

# 少量投影数字全息层析重建实验研究\*

周文静<sup>†</sup> 胡文涛 郭 路 徐强胜 于瀛洁

(上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

(2010 年 1 月 21 日收到; 2010 年 7 月 15 日收到修改稿)

提出了少量投影数字全息层析重建技术. 以具有轴对称结构的光纤和非轴对称结构的石膏头像为实验样本, 开展了基于单幅全息图和代数迭代重建算法的层析重建模拟分析及实验研究. 模拟分析表明, 代数迭代重建算法中的加权因子以及松弛因子对重建图像质量影响显著, 因此对加权因子采用非线性加权计算方法, 以及通过多次模拟重建结果的比较选择合适的松弛因子. 层析重建实验结果表明, 无论被测物体是轴对称结构或是非轴对称结构, 少量投影数字全息层析重建是可行的, 也是有效的. 这为下一步针对生物样本内部多层折射率检测和基于单幅层析全息图实现三向实时数字全息层析重建技术研究提供了必要的基础.

**关键词:** 数字全息技术, 层析技术, 少量投影, 代数迭代重建算法

**PACC:** 4240K, 4225B

## 1. 引 言

数字全息层析技术即为数字全息技术与层析技术的结合. 数字全息技术以非接触的方式实现被测物体波前信息的数值重建<sup>[1-9]</sup>, 重建波前仅反映了被测物体的轮廓信息或被测物体内部折射率的平均值, 而被测物体内部结构或多层折射率检测是非常重要的, 故人们开展了将层析技术与全息技术相结合的研究. 国内针对传统全息层析技术开展的相关研究, 主要实现气体温度场的三维重建<sup>[10,11]</sup>. 国外近几年对数字全息层析技术的研究较多, 主要实现生物组织成分检测、折射率三维重建或与折射率变化相关的物理量测量<sup>[12-17]</sup>及重建误差分析<sup>[18]</sup>等. 根据投影数据获取方式的不同, 数字全息层析技术中投影数据记录方式可归纳为全息扫描式和相干切片式两类. 全息扫描式采用 Mach-Zender 离轴干涉全息系统, 测量过程中被测样本需要 180° 旋转<sup>[12,13]</sup>, 记录几十幅数字全息图, 全息图重建波前作为投影数据. 文献[15]提出了一种新的全息扫描式记录系统, 系统中单束物光波采用三次光束折返的方式携带被测样本的各向波前信息并记录于一幅全息图中, 全息图数值重建时采用不同的重建距

离实现各向波前信息的分离. 相干切片式采用 Michelson 离轴干涉全息系统<sup>[16,17]</sup>和低相干光源, 以共焦扫描方式实现沿光轴方向逐层记录数字全息图, 或采用多波长扫描<sup>[14]</sup>实现不同深度信息的全息图记录. 但数字全息层析技术目前依然存在两方面的不足. 一方面是现有全息层析记录方式比较复杂或实用性不强, 限制了整个层析重建的快捷性和有效性, 其中相干切片式轴向分辨率较低, 较难实现细微结构的重建. 另一方面是现有数字全息层析技术绝大多数都需要数十幅全息图, 不具有动态特性, 文献[15]的工作尽管只需要一幅全息图, 但单幅全息图数值重建的各向波前信息的精确分离以及重建距离的误差传递是主要问题.

针对目前数字全息层析技术存在的不足, 本文开展少量(三向和四向)投影数字全息层析重建技术研究. 首先, 理论分析了代数迭代投影重建算法的特性. 然后, 针对轴对称结构光纤芯样本进行计算机模拟重建, 实现被测样本的折射率分布重建, 验证了重建思路的正确性. 最后, 以轴对称结构光纤和非轴对称结构的三维石膏头像作为实际被测样本开展数字全息层析重建实验研究. 模拟分析及实验结果表明, 权因子的取值对层析重建质量影响显著, 松弛因子的取值影响了层析重建质量和重

\* 上海市博士后科研计划(批准号:09R21412900)、上海市科学技术委员会国际科技合作计划(批准号:09530708700)和上海大学研究生创新基金(批准号:SHUCX092195)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: lazybee@shu.edu.cn

建速度. 对于轴对称结构的被测物体, 三向投影能较好地实现数字全息层析重建, 对于非轴对称结构的被测物体, 四向投影也能较好地实现数字全息层析重建.

## 2. 数字全息层析重建基本原理

数字全息层析技术实际就是利用投影重建技术将全息重建获得的波前信息所包含的积分数据逐一解出, 以获得被测样本的内部特性参数.

### 2.1. 数字全息重建原理

数字全息图的数值重建即为衍射过程. 菲涅耳近似法和卷积法是数字全息技术实现数值重建波前的两个核心算法. 菲涅耳近似算法主要是依据光波的标准衍射原理, 适合于记录距离满足菲涅耳近似的情况, 计算过程较为简单, 但选择不同的重建距离所得重建波前的像素尺寸会有差异, 从而引起三维物体重建波前尺寸以及重建波前横向分辨率发生变化. 因此在多角度的投影重建中, 如果各向波前的重建距离有差异, 则需要考虑由此引入的波前误差. 菲涅耳近似算法实现数值重建的表达式如下<sup>[19]</sup>:

$$g(k, l) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d'^2 + (k - N/2)^2 \Delta\xi^2 + (l - N/2)^2 \Delta\eta^2}\right]}{\sqrt{d'^2 + (k - N/2)^2 \Delta\xi^2 + (l - N/2)^2 \Delta\eta^2}},$$

$$r(k, l) = \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} (k_x k \Delta\xi + k_y l \Delta\eta)\right\}.$$

这里 $\otimes$ 表示卷积运算,  $g(k, l)$  是系统成像函数.

### 2.2. 代数迭代投影重建算法特性分析

在计算机层析技术中, 根据投影数据的完全与否, 有两类重建算法可以选择<sup>[15]</sup>. 对于不完全投影数据, 即少量投影数据的三维重建, 常选用代数迭代算法. 图 1 是代数迭代算法重建模型, 阴影区域代表待重建的原始图像.

待建的原始图像被离散化为由  $N = n \times n$  个像素组成的一维数组  $[f_1, f_2, \dots, f_N]$ , 设投影射线总数为  $M$ , 则图像的第  $i$  条射线投影可表示如下:

$$p_i = \sum_{j=1}^N w_{ij} f_j \quad (i = 1, 2, \dots, M), \quad (3)$$

式中  $p_i$  为第  $i$  条射线的投影值,  $w_{ij}$  为加权因子, 表示第  $(i, j)$  个像素点对第  $i$  条射线投影值的贡献,  $f_j$

$$b(m, n) = A(m, n) F^{-1} \{ H(k, l) r(k, l) w(k, l) \}, \quad (1)$$

式中

$$w(k, l) = \exp\left\{-i \frac{\pi}{d' \lambda} (k^2 \Delta\xi^2 + l^2 \Delta\eta^2)\right\},$$

$$A(m, n) = \exp\left\{-i \pi d' \lambda \left(\frac{m^2}{M^2 \Delta\xi^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta\eta^2}\right)\right\},$$

$$r(k, l) = \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} (k_x k \Delta\xi + k_y l \Delta\eta)\right\}.$$

这里  $F^{-1}$  表示快速反傅里叶变换,  $H(k, l)$  和  $r(k, l)$  分别表示全息图的干涉信号和数字重建平面光波信号,  $(k, l)$  为全息的采样点,  $w(k, l)$  为球面衍射因子,  $A(m, n)$  为相位因子,  $(m, n)$  为重建像平面采样点,  $(\Delta\xi, \Delta\eta)$  为电荷耦合器件 (CCD) 的像素间距,  $d'$  为重建距离,  $\lambda$  为光波波长,  $M$  和  $N$  为 CCD 两个方向上的像素量,  $k_x$  和  $k_y$  为平面波的两个倾斜因子.

