

彩色数字全息波前重建算法概论

李俊昌

(昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650093)

摘要 基于单色 CCD 记录彩色数字全息图的光学系统及衍射的数值计算理论, 综合评述彩色数字全息波前重建的常用算法。对一种只适用于静态物理量检测的波前重建算法做了重要改进, 不但消除了频谱混叠对重建光波场的影响, 而且让该重建算法适用于动态物理量的实时数字全息检测。并将研究工作推广于彩色 CCD 记录彩色数字全息图的光学系统, 给出了三色光照明下重建物体彩色图像的实例。

关键词 数字全息; 彩色数字全息; 衍射计算; 波前重建算法

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0501001

Introduction of Digital Color Holographic Wavefront Reconstruction Algorithm

Li Junchang

(College of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract Based on the optical system using a monochrome charge coupled device (CCD) to record digital color hologram and diffraction's numerical calculation theory, the common algorithms for digital color holographic wavefront reconstruction is reviewed comprehensively, and an important improvement on an algorithm applied only to static physical detection is made. The improvement not only eliminates the frequency spectrum aliasing effect to the reconstructed wavefield, but also lets the algorithm appropriate for dynamic physical detection of real-time digital holography. Finally, the research work is promoted in the optical system, which using a color CCD to record digital color hologram, and gives an example of reconstructed object color image under illumination of three color lights.

Key words digital holography; digital color holography; diffraction calculation; wavefront reconstruction algorithm

OCIS codes 090.1705; 090.1995; 050.1940

1 引 言

随着计算机及 CCD 技术的发展, 特别是高性能彩色 CCD 探测器的出现, 用 CCD 代替全息感光板的彩色数字全息受到积极关注^[1]。虽然彩色数字全息重建像质量目前还低于数码相机直接拍摄的彩色图, 但是, 多种色光照明的实时数字全息能够有效记录复杂物理量的变化信息, 彩色数字全息的研究对于综合多种色光照明下的数字全息检测具有重要意义^[2,3]。

长期以来, 由于菲涅耳衍射积分的一次快速傅里叶变换计算(1-FFT 衍射计算)相对简单, 菲涅耳衍射积分不但用于单色光照明的波前重建(1-FFT

重建方法), 而且也是彩色数字全息波前重建的基本理论工具。近 10 年来, 人们用 1-FFT 重建方法分别对三基色光的物光场重建及合成彩色图像进行过大量研究, 有效提高了彩色重建图像的质量^[4~9]。然而, 由于物光场在 1-FFT 重建平面上的空间占有率较低, 为得到足够像素表述的物光场, 必须通过对全息图周边补零, 形成较大的全息图来进行重建计算, 有大量的冗余计算量^[10]。此外, 由于 1-FFT 重建场物理尺寸还随光波长、取样数及重建距离变化, 为统一不同色光的重建场尺寸, 也必须在全息图周边补零改变全息图的取样数再进行重建计算^[7,10~12]。但是, 补零是以像素为宽度单位进行的,

收稿日期: 2011-01-26; **收到修改稿日期**: 2011-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(60977007)资助课题。

作者简介: 李俊昌(1945—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光学理论及数值计算等方面的研究。

E-mail: jcli@vip.163.com

理论分析规定的补零数量通常又是非整数,因此,简单的补零操作在实际上不能得到物理尺寸准确统一的重建场。为最大限度地减小重建场尺寸的差别,T. Patrice^[13]基于文献[10]对离焦重建场点扩散函数的研究,提出对不同色光轻微离焦重建的方法(1-FFT 离焦重建法)。该方法有效减小了整数补零时引起的误差,然而,如何减小冗余计算,获得无插值误差的 1-FFT 波前重建方法,仍然是人们努力探索研究的课题。

2004 年,F. Zhang 等^[6]曾提出一种能够避免插值误差的算法,简称为 DBFT (the double Fresnel-transform algorithm)重建算法。该方法将波前重建距离分为两段,通过衍射的“接力”运算,在理论上得到精确统一尺寸的重建场。然而,对 DBFT 算法的研究表明,重建计算通常不满足取样定理,由此而引起的频谱混叠让重建图像上出现新的干扰,不利于准确的数字全息检测^[14]。此外,菲涅耳衍射积分是衍射问题的傍轴近似解^[15],在实际应用中会受到多种限制,探索更有效的方法仍然是人们研究的热点课题。

