

doi: 10.3788/gzxb20144305.0509003

# 纯相位菲涅尔全息图的反馈迭代算法及其硅基液晶显示

刘凯峰, 沈川, 张成, 韦穗

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

**摘 要:**研究了纯相位菲涅尔计算全息图的制作方法,给出了一种生成纯相位菲涅尔计算全息图的算法.首先研究了菲涅尔衍射的数值模拟算法,分析了两种数值模拟算法的计算速度.将计算速度较快的菲涅尔衍射数值模拟算法和迭代算法相结合,并引入比例反馈,得到纯相位菲涅尔计算全息图的反馈迭代算法.其次,对比例反馈系数的选取进行了实验研究,得到其最优经验值范围,然后进行了仿真实验.仿真结果表明,该算法降低了重构误差,提高了全息图重构质量.最后基于新型空间光调制器反射型硅基液晶,建立了全息显示光电实验系统,对该算法进行了验证.

**关键词:**全息显示;纯相位全息图;反馈迭代算法;菲涅尔衍射;硅基液晶

中图分类号:O438

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)05-0509003-6

## Iterative Feedback Algorithm for Phase-only Fresnel Hologram and Display Using Liquid Crystal on Silicon

LIU Kai-feng, SHEN Chuan, ZHANG Cheng, WEI Sui

(Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** A method of produce phase-only Fresnel Computer Generated Hologram (CGH) was researched, and an algorithm for the phase-only Fresnel CGH was presented. Firstly, numerical simulation algorithm of Fresnel diffraction was studied. Computation speed of two numerical simulation algorithms was analyzed. The iterative feedback algorithm of phase-only Fresnel CGH was obtained by combination of the iterative algorithm and Fresnel diffraction numerical simulation algorithms and the proportional feedback. Secondly, experimental research of selection of proportional feedback factor  $k$  was given and the optimal empiric value of  $k$  was obtained. Simulation results show that reconstruction noise is reduced and the quality of the reconstructed image is improved. Finally, an experimental system for hologram display based on liquid crystal on silicon was built and the algorithm was verified by the optoelectronic experiment.

**Key words:** Holographic display; Phase-only hologram; Iterative feedback algorithm; Fresnel diffraction; Liquid Crystal On Silicon (LCOS)

**OCIS Codes:** 090.2870; 090.1970; 090.1760; 070.7345; 070.6120

## 0 引言

全息显示被认为是解决三维立体显示的终极方案<sup>[1]</sup>.用计算机制作全息图是利用计算机的强大计算

能力将全息过程数字化<sup>[2]</sup>,使得全息图制作更具灵活性,是一种更为广义的数字全息术,是目前全息显示领域研究的热点<sup>[3-7]</sup>.为了得到清晰的重构图像,首先要获得高质量的全息图.纯相位全息图因其无共轭像、衍

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61201396,61301296,61377006)、高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20113401130001)和 NSFC-广东联合基金(No. U1201255) 资助

第一作者:刘凯峰(1972-),男,博士研究生,主要研究方向为计算全息与全息显示. Email: kfliu@ahu.edu.cn

导师(通讯作者):韦穗(1946-),女,教授,博导,主要研究方向为计算视觉与三维全息显示等. Email: swei@ahu.edu.cn

收稿日期:2013-08-22;录用日期:2013-11-08

<http://www.photon.ac.cn>

射效率高受到高度关注并得到应用<sup>[8-11]</sup>. Benton 在《Holographic Imaging》中指出<sup>[12]</sup>, 由于成像在远场的傅里叶全息图提供视差少, 不能充分表现三维立体图像的丰富信息, 有多衍射极(包括亮的零级), 不适合全息显示, 主要用来做全息储存. 而非涅尔全息图可提供更大的显示角度和更高的空间分辨率, 能够重构出深的三维场景. 因此, 对于三维立体显示来说, 纯相位菲涅尔全息图应该是最合适的.