卷积算法则是依据相干成像系统中成像原理实现全息图数值重建的算法, 一般用于小尺寸物体近距离记录的情况, 其优点是重建波前尺寸及重建波前横向分辨率均不会随重建距离的不同而改变. 卷积算法数值重建表达式如下<sup>[19]</sup>:

$$b(k, l) = H(k, l) r(k, l) \otimes g(k, l), \quad (2)$$

式中

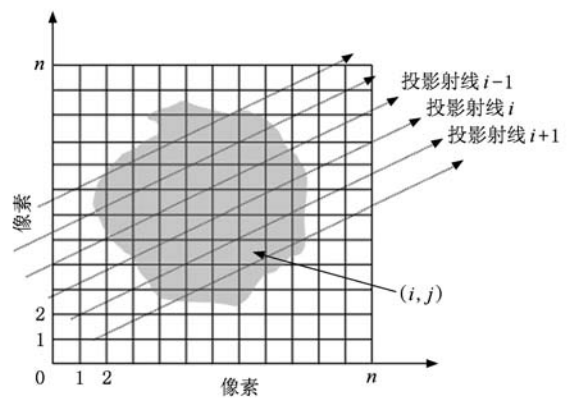


图 1 代数迭代算法重建模型

为第  $(i, j)$  个像素点的投影值. (3) 式中的  $p_i$  为已知值, 加权因子  $w_{ij}$  为自赋值,  $f_j$  为待求解的投影值. 为

求出  $f_j$ , 对  $p_i (i = 1, 2, \dots, M)$  方程组采用代数迭代法进行迭代求解. 迭代方程如下:

$$f_j^{(t+1)} = f_j^{(t)} + \zeta \frac{p_i - \sum_{j=1}^N w_{ij} f_j^{(t)}}{\sum_{j=1}^N w_{ij}^2} w_{ij}, \quad (4)$$

式中  $t$  为迭代次数,  $\zeta$  为松弛因子,  $\zeta$  在 0—2 之间取值. 代入  $p_i$  投影值和给定的初始值  $f_j^{(0)}$  (一般选取  $f_j^{(0)} = 0$ ) 就可进行迭代运算. 当满足下列条件时迭代结束:

$$p_i - \sum_{j=1}^N w_{ij} f_j^{(t)} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, M). \quad (5)$$

此时,  $f_j^{(t+1)}$  即为所需重建图像. 对于数字全息层析重建而言, 全息图数值重建波前相位信息或振幅信息即为  $p_i$  值.

### 3. 计算机模拟分析

为验证重建思路以及重建参数分析, 首先进行了计算机模拟重建. 模拟重建中, 主要分析少量投影条件下加权因子和松弛因子对重建图像质量的影响(迭代次数、被测物体结构分布等因素对重建图像质量的影响分析已另文发表<sup>[20]</sup>), 重建样本为具有轴对称结构和单层折射率分布的光纤纤芯. 纤芯的断面直径为 50  $\mu\text{m}$ , 折射率为 1.4, 断面投影区域尺寸(本文中尺寸未标明具体单位者均以像素为单位)为 71×71, 如图 2 所示. 其他模拟数据如下: 全息图记录光波波长为 632 nm, 记录距离为 65 mm, CCD 记录尺寸为 1024×1024, 像素间距为 4.65  $\mu\text{m}$ .

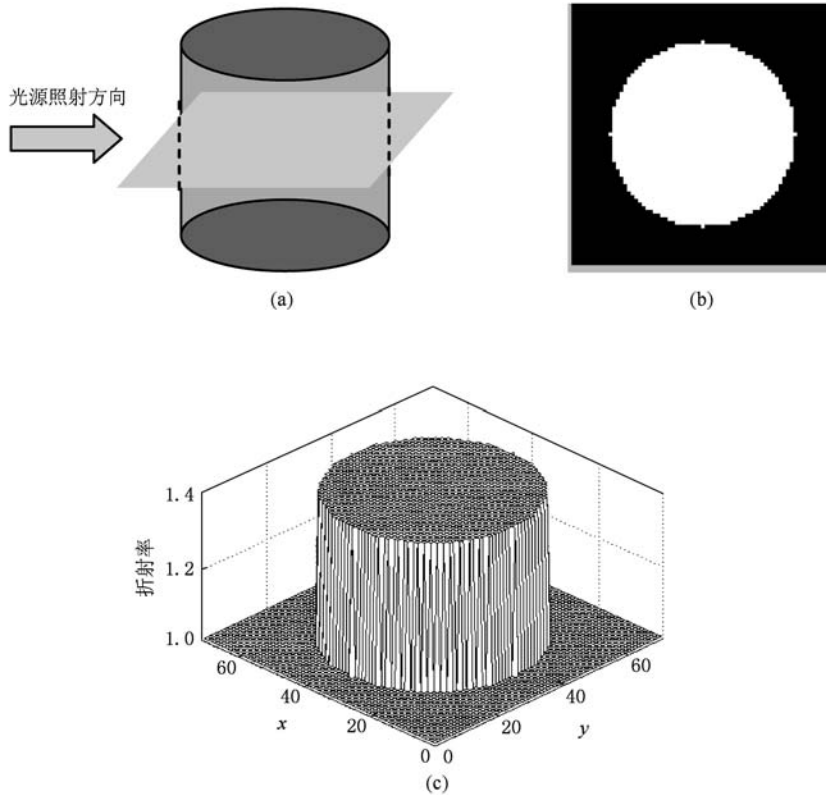


图2 轴对称结构光纤纤芯三维外形图、断面图及其折射率分布的计算机模拟 (a) 纤芯三维外形模拟图, (b) 纤芯断面图, (c) 纤芯断面的折射率分布

模拟分析过程共分四步. 第一步, 模拟被测物体的离轴全息图. 第二步, 全息图数值重建, 获取被测物体波前相位信息, 作为  $0^\circ$  视角的投影数据. 第三步, 根据样本轴对称结构特性, 以  $0^\circ$  视角投影数据作为  $60^\circ, 120^\circ$  视角的投影数据, 从而获得三向投影数据. 第四步, 针对不同取值的加权因子以及不

同取值的松弛因子, 进行三向投影代数迭代三维折射率重建效果分析.

#### 3.1. 数字全息图记录及其数值重建

图 3 所示为光纤纤芯原始波前三维图、数字全息图及其数值重建结果, 其中图 3(a) 为原始物波前

三维相位,图 3(b)为数字全息图,图 3(c)为全息图数值重建物波前相位图,图 3(d)为数值重建相位误差三维分布,图 3(e)为重建相位的截面图,以

此作为 0° 视角投影数据,并同时将其作为 60°, 120° 视角投影数据,构成三向投影数据,如图 3(f)所示.

