

文章编号:1002-2082(2010)03-0408-05

# 基于CCD的乳腺X线摄影图像预处理方法的研究

张凤生, 王海峰, 时洪光

(青岛大学 机电工程学院, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 为提高由闪烁屏到CCD的光耦合效率,减小大相对孔径和近距离成像造成CCD图像严重失真,提出一种有效补偿图像失真的预处理方法。该方法根据物像共轭关系将物面划分为与图像传感器像素相对应的许多微小物元,应用蒙特卡罗方法模拟从每一物元发出的光在像面上形成的光分布,即点扩散函数。由所有物元的点扩散函数构成一个点扩散数组,数组的每一行对应一个物元的点扩散函数。基于该点扩散数组建立描述像元与物元关系的线性方程组,解线性方程组可得到接近实物的图像。用实际光学系统的计算结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 乳腺X线摄影; CCD; 蒙特卡罗模拟; 点扩散函数

中图分类号: TN911.73; O43

文献标志码: A

## Method for preprocessing mammography image based on CCD

ZHANG Feng-sheng, WANG Hai-feng, SHI Hong-guang

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The key to apply CCD to implement mammography is to improve the coupled efficiency of light from scintillation screen to CCD, and it is necessary that the image system has a large relative aperture and adopts close imaging, which makes the CCD image seriously distorted. This paper presents an efficient preprocessing method to compensate image distortion. According to the conjugate relation between the object and its image, the object plane was divided into many micro object elements that have one-to-one correspondence with the pixels of image sensor; Monte Carlo method was used to simulate the light distribution on image plane made by the light from each object element, namely point spread function. A point spread array was constructed from all point spread functions of all elements; each row of the array corresponds to the point spread of function an object element. A linear system of equations to describe the relation between all object elements and all image pixels was built on the basis of the point spread array, and a lifelike image was obtained by solving the linear system of equations. The calculation results for an actual optical system verified the validity of the method.

**Key words:** mammography; CCD; Monte Carlo simulation; point spread function

## 引言

近年来,大尺寸CCD的发展为实现乳腺全场成像提供了条件。与目前临床应用的数字化乳腺X

线摄影系统中的平板探测器相比,CCD具有像素尺寸小、灵敏度高、动态范围大、成本低等优点,决定了基于CCD的数字化乳腺X线摄影的潜在优

收稿日期:2009-10-26; 修回日期:2009-12-05

作者简介:张凤生(1962—),男,河北廊坊人,博士,教授,主要从事测控技术与仪器、光电测量技术、光学相干层析成像技术等工作。E-mail:fszhang1994@yahoo.com.cn

势<sup>[1-2]</sup>。实现 CCD 乳腺 X 线摄影的关键问题之一是由闪烁屏到 CCD 的光耦合<sup>[3]</sup>。对比已有的 3 种耦合方式:光纤耦合、像增强器耦合和透镜耦合,透镜耦合结构简单、成本低,但光耦合效率低。要提高光耦合效率,必须增大耦合透镜的相对孔径和采取近距离成像,而这将导致 CCD 图像失真加剧。本文旨在研究一种有效补偿图像失真的图像预处理方法,以获得高质量的乳腺摄影图像。

## 1 基于 CCD 的数字化乳腺 X 线摄影系统原理

基于 CCD 的数字化乳腺 X 线摄影系统如图 1 所示。上压板和下压板将乳房挤压成扁平状, X 射线透过上压板、乳房和下压板后照射到透射式闪烁屏<sup>[4]</sup>上,闪烁屏发射的可见光经反射镜反射进入成像物镜,成像到 CCD 上。计算机采集 CCD 接收的图像,并进行保存、分析和处理。

乳腺 X 线摄影不同于身体其他部位的 X 线摄影,由于乳腺是由密度相近的多种软组织构成,天然对比度差,因此,对乳腺 X 线摄影系统的图像质量要求更高。为了降低 X 射线对受检者健康的影响,乳腺 X 线摄影的放射剂量很低,因此由闪烁屏发射的可见光非常弱<sup>[5-6]</sup>。此外,乳腺全场成像范围要求为 240 mm×180 mm,而目前的商品化大尺寸 CCD,其光敏面一般小于 50 mm×50 mm,这就要求成像系统具有较高的倍率。上述要求决定了成像物镜应采用大相对孔径镜头,且工作在近距离成像,以增大成像的光通量。而大相对孔径、近距离成像往往又造成成像质量的降低,为此,必须采取有效的图像处理方法来提高图像质量。