张浩等<sup>[13]</sup>用点源法和波面法制作纯相位菲涅尔全息图. 点源法计算量大, 不适合复杂物体. 波面法直接提取菲涅尔衍射面的相位作为全息图, 这种方法抛弃了波阵面的振幅, 丢失了很多有用信息. 日本千叶大学的 Tomoyoshi Shimobaba 等将点源法和波面法相结合, 利用查找表技术, 提高了计算速度, 但由于丢失了很多信息, 显示质量并不理想<sup>[14]</sup>. 为了提高重构质量, 应尽量保留有用信息, 可以借鉴吉奇伯格-撒克斯根(Gerchberg-Sarton, GS)迭代算法进行多次迭代<sup>[15]</sup>, 使得纯相位全息图不但保留相位信息, 也尽量保留振幅信息. 波兰华沙科技大学的 Michal Makowski 等基于迭代算法研究了多平面全息显示和彩色全息显示<sup>[16-17]</sup>. 本文将菲涅尔衍射数值算法和迭代方法相结合, 提出一种反馈迭代算法, 用于计算纯相位菲涅尔全息图. 该算法能显著地降低重构噪音, 提高全息再现像的视觉效果. 搭建了基于纯相位型硅基液晶的全息显示光电实验系统对本文提出的算法进行验证, 最终的光电重构实验达到了预期的效果.

## 1 菲涅尔衍射数值算法

在标量衍射近似和近轴传播近似下, 菲涅尔衍射(Fresnel Diffraction, FD)表示为

$$u(x, y) = \frac{1}{j\lambda z_0} \iint_{\Sigma} O(x_0, y_0) \cdot \exp \left[ j \frac{\pi}{\lambda z_0} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right] dx_0 dy_0 \quad (1)$$

式中,  $O(x, y)$  为物波场,  $u(x, y)$  为非涅尔衍射光波场,  $\lambda$  为波长,  $z$  为衍射距离. 对式(1)离散化后可得到一个双重离散积分公式. 若对此双重离散积分公式直接进行计算, 运算量大, 计算困难, 在实际的运算中很少使用. 实际运算常常采用卷积法和傅里叶积分法<sup>[18]</sup>.

在菲涅尔衍射积分公式(1)中, 展开积分的指数因子可得

$$u_c(x, y) = P_z(x, y) \iint u_0(x_0, y_0) P_z(x_0, y_0) \cdot \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda z} (xx_0 + yy_0) \right] dx_0 dy_0 \quad (2)$$

式中,  $P_z(x, y) = \exp \left[ j \frac{\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2) \right]$ .

这样, 菲涅尔衍射积分即可由  $u_0(x_0, y_0) \cdot P_z(x_0, y_0)$  的傅里叶变换求出, 计算的结果是一个复波场. 由

于数值计算菲涅尔衍射积分的卷积方法需要两次傅里叶变换, 而傅里叶变换方法只要一次, 因此, 傅里叶变换方法的计算时间比卷积方法更快, 因而本文采用傅里叶变换方法来进行菲涅尔衍射数值计算.

## 2 纯相位菲涅尔全息图算法

### 2.1 纯相位菲涅尔全息图单次衍射算法

利用菲涅尔衍射的数值算法, 对物波进行菲涅尔衍射数值计算, 把得到的衍射复波场的相位保留, 其振幅限定为单位值(相当于抛弃振幅), 则可得到一种纯相位菲涅尔全息图. 该方法为获得纯相位菲涅尔计算全息图的单次菲涅尔衍射算法. 在文献[6]中, 采用此方法产生了纯相位菲涅尔计算全息图, 但是质量不高.