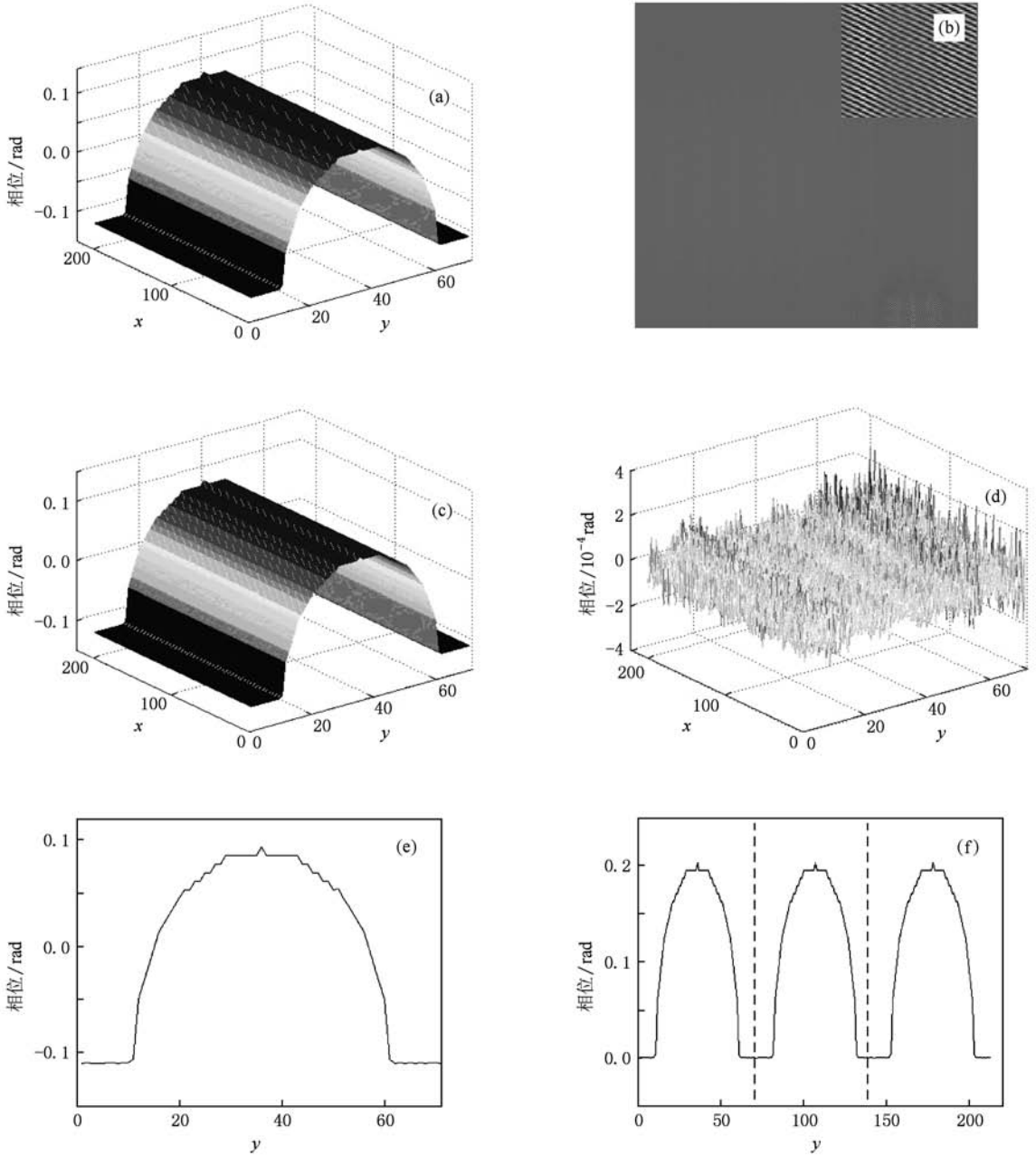


图 3 纤芯原始波前的三维图、数字离轴全息图及其数值重建结果 (a) 原始波前三维图, (b) 数字离轴全息图, (c) 全息图数值重建相位三维图, (d) 重建相位误差三维图, (e) 重建相位的截面图, (f) 三向投影合成图

### 3.2. 加权因子对重建图像质量的影响分析

(3)式中,加权因子  $w_{ij}$  表示像素点  $(i, j)$  对第  $i$  条投影射线的贡献<sup>[21]</sup>,也就是该射线是否经过该像素.当投影方向多、约束方程充足的条件下,加权因子常采用二值加权的取值方式,即当一条射线穿过

第  $j$  个像素时,该像素对这一条射线的贡献权因子  $w_{ij} = 1$ , 否则即为  $w_{ij} = 0$ , 如图 4(a)所示,图中  $\tau$  为像素宽度,同时也表示射线宽度.二值加权的取值方式可以大大提高重建速度,但对于少量投影的层析重建,由于约束方程较少,二值加权的取值方式会引起较大的重建误差.因此本文对权因子采用了

非线性加权计算方式,即假定射线没有宽度,各条射线之间距离为像素宽度  $\tau$ . 当射线穿过第  $j$  个像素时,计算射线在像素内的长度  $l_{ij}$ ,如图4(b)所示. 将  $l_{ij}$  与  $\tau$  之比定义为该像素对射线光强的贡献<sup>[22]</sup>,则  $w_{ij}$  为一组在  $[0,1]$  之间取值的数.

现假设经过  $t + 1$  次迭代后,(4)式中  $f_j^{(t)} = p_i$  (即目标函数已获得),对加权因子采用上述两种取值方式分别计算  $\sum_{j=1}^N w_{ij} f_j^{(t)}$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) 项,结果如图4(c)和(d)所示. 比较图4(c)与图3(f)可以

看出,两图中的  $p_i$  存在明显误差,即  $\sum_{j=1}^N w_{ij} f_j^{(t)} - p_i \neq 0$ . 比较图4(d)与图3(f)可以看出,两图中的  $p_i$  近似相等,即  $\sum_{j=1}^N w_{ij} f_j^{(t)} - p_i \approx 0$ . 由此可知,当加权因子只取0或1时,即便迭代过程已逼近目标函数,(4)式仍然不为零,即迭代不会结束,则  $f_j^{(t+1)} \neq f_j^{(t)}$ ,因此产生重建误差. 当采用非线性加权因子时,则迭代过程中目标函数出现后迭代即可结束,即  $f_j^{(t+1)} = f_j^{(t)}$ ,重建完成.