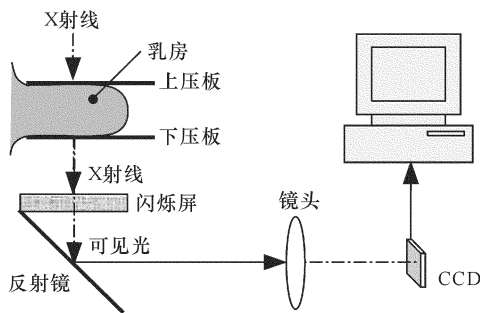


图 1 基于 CCD 的数字化乳腺 X 线摄影系统原理图  
Fig. 1 Block diagram of the digital mammography system based on CCD

## 2 成像物镜的点扩散函数与图像预处理方法

### 2.1 点扩散函数

对于实际光学系统,由于像差的存在,物面上一个点经光学系统所成的像不是点像,而是一个弥散斑,且弥散斑的大小和形状随点在物面上的位置不同而变化。尤其对于采用 CCD 的数字化乳腺 X 线摄影系统,由于成像镜头的相对孔径大、物距小,物面边缘点的弥散更甚,导致图像严重失真。

为了描述弥散斑的分布,引入一个点扩散函数。具体确定点扩散函数的方法是:应用蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 方法<sup>[7]</sup>模拟物面上一个物元 (即微元面积) 随机发出的光子,对每一个进入成像物镜的光子进行光路追迹,求得其在像面上的像点和投射到像面上的能量。通过模拟由同一物元发射的大量光子,可确定该物元在像面上形成的能量分布,即点扩散函数。CCD 接收的图像是组成物面的所有物元在像面上所形成的能量分布的叠加,应用点扩散函数对图像进行相应的处理,可有效补偿点扩散的影响。

### 2.2 点扩散函数的计算

#### 2.2.1 物面与像面的划分

设面阵 CCD 的像素数为  $N \times N$ , 且  $N$  为奇数 (这是为了简化后面的叙述,实际应用中的 CCD 行数和列数通常不相等,且  $N$  不一定为奇数)。根据物像共轭关系,物面 (即闪烁屏的发光面) 相应地划分成  $N \times N$  个物元。由于在乳腺 X 线摄影系统中,物像共轭距是固定的,故物元大小由 CCD 的像素尺寸和该物像共轭距下的成像物镜放大倍率决定。物面与像面间的对应关系如图 2 所示。 $xoy$  平面为物面,物元的行、列编号顺序为:物元  $A$  为第  $(0, 0)$  号,物元  $B$  为第  $(N-1, N-1)$  号,位于物面中心的物元为第  $(N-1)/2, (N-1)/2$  号。像面为  $x'o'y'$  平面,像元  $B'$  对应第  $(0, 0)$  号物元,  $A'$  对应第  $(N-1, N-1)$  号物元,  $o'$  对应第  $(N-1)/2, (N-1)/2$  号物元。

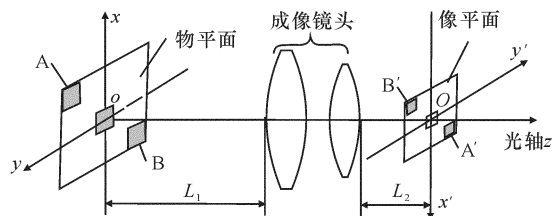


图 2 物像平面对应关系示意图  
Fig. 2 Diagram of the corresponding relation between object-plane and image-plane

