Takasaki. A high resolution multi-view 3D display using switchable liquid crystal lens [J]. Journal of the SID, 2013, 21(8): 345 - 351.
- [14] Chen C W, Cho M, Huang Y P. Improved viewing zones for projection type integral imaging 3D display using adaptive liquid crystal prism array[J]. Display Technology, 2013, 10(3): 198 - 203.
- [15] JIN Hongzhen, LI Yong, WANG Hui, et al. The design of auto-microcopy system for digital holograms[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2006, 27(3): 233 - 236. (in Chinese)  
金洪震, 李勇, 王辉, 等. 数字全息缩微输出系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(3): 233 - 236.