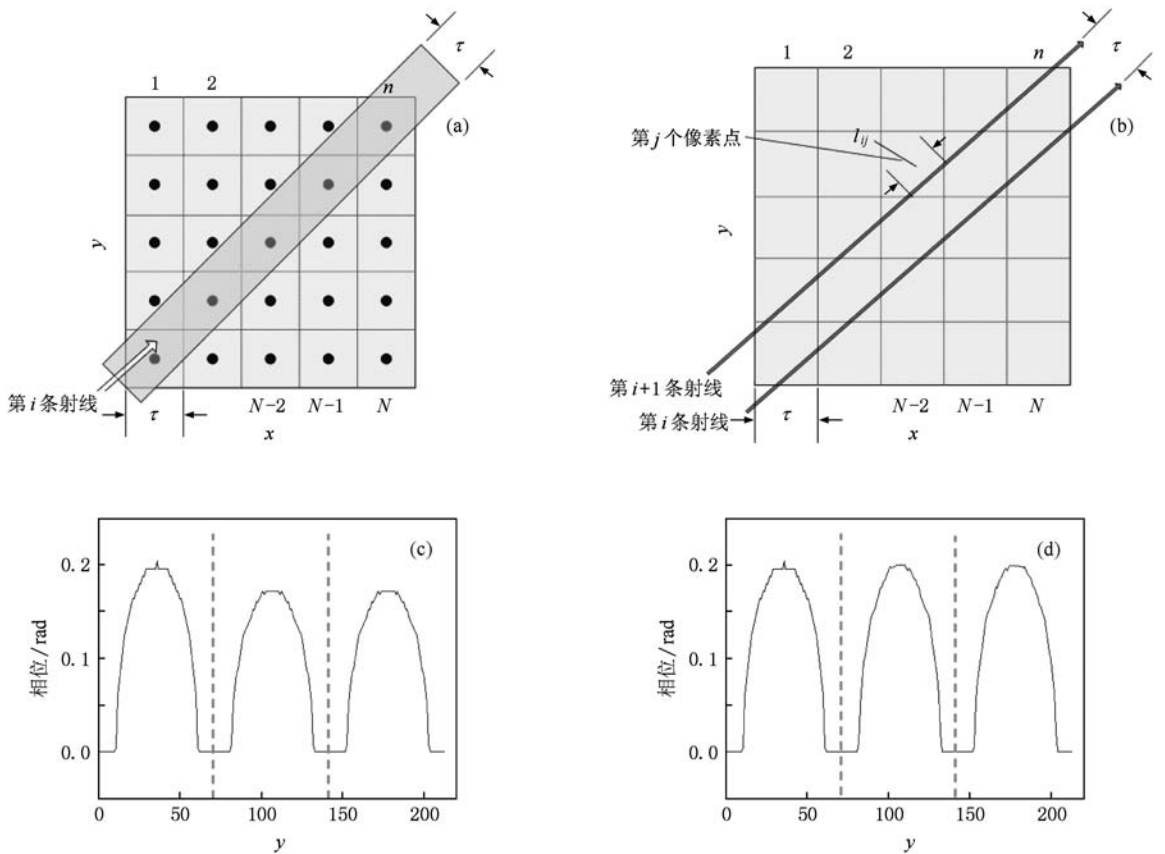


图4 加权因子的两种取值模型 (a) 二值加权因子取值模型,(b) 非线性加权因子取值模型,(c) 加权因子在二值加权取值条件下的投影计算结果,(d) 加权因子在非线性加权取值条件下的投影计算结果

图5所示为采用二值加权因子的光纤纤芯截面折射率重建结果,图6为采用非线性加权因子的光纤纤芯断面折射率重建结果,折射率平均值为1.4. 由此可知,权因子的非线性加权取值方式能较好地抑制噪声和伪影,提高了重建精度.

### 3.3. 松弛因子对重建图像质量的影响分析

(4)式中松弛因子  $\zeta$  的不同取值对重建图像质量以及迭代收敛速度同样有影响,一般通过多次实

验获得最佳值. 为获取松弛因子的最优值,首先定义平均重建误差

$$\bar{e} = \frac{\sum_{j=1}^N (R_j - O_j)}{N}, \quad (6)$$

式中  $R_j$  和  $O_j$  分别为重建图像的信号强度和原始图像的信号强度. 将(6)式平均重建误差作为重建图像质量评价函数,分别选取松弛因子  $\zeta = 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.9$ , 进行图像重建.

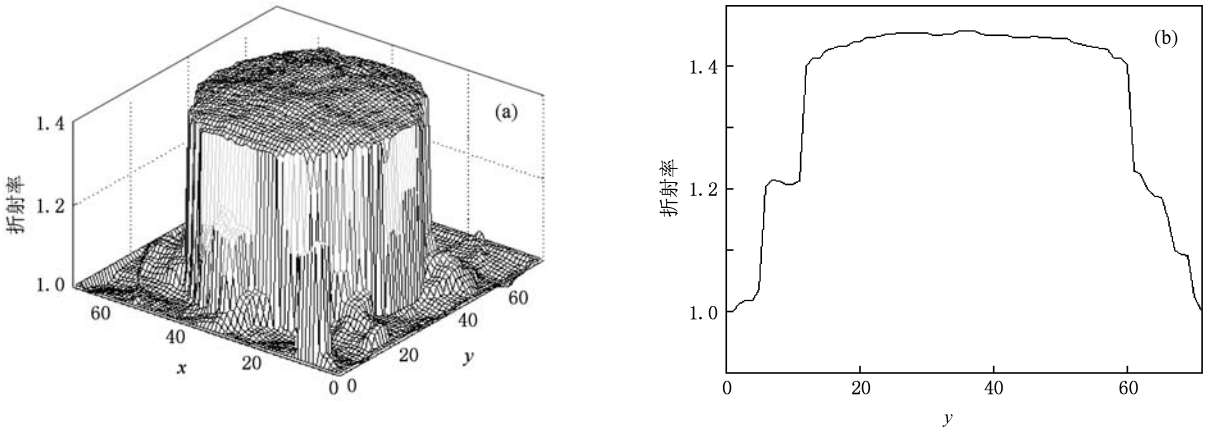


图5 基于二值加权因子的光纤纤芯断面折射率重建结果 (a) 断面折射率三维图,(b) 折射率的截面图

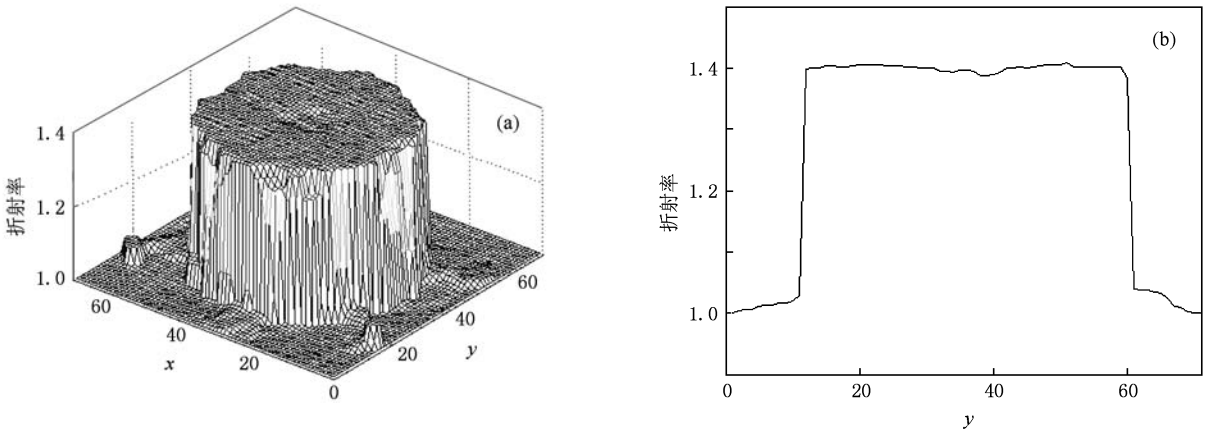


图6 基于非线性加权因子的光纤纤芯断面折射率重建结果 (a) 断面折射率三维图,(b) 折射率的截面图

松弛因子不同取值所对应平均重建误差的分布如图7所示.从图7可以看出,当松弛因子在0.5附近时,平均重建误差最小.

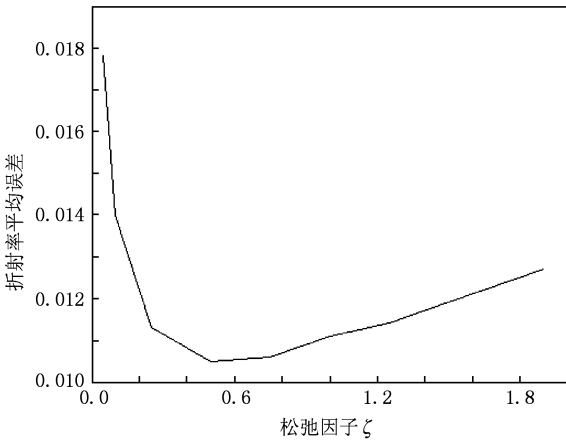


图7 松弛因子不同取值所对应平均重建误差的分布

### 4. 层析重建实验及结果分析

依据模拟结果,本文针对轴对称结构以及非轴对称结构的被测物体开展了实验研究.

#### 4.1. 轴对称结构的被测物体层析重建实验及结果分析

实验样本选取具有轴对称结构的一小段裸光纤,光纤断面直径为 125 μm,断面折射率为渐变型.

##### 4.1.1. 数字全息图记录及其数值重建

实验中采用如图8(a)所示的 Mach-Zender 离轴干涉全息系统记录单幅数字全息图.图8(b)为实验装置照片,主要器件有 He-Ne 激光器(波长为 632 nm)、图像采集器 CCD(有效像素为 1392×1024)、显微物镜(10 倍率),光源垂直照射光纤样本,为校正

显微镜引入的二次项相位畸变,记录系统在参考光路中放置了同样倍率的显微物镜.图8(c)为记录的数字全息图,记录距离为 50 mm.采用菲涅耳近似算

法实现全息图数值重建,图8(d)为全息图数值重建波前相位图,图8(e)为重建波前相位截面分布图.