### 2.2 纯相位菲涅尔全息图反馈迭代算法

采用单次菲涅尔衍射算法获得的纯相位菲涅尔全息图, 由于丢弃了振幅, 也就损失了大量有用信息, 成像质量较差. 为了保留更多有用信息, 可以采用迭代方法. 最早使用的 GS 迭代算法能从两个振幅中恢复相位, 但是收敛速度很快就停滞不前. Fienup 提出改进的输入输出算法, 加快了收敛速度<sup>[19]</sup>. 通常把以上两种算法统称为高斯滤波(Gaussian Smoothing Filter, GSF)算法. 但是, 这两种方法都只是恢复物体的相位, 不是产生全息图. 如果直接将恢复的相位作为全息图, 同样丢弃了振幅信息, 全息图质量不高. 同时, 采用 GSF 方法得到的全息图为傅里叶全息图. 为了获取菲涅尔全息图, 用菲涅尔衍射替换 GSF 算法中的傅里叶变换, 并对迭代过程中频域的振幅约束加以改进, 从而迭代出菲涅尔纯相位全息图. 虽然通过多次迭代能得到更高质量的全息图, 但是, 在实时计算中, 迭代次数不可能很大, 否则将消耗太多时间. 在有限的迭代次数内, 为了提高全息图的质量, 采用了反馈迭代算法(Iterative Feedback Algorithm, IFA). 本文采用的反馈迭代算法的基本流程如图 1.

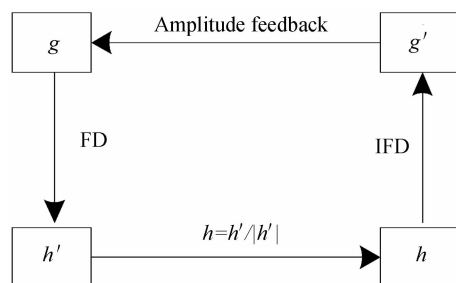


图 1 反馈迭代菲涅尔算法  
Fig. 1 Diagram for IFA

其基本计算公式为

$$h'_n = \text{FD}(g_{n-1}) \quad (3)$$

$$h_n = \frac{h'_n}{|h'_n|} \quad (4)$$

$$g'_n = \text{IFD}(h_n) \quad (5)$$

$$g_n = G_n \cdot \frac{g'_n}{|g'_n|} \quad (6)$$

$$G_n = f(G_0, g'_n) \quad (7)$$

式中 FD 代表菲涅尔衍射, IFD 代表逆菲涅尔衍射.  $g$  表示物面,  $h$  表示全息面. 式(3)表示对物面进行菲涅尔衍射得到像面复波场; 式(4)对此复波场振幅进行归一化, 获得纯相位像面复波场; 式(5)对纯相位的像面复波场进行逆菲涅尔衍射, 重构物面复波场. 若重构的物面复波场振幅与实际振幅相同, 即为完美重构. 实际上, 二者之间总是有误差. 式(6)表示对重构的物面复波场保留相位, 替换其振幅. 若用原物面振幅直接来替换, 即为 GS 算法. 本文采用式(7)的方法来计算新的物面振幅. 式(7)表示第  $n$  次迭代出的像平面  $g'_n$  的振幅被用来计算重构图像  $g'$  和物体图像  $G_0$  之间的误差, 误差被用来改变物面的振幅  $G_n$ .  $f$  是计算下一个目标  $G_n$  的反馈函数, 在下次迭代中增加噪音抑制. 许多函数可以用作反馈, 为了在复杂度和可执行度之间折中, 本文选择了比例反馈控制器, 即

$$G_n = G_0 + (G_0 - |g'_n|)k \quad (8)$$

振幅反馈控制采用式(8)的比例反馈控制,  $k$  为比例控制系数. 若  $k=0$  即为传统的纯相位傅里叶全息图 GS 迭代算法. 引入比例反馈后, 与传统的迭代算法相比, 正向传播的振幅不再是固定不变的常量, 迭代中考虑了由频域反向传播到空域的振幅和原始振幅的差值.