#### 2.2.2 点扩散函数的计算方法

1) 应用 MC 方法模拟物元发射的光子,包括

模拟光子发射的初始位置和方向。物面划分后,每个物元的中心点坐标即已确定。设第  $(i, j)$  物元的中心点坐标为  $(x_i, y_j)$ , 则该物元发射光子的初始位置坐标  $(x, y)$  由  $x = x_i + \xi_1 \cdot \Delta x$  和  $y = y_j + \xi_2 \cdot \Delta y$  确定, 其中  $\xi_1$  和  $\xi_2$  是在  $[-0.5, 0.5]$  内均匀分布的随机数,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为物元在  $x$  和  $y$  方向的尺寸。

光子的初始发射方向由偏转角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  描述, 如图 3 所示。由于闪烁屏上任一微元面向半空间内发光的强度分布是关于微元面的法线对称的, 故可用  $I(\theta)$  描述微元面发光的强度分布, 其中  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ 。因此, 对偏转角  $\theta$  的模拟必须满足强度分布函数  $I(\theta)$ , 而方位角  $\varphi$  则由式  $\varphi = 2\pi \cdot \xi_3$  确定, 其中  $\xi_3$  是在  $[0, 1]$  内均匀分布的随机数。

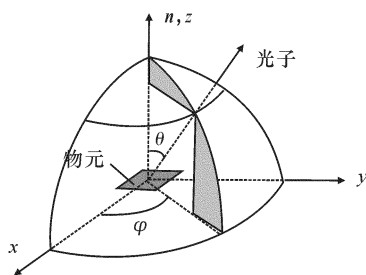


图 3 光子发射方向示意图

Fig. 3 Diagram of the direction of emitted photon

2) 对进入成像物镜的光子进行光路追迹, 在光路追迹的同时, 计算光子能量在每个折射面上的反射损失和在透镜材料内的吸收损失, 最后求得光子在像面上的像点位置和能量, 并将结果保存在一个 4 维数组  $E[N, N, N, N]$  中,  $E[N, N, N, N]$  称为

点扩散数组, 数组元素  $E[i, j, m, n]$  表示由第  $(i, j)$  物元发射的光子到达像面上第  $(m, n)$  像元的能量值, 其中  $0 \leq i, j, m, n \leq N-1$ 。

3) 重复上面的 1) 和 2), 通过追迹大量的光子, 可得到由同一物元发射的光子在像面上形成的能量分布, 即点扩散函数, 它被保存在数组  $E[N, N, N, N]$  中。

4) 逐一计算所有物元的点扩散函数后, 将数组  $E[N, N, N, N]$  保存为数据文件, 供图像预处理调用。

### 2.3 图像预处理方法

由于点扩散的存在, CCD 每一个像素接收的光能量是物面上与该像素共轭的物元及其邻近物元共同作用的结果。在数学处理上, 将每个像素接收的光能量表示为物面上各物元光能量的加权求和。对于确定的成像系统和物像共轭关系, 只要求出所有的加权系数, 即可通过解线性方程组的方法, 由 CCD 输出图像反求物面上各物元的发光强度, 从而有效补偿实际成像系统的点扩散引起的图像失真, 获得接近真实物面光分布的图像。

#### 2.3.1 加权系数的计算

第  $(i, j)$  物元对第  $(m, n)$  像元贡献光能量的加权系数为  $a[i, j, m, n] = E[i, j, m, n] / E[i, j]$ ,  $0 \leq i, j, m, n \leq N-1$ , 其中  $E[i, j]$  为第  $(i, j)$  物元发射光子的总能量。

#### 2.3.2 物面上各物元的发光强度分布与 CCD 输出图像能量分布的关系

$$\begin{cases} X[0,0] \times a[0,0,0,0] + \dots + X[i,j] \times a[i,j,0,0] + \dots + X[N-1,N-1] \times a[N-1,N-1,0,0] = Y[0,0] \\ \vdots \\ X[0,0] \times a[0,0,m,n] + \dots + X[i,j] \times a[i,j,m,n] + \dots + X[N-1,N-1] \times a[N-1,N-1,m,n] = Y[m,n] \\ \vdots \\ X[0,0] \times a[0,0,N-1,N-1] + \dots + X[i,j] \times a[i,j,N-1,N-1] + \dots + X[N-1,N-1] \times a[N-1,N-1, \\ N-1,N-1] = Y[N-1,N-1] \end{cases}$$