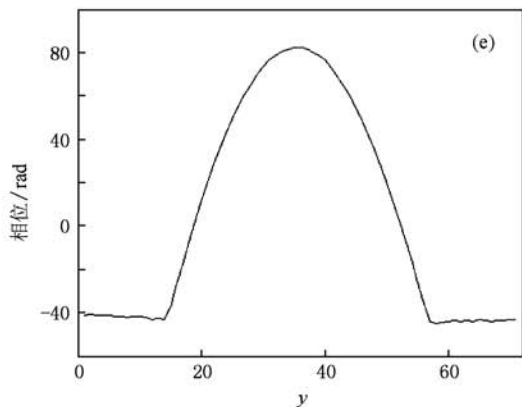
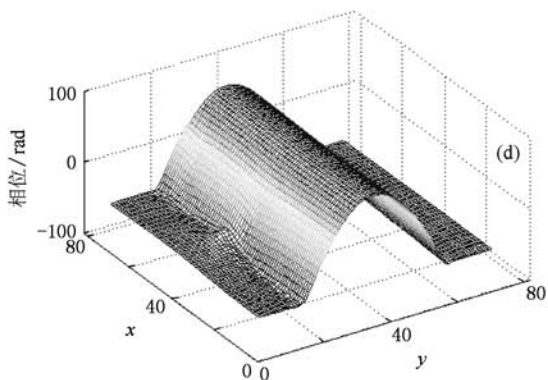
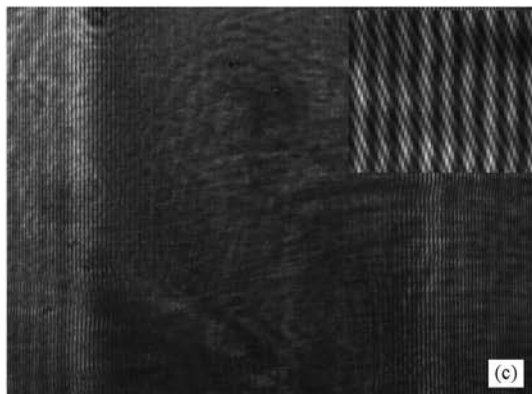
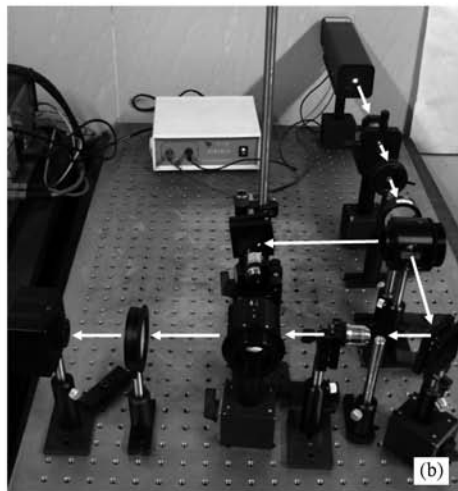
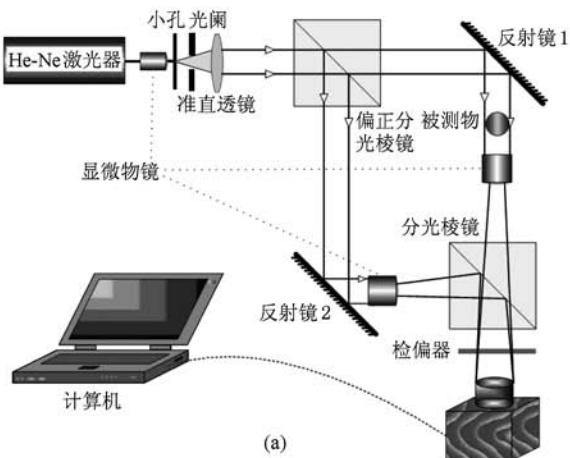


图8 数字全息图记录系统及得到的全息图和数值重建结果 (a) Mach-Zender 离轴干涉全息记录系统示意图,(b) 实验装置照片,(c) 数字全息图,(d) 全息图数值重建波前相位,(e) 重建相位的截面图

#### 4.1.2. 全息层析重建结果及分析

层析重建过程分为两步. 第一步, 先将全息图数值重建相位分为 212 层断面, 断面厚度为  $2.84 \mu\text{m}$ . 从中提取一个断面信息作为  $0^\circ$  视角投影数据, 如图 8(e) 所示. 以  $0^\circ$  视角投影数据作为其他各视角投影数据, 获得三向 ( $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ ) 投影数据. 为便于比较, 同时提取了四向 ( $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ ) 投影数据, 如图 9(a), (b) 所示. 每个投影方向上的投影射线数是 71 条, 射线宽度为  $2.84 \mu\text{m}$ . 第二步, 实现迭代重建, 包括断面折射率的重建和光纤三维结构

的重建. 迭代重建中加权因子采用非线性加权取值方式, 松弛因子取 0.5. 图 10 为数字全息层析重建结果, 其中图 10(a) 和 (c) 分别为三向投影重建光纤断面折射率三维图和断面折射率截面图, 图 10(b) 和 (d) 分别为四向投影重建光纤断面折射率三维图和断面折射率截面图. 同样重建各断面, 然后进行断面叠加, 得到光纤三维结构分布, 图 10(e) 和 (f) 分别为三向投影重建 212 层断面叠加光纤三维结构图和四向投影重建 212 层断面叠加光纤三维结构图.

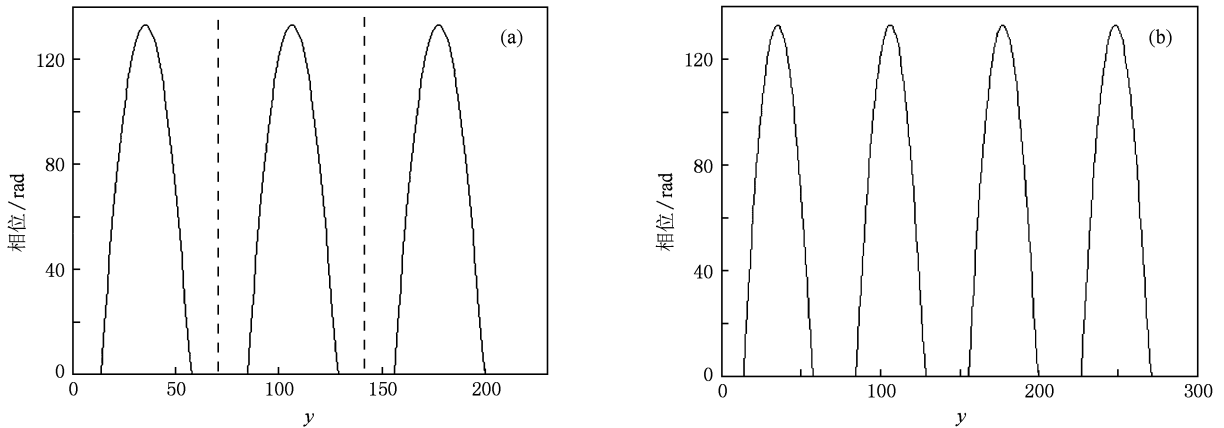


图 9 光纤断面投影合成图 (a) 三向投影合成图, (b) 四向投影合成图

光纤断面折射率在 1—1.5 之间呈渐变趋势, 纤芯处折射率最高, 向包层方向折射率逐渐下降. 由于采用少量投影, 冗余数据不足, 使得折射率略呈阶梯渐变特征. 三向投影重建光纤断面直径为  $122.12 \mu\text{m}$  ( $43 \times 2.84 \mu\text{m}$ ), 四向投影重建光纤断面直径为  $124.96 \mu\text{m}$  ( $44 \times 2.84 \mu\text{m}$ ). 光纤断面折射率分布及层析重建光纤断面直径参数与光纤样本参数基本相符.