与输入输出算法相比, 本文算法用菲涅尔衍射代替了傅里叶变换, 用逆菲涅尔衍射代替了傅里叶反变换. 为了得到纯相位全息图, 频域的振幅始终约束为单位振幅, 空域的振幅约束按照式(6)进行, 称为纯相位菲涅尔全息图的反馈迭代算法 (IFA). 由于光路可逆, 在反馈迭代过程中, 正向传播和反向传播的数值计算分别对应传播距离  $z$  和  $-z$ .

### 2.3 比例控制系数 $k$ 的选取

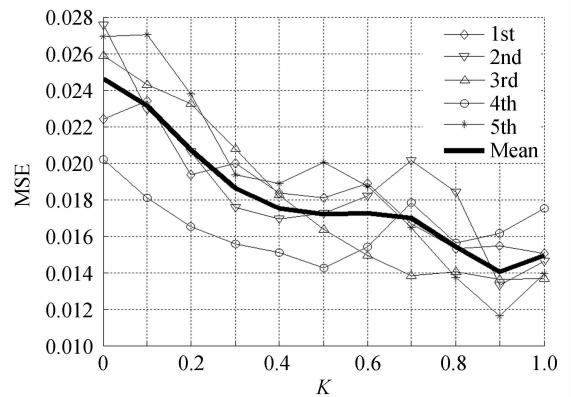
比例系数  $k$  的取值范围为  $0 \leq k \leq 1$ , 当  $k=0$  时, 没有反馈, 即为传统的纯相位傅里叶全息图 GS 迭代算法.  $k$  的不同取值会影响该算法的收敛速度和重构准确度. 下文通过实验来研究比例系数  $k$  对该算法的收敛速度和重构准确度的影响.

全息图的质量通过比较重构图和原始图的均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 来度量.

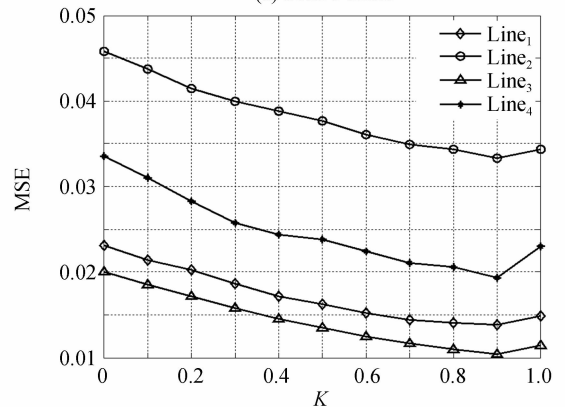
$$E_0^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |g_n(x) - G_0(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |G_0(x)|^2 dx} \quad (9)$$

理论上, 当均方差为 0 时, 全息图完美重构, 迭代结束. 因此, 在迭代过程中, 该误差作为算法是否停止的判断标准. 但是, 在实际迭代计算中, 均方差往往得不到 0, 或者计算时间太长, 因此常常取一个满意的值

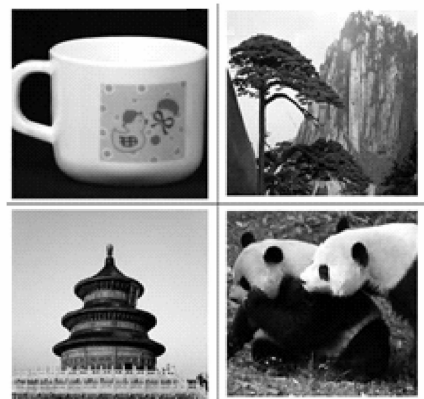
即可. 考虑到实时计算时, 迭代次数不可能太多, 这里迭代次数取 20 次. 图 2(a) 中每个点为每个  $k$  值迭代 20 次后重构图的均方误差, 一条曲线代表对  $k$  值从 0 到 1 的一次扫描. 图中给出了对图 3(a) 所示的  $1024 \times 1024$  的爱因斯坦头像灰度图片在衍射距离为 0.29 m 进行 5 次扫描得到的 5 条均方误差变化曲线, 图中粗线为 5 条曲线的平均值. 在实验过程中, 物体和衍射距离等参量不变, 仅仅改变比例系数  $k$ . 实验表明, 随着  $k$  从 0 向 1 增加, 在相同的迭代次数时, 均方误差的变化趋势是越来越小, 全息重构准确度越来越高. 但是, 并非  $k=1$  时误差最小, 另外选择如图 2(c) 所示的茶杯、