式中: 数组  $X[N, N]$  描述物面上各物元的光强度分布;  $X[i, j]$  是第  $(i, j)$  物元的发光强度; 数组  $Y[N, N]$  为 CCD 输出图像能量分布;  $Y[m, n]$  是第  $(m, n)$  像元接收的总光能量;  $a[i, j, m, n]$  为加权系数数组。解线性方程组求得  $X[N, N]$ , 即物面光分布。

### 3 成像系统的图像预处理计算实例

根据上述的点扩散数组计算和图像预处理方法编程, 对含有非球面的大孔径广角物镜<sup>[8]</sup>进行计

算。物镜的主要参数: 焦距为 35.5 mm, 后截距为 36.5 mm, 光圈数为 1.22, 视场角为  $\pm 32^\circ$ 。镜头结构如图 4 所示, 各折射面的曲率半径  $r$ 、间隔  $d$ 、玻璃折射率  $n$  和色散  $v$  列于表 1。其中, 第 14 折射面为非球面, 非球面方程为

$$x = \frac{y^2}{r_{14} + r_{14} \sqrt{1 - (y/r_{14})^2}} + Ay^4 + By^6 + Cy^8 + Dy^{10}$$

式中:  $A = 6.2170 \times 10^{-6}$ ;  $B = 1.9653 \times 10^{-9}$ ;  $C =$

$7.6209 \times 10^{-12}$ ;  $D = -1.8450 \times 10^{-14}$ 。

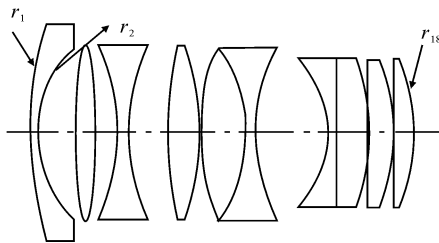


图4 大孔径广角物镜结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of a large-aperture & wide-angle lens

表1 折射面参数

Table 1 Refractive surface parameters

折射面序号	$r$	$d$	$n$	$v$
1	77.740	2.00	1.516 33	64.1
2	28.106	8.53		
3	116.459	4.53	1.693 50	53.3
4	-113.755	5.26		
5	-44.424	2.00	1.516 33	64.1
6	48.338	9.00		
7	84.284	7.68	1.834 00	37.2
8	-55.138	0.20		
9	55.095	10.25	1.772 50	49.7
10	-34.731	2.17	1.721 51	29.2
11	43.543	16.50		
12	-24.937	2.00	1.805 18	25.4
13	$\infty$	7.69	1.772 50	49.7
14	-47.631	0.20		
15	-190.000	5.50	1.772 50	49.7
16	-42.440	0.20		
17	-190.698	4.30	1.772 50	49.7
18	-42.764			

实际计算参量设置:物面大小  $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ ,物面划分为  $41 \times 41$  物元,每个物元向半空间内均匀发光,发射光子数 100 万个;假设 CCD 像元的光响应非均匀性为  $\pm 5\%$ 。图 5 是不同物距(物面到第一折射面顶点的距离) $L_1$  条件下,对物面图案“E”所成图像(灰度图)预处理前后的对比。图 5(a)是  $L_1=260 \text{ mm}$  时所获得的 CCD 输出图像,可看出物面边缘相对物面中心的成像质量明显下降。图 5(b)是  $L_1=1\ 000 \text{ mm}$  时所获得的 CCD 输出图像相对于图 5(a)的中心像元强度进行归一化处理后的图像。可以看出:随  $L_1$  的增大,进入物镜的光通量减少,整幅 CCD 输出图像变暗,但物面边缘点与中心点的成像质量相差减小。图 5(c)和图 5(d)分别是图 5(a)和图 5(b)经图像预处理后的

结果。可见本文的图像预处理方法有效补偿了图像失真,得到清晰的目标图像。为了验证图像预处理对提高图像分辨率的作用,在物面图案上故意添加一亮点,图中可清晰看出图像预处理对分辨这一细节的明显效果。