#### 4.2. 非轴对称结构的被测物体层析重建实验及结果分析

本文针对具有非轴对称结构的石膏头像也开展了实验研究, 实验原始样本是一石膏头像, 如图 11(a) 所示, 头像高度为 220 mm. 利用条纹投射技术及数据处理技术获取石膏头像三维轮廓的点云数据<sup>[23]</sup>, 尺寸为  $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm} \times 212 \text{ mm}$  (头像头顶因光源遮挡, 无法获得相应数据), 如图 11(b) 所示. 为便于重建, 头像尺寸被压缩为  $71 \times 71 \times 212$ , 沿  $z$  轴方向的高度共分为 212 个断面, 每一个断面厚度

为 1 mm. 设头像内部介质的折射率为 2, 外部空气的折射率为 1, 对每个断面进行四向投影, 投影角度分别取  $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  (以竖直方向为起点, 按照逆时针方向取值), 每个投影方向的投影射线数为 71 条. 图 11(d) 为头像第 101 层断面投影示意图.

##### 4.2.1. 数字全息图获取及其数值重建

利用菲涅耳算法计算获得相应的四幅计算全息图<sup>[23]</sup>, 结果如图 12 所示. 同样利用菲涅耳全息重建算法实现了全息图的数值重建, 结果如图 13 所示.

##### 4.2.2. 全息层析重建结果及分析

投影重建中权因子同样采用非线性加权取值方式, 松弛因子取 0.5. 为了便于比较, 实现了石膏头像三向 ( $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ ) 投影重建和四向 ( $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ ) 投影重建. 第 101 层断面结构重建结果如图 14 所示, 结构图也反映了头像内部为单一折射率分布, 与实际设置相符合. 由于被测样本具有复杂面型特征, 三向投影重建断面结构边缘区域存在较明显的伪影, 四向投影重建断面结构边缘区域伪影



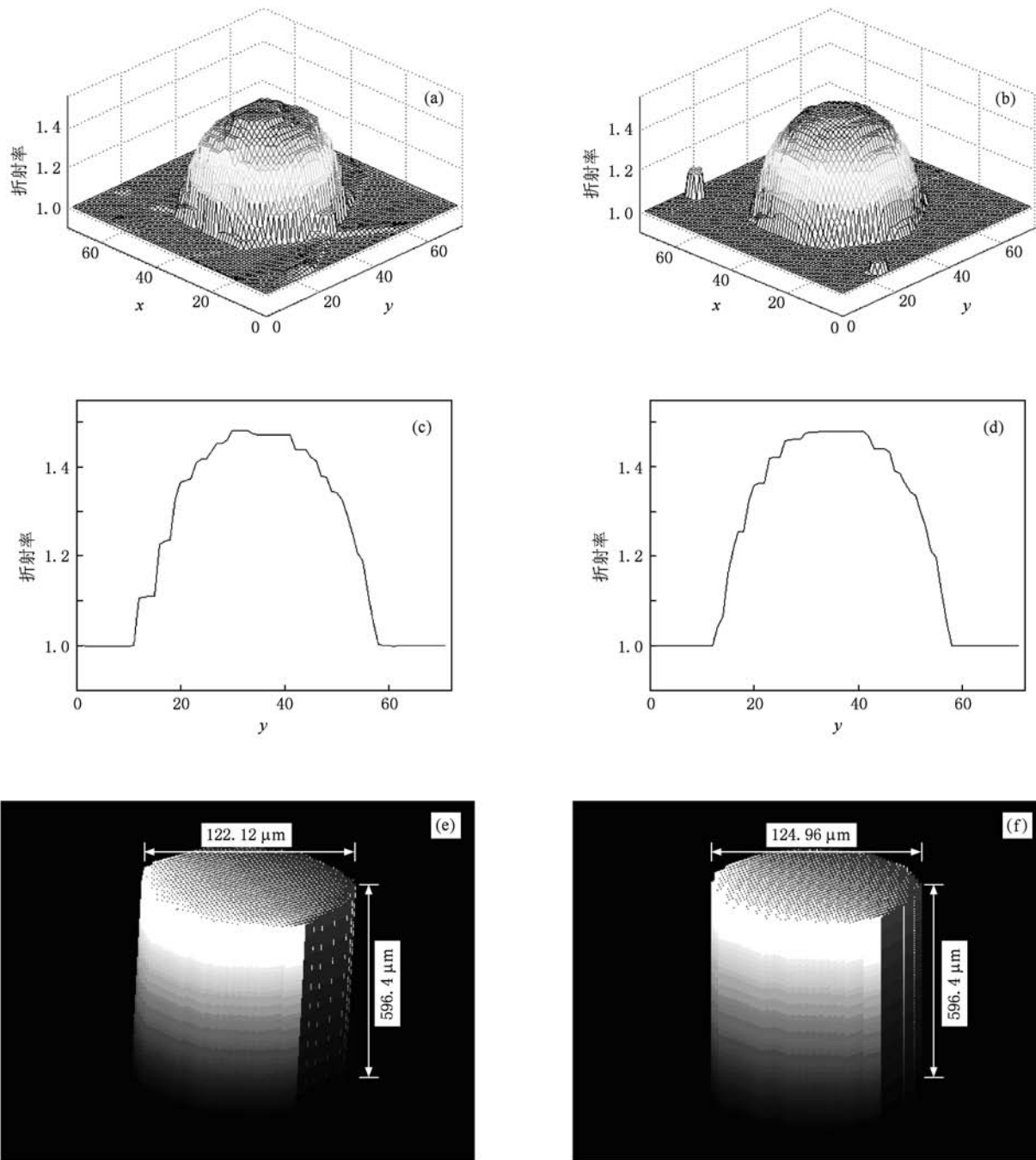


图 10 光纤数字全息层析重建结果 (a) 三向投影重建光纤断面折射率三维图, (b) 四向投影重建光纤断面折射率三维图, (c) 三向投影断面折射率的截面图, (d) 四向投影断面折射率的截面图, (e) 三向投影重建、212 层断面叠加光纤三维结构图, (f) 四向投影重建、212 层断面叠加光纤三维结构图

则得到了很好的抑制。

实现 212 层断面重建并逐层叠加, 得到石膏头像三维结构的重建结果, 如图 15 所示, 其中图 15 (a) 是三向投影、212 层断面叠加重建三维结构图, 图 15 (b) 是四向投影、212 层断面叠加重建三维结

构图. 结果表明, 对于非轴对称结构的被测样本, 增加一向投影数据, 重建质量就能得到提高, 如图 15 (b) 的石膏头像重建质量要好于图 15 (a) 所示的重建结果。