(a) Scan 5 times



(b) Mean value of scanning 100 times



(c) 4 objects

图 2 均方误差随  $k$  变化曲线  
Fig. 2 MSE vs  $k$

建筑、植物和动物等四种物体,在相同实验条件下对  $k$  从 0 到 1 重复扫描 100 次,其均方误差的平均值变化曲线如图 2(b) 所示. 由于图像差异,虽然四条曲线并不重合,但是他们的变化趋势基本相同. 因此,从图 2 的实验结果可知,  $k$  的最优经验值为 0.9 左右,本文实验取  $k=0.9$ .

### 3 实验

#### 3.1 数值模拟实验

利用迭代菲涅尔算法对  $1024 \times 1024$  的爱因斯坦头像灰度图片进行迭代计算. 用波长  $\lambda=532$  nm 的一致性绿光照明,衍射距离取 0.29 m. 每个像素大小为  $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ ,则衍射孔径边长为 12.288 mm. 由此计算

得到的菲涅尔数  $L=a^2/\lambda z \approx 979 \geq 1$ ,满足菲涅尔衍射条件. 把迭代得到的  $-\pi \sim \pi$  之间的相位值偏移至  $0 \sim 2\pi$  区间,再进行分阶编码得到纯相位菲涅尔全息图. 全息图数值模拟实验结果如图 3. (a) 为原始图像, (e) 为无反馈迭代 20 次后全息图, (b) 为 (e) 模拟冲构图. (f) 为反馈迭代 20 次后全息图, (c) 为 (f) 模拟重构图. 图 3(d) 为均方误差变化曲线,图中第一个点为第一次菲涅尔衍射后的误差值,即单次菲涅尔衍射算法的误差值. 由图 3(d) 可知,迭代次数相同时,本文采用的比例反馈迭代菲涅尔算法得到的全息图的误差明显下降,重构图质量明显提高. 本次实验迭代 20 次后,无反馈的  $\text{MSE}=0.020$ ,有反馈的  $\text{MSE}=0.012$ ,有反馈时的均方误差下降到无反馈时的 60%.