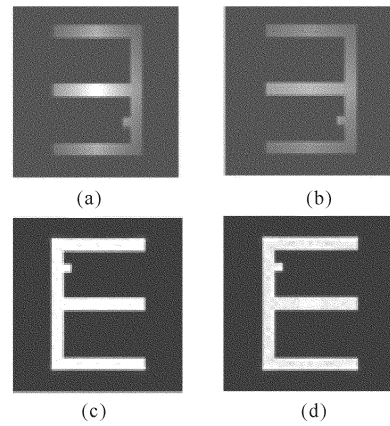


图5 预处理前后的图像对比

Fig. 5 Contrast of images before and after pre-processing

#### 4 结束语

基于 CCD 的乳腺 X 线摄影系统,其中的光耦合物镜必须具有大相对孔径,且工作在近距离成像,这导致视场边缘的成像质量很差。本文利用光线追迹方法计算的点扩散数组,全面反映了成像系统像差对图像质量的影响。应用 CCD 输出图像进行预处理,可有效补偿像差引起的图像失真,提高图像分辨率。对于任一成像系统,只要给定其结构和光学参量,即可应用本文的方法计算出任一物像共轭距下的点扩散数组。

对于物像共轭距固定的成像系统,点扩散数组只需计算一次并保存,供后续图像预处理调用。在缺少成像系统详细光学参量的情况下,可通过实验测量物面上一定数量离散物元的点扩散函数,再应用数学插值法求得点扩散数组。

#### 参考文献:

[1] WETZEL K. Digital radiography: CCDs deserve another look[J]. *Advanced Imaging*, 2004,19(9):12-13.  
 [2] FISCHER U, HERMANN K P, BAUM F. Digital mammography: current state and future aspects[J]. *European Radiology*, 2006,16(1):38-44.  
 [3] KALLERGI M. Digital mammography: from theory to practice[J]. *Cancer Control*, 1998,5(1):72-79.

- [4] TIPNIS S V, NAGARKAR V V, GAYSINSKIY V, et al. Large area CCD based imaging system for mammography [J]. Nuclear Science Symposium, 1999,2:1043-1046.
- [5] 中华人民共和国卫生部政策法规司. 乳腺X射线摄影质量控制检测规范GBZ 186-2007[S]. 北京:人民卫生出版社,2008.
- Policy and Regulations Department, Ministry of Health of the People's Republic of China. Inspection standard on the quality control of mammography (GBZ 186-2007) [S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [6] EVANS D S, WORKMAN A, PAYNE M. A comparison of the imaging properties of CCD-based devices used for small field digital mammography [J]. Phys. Med. Biol., 2002,47(1):117-135.
- [7] WANG Li-hong, JACQUES S J, ZHANG Li-qiong. MCML-Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissue [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 1995,47(2):131-146.
- [8] 福建光学技术研究所,国营红星电机厂. 光学镜头手册(第9册)[M]. 北京:国防工业出版社,1987.
- Fujian Institute of Optical Technology, Nationalized Red-start Electrical-motor Factory. Optical lens manual (9th book) [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1987. (in Chinese)

## 《应用光学》“综述”论文征稿启事

《应用光学》创刊30年来,始终以反映我国光学领域的研究进展和成果为己任,为中国应用光学事业的发展发挥了重要而卓有成效的作用,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格和品质。为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,满足读者的新需求、新期待,贯彻“以读者为本,为读者服务”的宣传报道理念。本刊决定刊发综述性文章,反映光学领域的热点专题研究进展或动态。

**具体要求:**综述性文章应尽可能就应用光学领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不必太大,但要有一定的深度和时间性,能反映这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。文章要求有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。

综述的写作格式一般包括5部分,即**摘要、引言、正文、结论、参考文献**。

**摘要:**要求围绕写作目的、论述方法、结果和结论展开,字数要求不少于200字。

**引言:**要用简明扼要的文字说明写作的目的、必然性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态。引言一般以200~300字为宜,不宜超过500字。

**正文:**主要包括论据和论证2部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己对该领域独到的见解。

**结论:**是对正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

**参考文献:**是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可反映作者阅读文献的广度和深度,应以最近3~5年内的文献为主。

《应用光学》编辑部