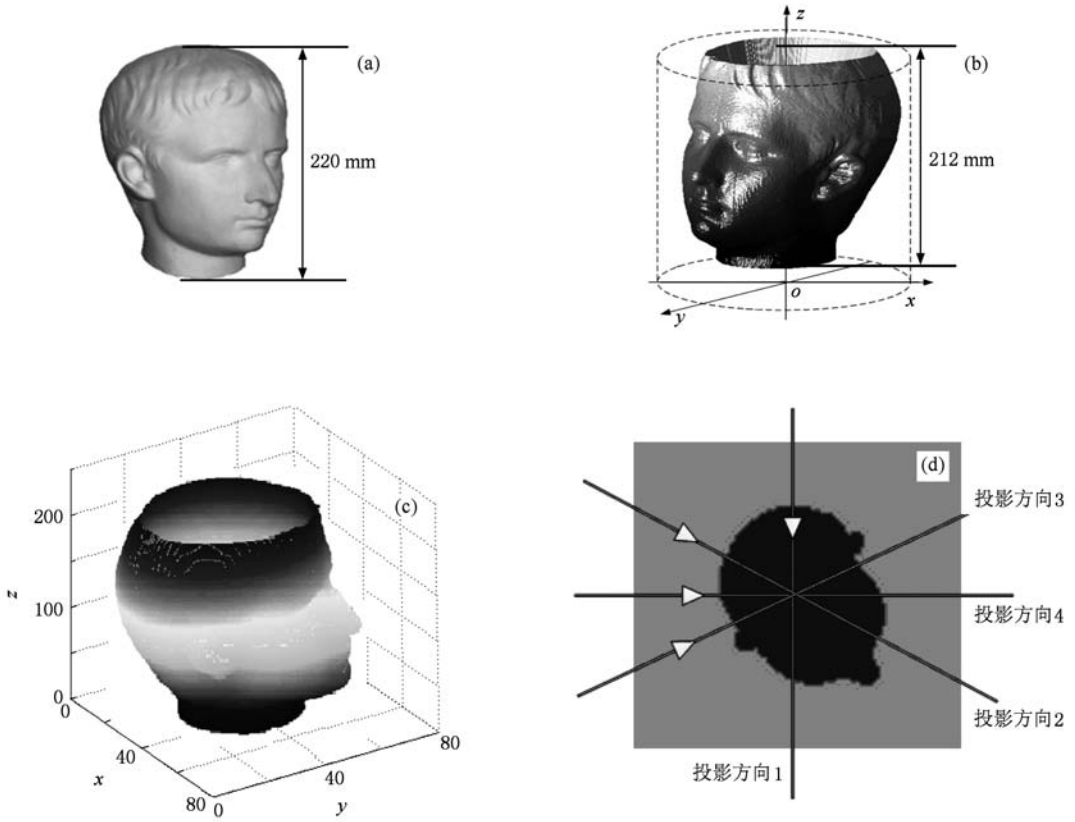


图 11 原始石膏头像、头像三维轮廓点云数据、数据压缩后的三维头像和第 101 层断面投影示意图 (a) 原始石膏头像, (b) 点云数据图, (c) 数据压缩后的三维头像, (d) 第 101 层断面投影示意图