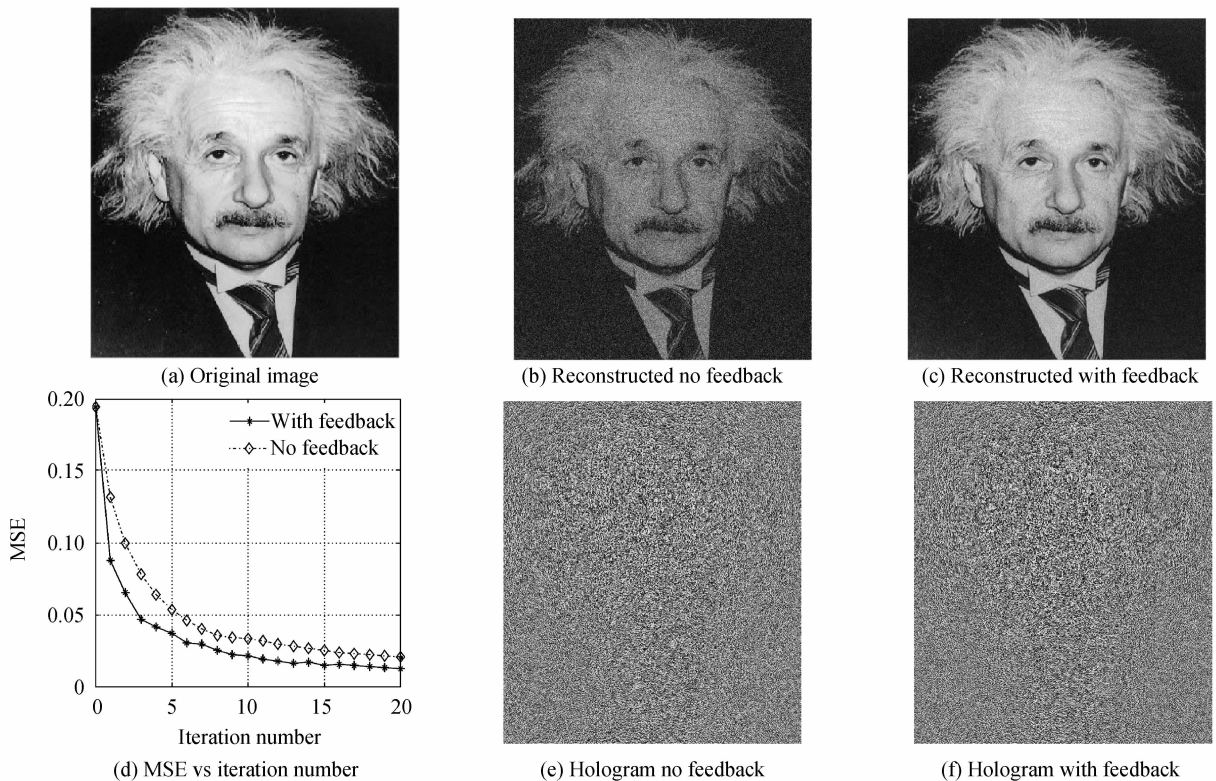


图 3 模拟实验

Fig. 3 Simulation experiments

另外,由图 3(d) 实验结果可知,采用比例反馈迭代算法时,迭代 10 次的全息图的质量已经优于无反馈算法迭代 20 次的质量. 也就是说,要制作相同质量的全息图,采用本文算法可以大大减少迭代次数.

#### 3.2 光电重构实验

用于纯相位全息图重构的空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 近来得到了快速发展. 数字微镜器件被韩超等用来重构纯相位全息图,但存在共轭像和亮的零级斑<sup>[20]</sup>. 相比较而言,液晶空间光调制器具有更大的优势. 硅基液晶 (Liquid Crystal On Silicon, LCOS) 是一种新型的反射式 SLM, 与传统的透射液晶相比,具有高集成度、高分辨率、高填充率、尺寸更小等

优点,计算全息研究逐渐采用纯相位 LCOS-SLM 来重构全息图.

为了验证本文所用算法,搭建了一套基于 LCOS 芯片的全息显示光电实验系统,系统装置如图 4 所示. 图中 A 为波长 532nm 的半导体激光器, B 为空间扩束滤波器, C 为对扩束后激光进行准直的透镜, D 为 LCOS 芯片及其驱动电路, E 和 G 为透镜, F 为带通滤波器. 使用的 LCOS 为 Three Five Systems 制造的 (型号为 MD1280) 芯片,分辨率为  $1280 \times 1024$ ,像素间距为  $12 \mu\text{m}$ ,填充率为 87%. 从激光器 A 发出的激光经 B 扩束滤波后,再经过准直透镜 C 获得均匀的平面光斑,照射到 LCOS 面板上. 光路中设置的 E、F、G 用来滤除

重构图像的零级斑和多级衍射,并可以调节重构图的大小<sup>[21]</sup>.当把图3(a)反馈迭代20次得到的全息图加载到LCOS后,光电重构结果如图5所示,(a)为未加滤波器时的重构像,(b)为用滤波器消除零级斑和高阶衍射后重构像.为了比较有无反馈两种方法的实际重构效果,对无反馈迭代20次得到的全息图也做了光电重构实验,其实验结果如图5(c).把两种光电重构结果分别与原图进行比较,计算出均方误差,无反馈时 $MSE=0.14$ ,有反馈时 $MSE=0.11$ .虽然纯相位全息图的重构图没有共轭像,但由于LCOS本身的像素结构以及有限的填充率,零级斑和高级衍射仍然存在,但可以通过采用文献[21]的方法在光路上采取措施来消除,以利于观察比较重构效果.