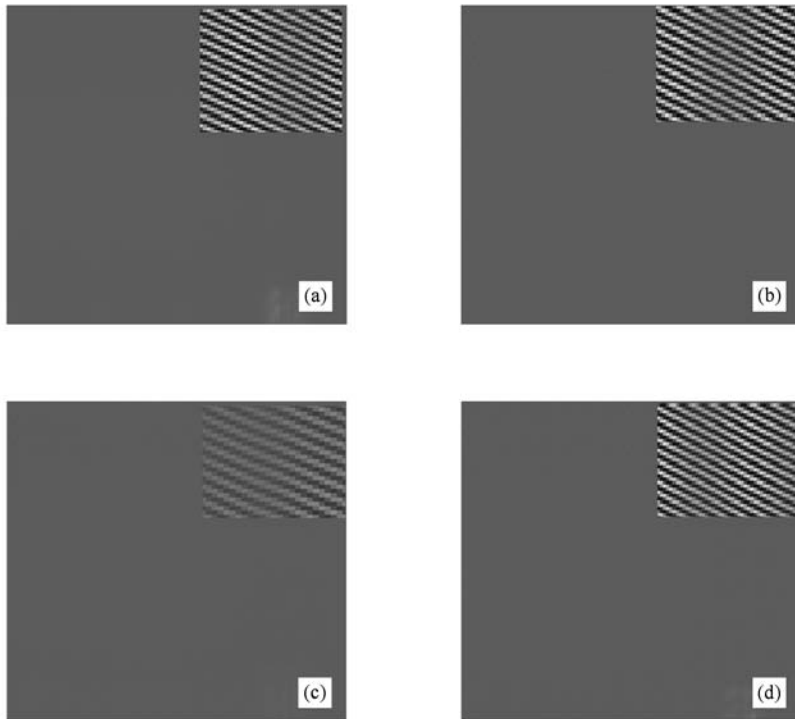


图 12 四向投影计算全息图 (a) 0°, (b) 60°, (c) 90°, (d) 120°

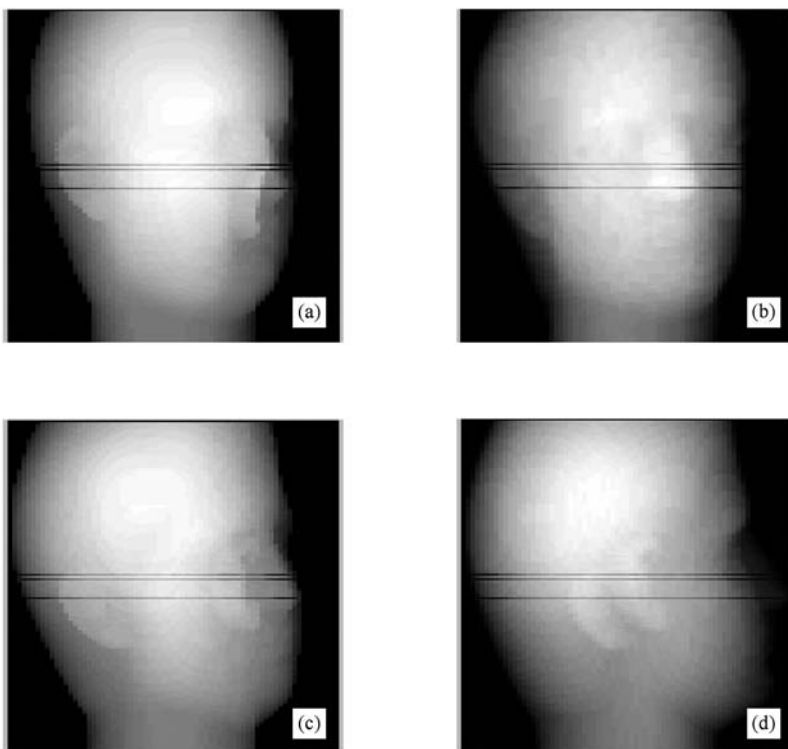


图 13 计算全息图数值重建相位二维分布图 (a) 0°, (b) 60°, (c) 90°, (d) 120°

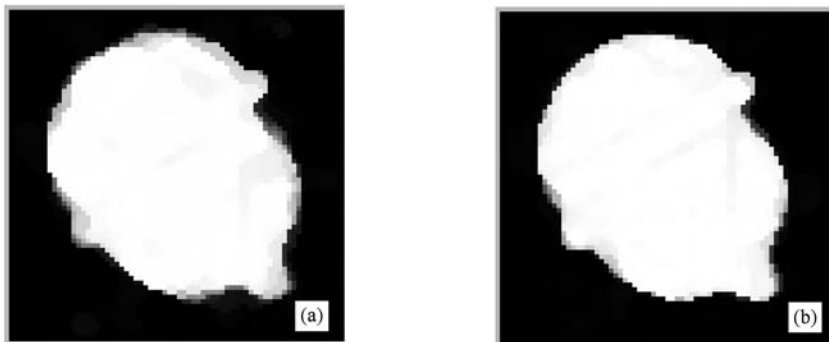


图 14 石膏头像第 101 层断面结构重建结果 (a) 三向投影重建断面结构图, (b) 四向投影重建断面结构图

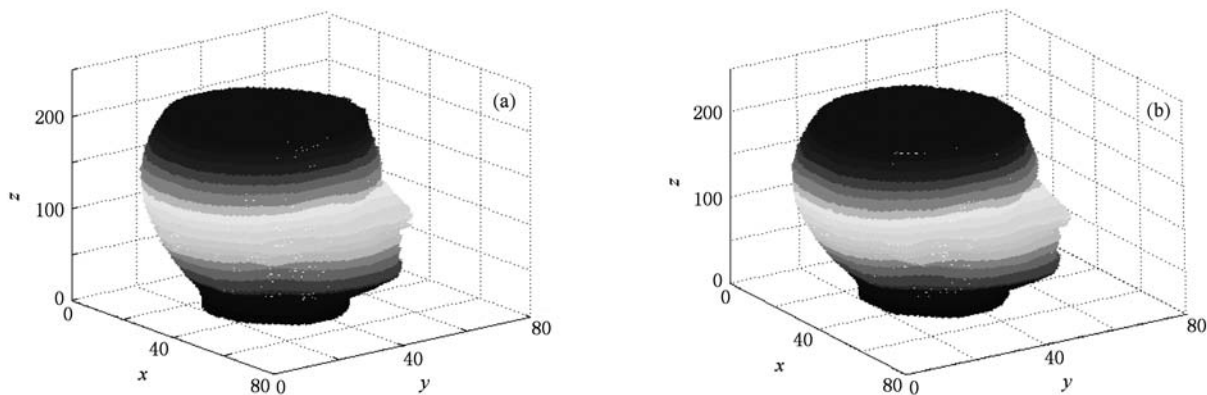


图 15 212 层断面叠加头像三维结构重建结果 (a) 三向投影、212 层断面叠加重建头像三维结构图, (b) 四向投影、212 层断面叠加头像重建三维结构图

## 5. 结 论

本文开展了少量投影数字全息层析重建的模拟分析和实验研究. 研究表明, 加权因子  $w_j$  和松弛因子  $\zeta$  对层析重建图像质量影响明显, 松弛因子  $\zeta$  同时也影响重建速度. 无论被测物体具有轴对称结

构或非轴对称结构, 少量投影数字全息层析重建方法都是可行的, 也是有效的. 但对于具有多层折射率被测物体或非轴对称被测物体, 要获得高质量层析重建图像, 尚需要在现有投影重建算法基础上研究新的投影重建方法. 下一步将针对生物样本的内部多层折射率检测开展单幅层析全息图实现数字全息层析重建技术研究.

- [1] Wang J Y, Zhu P P, Zheng X, Yuan Q X, Tian Y L, Huang W X, Wu Z Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1172 (in Chinese) [王寓越、朱佩平、郑欣、袁清习、田玉莲、黄万霞、吴白玉 2005 物理学报 **54** 1172]
- [2] Qu W J, Liu D A, Zhi Y N, Luan Z, Liu L R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4276 (in Chinese) [曲伟娟、刘德安、职亚楠、栾竹、刘立人 2006 物理学报 **55** 4276]
- [3] Yuan C J, Zhai H C, Wang X L, Wu L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 218 (in Chinese) [袁操今、翟宏琛、王晓雷、吴兰 2007 物理学报 **56** 218]
- [4] Yu Y J, Wang T, Zheng H D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3154 (in Chinese) [于瀛洁、王涛、郑华东 2009 物理学报 **58** 3154]
- [5] Li J C, Zhang Y P, Xu W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5385 (in Chinese) [李俊昌、张亚萍、许蔚 2009 物理学报 **58** 5385]
- [6] Zhou W J, Yu Y J, Ni P 2008 *Opt. Prec. Eng.* **16** 899 (in Chinese) [周文静、于瀛洁、倪萍 2008 光学精密工程 **16** 899]
- [7] Zhou W J, Xu Q S, Yu Y J, Asundi A 2009 *Opt. Laser Eng.* **47** 896
- [8] Zhou W J, Yu Y J, Asundi A 2009 *Opt. Laser Eng.* **42** 264
- [9] Chen L P, Lu X X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 189
- [10] Shi D F, Chen S H 1995 *Appl. Opt.* **34** 3064
- [11] Li J C, Xiong B H 2005 *Chin. J. Lasers* **32** 252 (in Chinese) [李俊昌、熊秉衡 2005 中国激光 **32** 252]
- [12] Charrière F, Pavillon N, Colomb T, Depeursinge C, Heger T J, Mitchell E A D, Marquet P, Rappaz B 2006 *Opt. Express* **14** 7005
- [13] Charrière F, Marian A, Montfort F, Kuehn J, Colomb T, Cuche E, Marquet P, Depeursinge C 2006 *Opt. Lett.* **31** 178
- [14] Montfort F, Colomb T, Charrière F, Kuehn J, Marquet P, Cuche E, Herminjard S, Depeursinge C 2006 *Appl. Opt.* **45** 8209
- [15] Bilski B J, Jozwicka A, Kujawinska M 2007 *Proc. SPIE* 6672 66720A1
- [16] Massatsch P, Charrière F, Cuche E, Marquet P, Depeursinge C 2005 *Appl. Opt.* **44** 1807
- [17] Yu L F, Chen Z P 2007 *Opt. Lett.* **32** 3005
- [18] Kou S S, Sheppard C J R 2008 *Opt. Lett.* **33** 2362
- [19] Schnars U, Juptner W P O 2002 *Meas. Sci. Technol.* **23** 85
- [20] Zhou W J, Xu Q S, Yu Y J 2010 *Acta Photon. Sin.* **39** 1257 (in Chinese) [周文静、徐强胜、于瀛洁 2010 光子学报 **39** 1257]
- [21] Zhang K, Zhu P P, Huang W X, Yuan Q X, Liu L, Yuan B, Wang J Y, Shu H, Chen B, Liu Y J, Li E R, Liu X S, Wu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3410 (in Chinese) [张凯、朱佩平、黄万霞、袁清习、刘力、袁斌、王寓越、舒航、陈博、刘宜晋、李恩荣、刘小松、吴白玉 2008 物理学报 **57** 3410]
- [22] Wang X, Chen Z Q, Xiong H, Zhang L 2005 *Nucl. Electron. Detec. Technol.* **25** 784
- [23] Zheng H D, Yu Y J, Wang T, Asundi A 2008 *Proc. SPIE* 7000 70001U

# Experimental study of digital holographic tomography by a few projections<sup>\*</sup>

Zhou Wen-Jing<sup>†</sup> Hu Wen-Tao Guo Lu Xu Qiang-Sheng Yu Ying-Jie

(*Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

(Received 21 January 2010; revised manuscript received 15 July 2010)

## Abstract

Digital holographic tomography by a few projections is developed. A section of fiber with symmetrical structure and a plaster head model with nonsymmetrical structure are used as test samples. Both simulation analysis and experimental results are analyzed. Simulation analysis shows that the weighted coefficient  $w_{ij}$  and the relaxation factor  $\lambda$  affect evidently the quality of the reconstructed image, in addition, the relaxation factor  $\lambda$  also influences the computer speed. Thus the weighted coefficient  $w_{ij}$  is evaluated by using a nonlinear method and the relaxation factor  $\lambda$  is selected appropriately by comparing several simulation reconstructions. Experimental results reveal the feasibility and the availability of digital holographic tomography by a few projections for symmetrical samples and nonsymmetrical one. In the next work, the real time digital holographic tomography based on three projections and single hologram will be developed to reconstruct the multi-refractive index of biological samples.

**Keywords:** digital holographic technique, tomographic technique, a few projections, algebraic reconstruction technique

**PACC:** 4240K, 4225B

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Scientific Research Program for Postdoctor of Shanghai, China (Grant No. 09R21412900), the International Science and Technology Cooperation Program of the Science and Technology Committee of Shanghai, China (Grant No. 09530708700) and the Innovation Foundation for the Graduate Student of Shanghai University, China (Grant No. SHUCX092195).

<sup>†</sup> E-mail: lazybee@shu.edu.cn