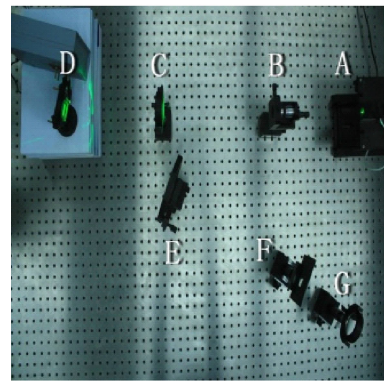


图4 全息显示实验系统  
Fig.4 Hologram display system

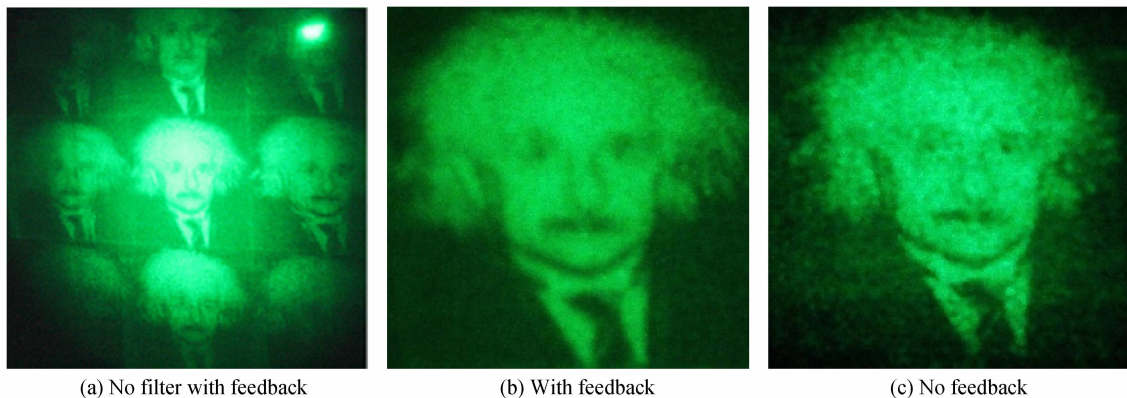


图5 光电重构实验结果

Fig.5 Optoelectronic reconstruction results

本文基于菲涅尔衍射迭代传播计算纯相位全息图,同样可应用于多平面成像,即采用不同平面的振幅作为约束分别进行反馈迭代传播,然后将对应于不同平面图像的复振幅相加,再提取相位,生成纯相位菲涅尔全息图,加载至硅基液晶上实现多平面图像的重构.

## 4 结论

本文研究了纯相位菲涅尔全息图的生成方法及其LCOS光电重构.菲涅尔衍射的傅里叶变换方法的计算时间比卷积方法更快,将这种数值算法和GSF迭代算法相结合,引入比例反馈,得到纯相位菲涅尔全息图的比例反馈迭代算法,并对反馈系数 $k$ 的选取进行了实验研究,得出 $k$ 的最优经验数据为0.9左右.仿真实验表明该算法提高了全息图的重构质量.搭建的基于新型空间光调制器纯相位LCOS的全息图光电重构系统验证了此算法的有效性.

### 参考文献

[1] BENZIE P, WATSON J, *et al.* A survey of 3DTV displays: techniques and technologies[J]. *IEEE Transaction on circuits and systems for video technology*, 2007, **17**(11): 1647-1658.  
[2] BROWN B R, LOHMANN A W. Complex spatial filtering with binary masks[J]. *Applied Optics*, 1966, **5**(6): 967-970.  
[3] SLINGER C H, CAMERON C, STANLEY M. Computer-

generated holography as a generic display technology [J]. *IEEE Computer*, 2005, **38**(8): 46-53.

- [4] MA Jian-she, XIA Fei-peng, 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.  
马建设, 夏飞鹏, 苏萍, 等. 数字全息三维显示关键技术与系统综述[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(5):1141-1152.  
[5] LIU Dao-jin, HUANG Su-juan. Computer generated holography based on 3-D fourier spectra[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2178-2182.  
刘道金, 黄素娟. 基于三维傅里叶频谱的计算全息图[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12):2178-2182.  
[6] SHI Yi-le, WANG Hui, WU Qiong, *et al.* Color matching of color computer generated Holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 104-109.  
施逸乐, 王辉, 吴琼, 等. 彩色计算全息颜色匹配的研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1):104-109.  
[7] XUE Dong-xu, YANG Yong, ZHANG Hui-min, *et al.* An improved algorithm for 3D reconstruction based on color CGHs of 3D objects using multiple projection view images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1542-1546.  
薛东旭, 杨勇, 张慧敏, 等. 一种改进型视角投影图像彩色计算全息术的三维重构算法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(10): 1542-1546.  
[8] LESEM L B, HIRSCH P M, JORDAN J A. The Kinoform: A new wavefront reconstruction device[J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1969, **13**(2): 150-155.  
[9] ZHENG Hua-dong, YU Ying-jie, *et al.* Computer generated

- kinofoms of real-existing full-color 3D objects using pure-phase look-up-table method [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(4): 568-573.
- [10] HUNT H C, WILKINSON J S. Kinoform microlenses for focusing into microfluidic channels [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(9): 9442-9457.
- [11] XU Fu-yang, LI Yong, JIN Hong-zhen, *et al.* Study on reconstruction of the kinoform with white-light illumination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 271-274.  
许富洋, 李勇, 金洪震, 等. 三维场景相息图的白光再现研究[J]光子学报, 2010, **39**(2): 271-274.
- [12] BENTON S A, BOVE V M. Holographic imaging [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, INC. , 2007, 207-208 .
- [13] ZHANG Hao, XIE Jing-hui, LIU Juan, *et al.* Optical reconstruction of 3D images by use of pure-phase computer generated holograms [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7** (12): 1101-1103.
- [14] SHIMOBABA T, NAKAYAMA H. Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display [J]. *Optics Express*, 2010, **18** (19): 19504-19509.
- [15] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237-246.
- [16] MAKOWSKI M. Three-plane phase-only computer hologram generated with iterative Fresnel algorithm [J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(12): 125805.
- [17] MAKOWSKI M. Experimental evaluation of a full-color compact lensless holographic display [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(23): 20840-20846.
- [18] DING Da-wei, WANG Nian, WEI Sui. Computer generation and digital reconstruction of fresnel hologram[J]. *Journal of Anhui University Natural Science Edition*, 2004, **28**(3): 15-18.  
丁大为, 王年, 韦穗. 菲涅耳全息图的计算机生成及数字重现[J]. 安徽大学学报自然科学版, 2004, **28**(3):15-18.
- [19] FIENUP J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(15): 2758-2769.
- [20] HAN Chao, WEI Sui. Digital micromirror device display of phase-only hologram of binary coding of cosine [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 659-663.  
韩超, 韦穗. 余弦二值编码纯相位全息图的数字微镜器件显示[J]. 光学学报, 2008, 28(4):659-663.
- [21] SHEN Chuan, ZHANG Cheng, LIU Kai-feng, *et al.* Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0309001.  
沈川, 张成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0309001.