根据标量衍射理论,光波的衍射可以通过多种衍射公式进行计算^[15];在相同的计算精度下,角谱衍射公式能够以最少的取样数完成计算^[12]。因此,基于角谱衍射公式进行波前重建研究是获得高质量重建场的一种有效途径^[16]。由于角谱衍射公式计算后的光波场宽度与光波长及衍射距离无关^[12],成为彩色数字全息应用研究中人们可以采用的一种重要理论工具。然而,这种重建方法存在的主要问题是重建场尺寸受 CCD 面阵尺寸的限制。当物体投影尺寸远大于 CCD 面阵尺寸时,重建平面只能容纳物光场的局部区域。反之,当物体投影尺寸远小于 CCD 面阵尺寸时,重建物光场在重建平面上只有很少的像素描述。为实现大物体的物光场重建,人们通过补零操作,让全息图尺寸扩大到物体投影尺寸再进行重建^[17]。这种方法在理论上解决了统一不同色光重建场尺寸的问题,然而,由于计算机内存限制,当物体尺寸较大时,实际运算不能进行。为克服这个困难,人们曾提出物光场的拼接重建方法,即在全息图的频谱平面上扫描截取与 CCD 窗口尺寸相对应的局部物光场的频谱,逐一重建局部物光场,最后综合出整个物光场^[13,17]。然而,这种方法虽然解决了计算机内存限制的问题,仍然引入大量冗余计算,需要进行漫长的数值计算。

基于传统全息重建图像的经典研究^[15],提出用

球面波为重建波并用角谱衍射公式进行可变放大率波前重建的方法,能较好地满足彩色数字全息研究的需要^[18~20]。然而,相对于 1-FFT 重建,球面波重建法中零级衍射干扰表现出完全不同的形式^[21]。最近的研究表明,如果预先消除全息图中对波前重建形成干扰的分量,形成无干扰数字全息图,再用球面波照射作波前重建,就能有效消除干扰^[22]。由于形成无干扰数字全息图需要一次 FFT 及一次逆快速傅里叶变换 (IFFT) 计算,在球面波照射后获取频谱需要进行一次 FFT 计算,使用角谱衍射公式重建物光场时还需要一次 IFFT 计算,即需要 4 次 FFT 的计算量。为便于讨论,将这种方法称为 SPH4FFT 重建法。

如果将形成无干扰数字全息图的思想移植于 F. Zhang 提出的 DBFT 算法,同时,再在衍射接力计算的中间平面设置滤波窗,滤除不满足取样定理的衍射场,DBFT 算法就能够有效地重建无频谱混叠的物光场。由于形成无干扰数字全息图需要一次 FFT 及一次 IFFT 计算,衍射的接力计算还需要进行两次 FFT 计算,在计算机上也需 4 次 FFT 的计算量,将改进后的 DBFT 方法简称为 DDBFT 重建法。

为适应彩色数字全息研究的需要,本文以单色 CCD 同时记录两种色光数字全息图的光学系统为研究对象,对较有代表性的 1-FFT 离焦重建法、DDBFT 重建法以及 SPH4FFT 重建法做综述研究。并将研究结果推广于彩色 CCD 探测器一次性记录三基色全息图的光学系统,给出真彩色重建图像实例。

2 单色 CCD 一次性记录彩色全息图的光学系统及物光场的 1-FFT 重建

图 1 给出用单色 CCD 一次记录两种色光照明的数字全息图记录光路。入射激光分别被分束镜 PBS1 及 PBS2 分为两束光,其中反射光投向扩束系统经扩束及准直后,再被后续反射镜反射形成照明物光投射向物体。从物体表面散射的光波通过半反半透镜 BS2 到达 CCD 形成物光。从分束镜 PBS1 及 PBS2 透射的光波分别经两面全反镜反射、扩束及准直后,再经后续的反射及半反射镜形成与光轴 z 有微小夹角的光波到达 CCD 形成参考光。按照同样的方式,可以再增加一种色光,让光学系统成为

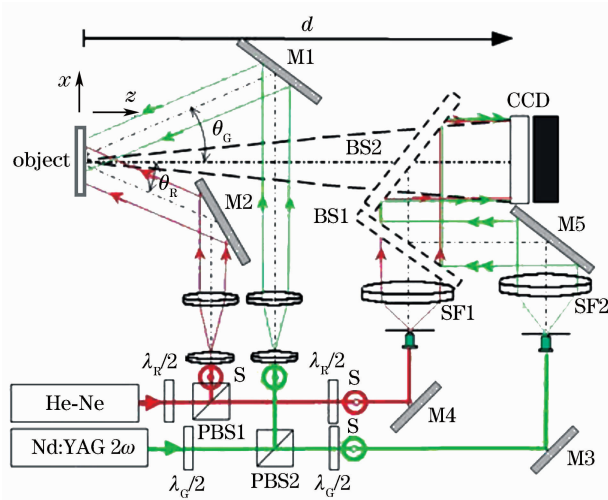


图 1 单色 CCD 记录彩色数字全息图的光学系统

Fig. 1 Optical system using a monochrome CCD to record digital color hologram

可以记录三基色激光照明的数字全息图记录系统^[1]。鉴于两种色光照明下的波前重建研究很容易推广于三色光及多种色光照明的情况,故现基于这两种色光照明光学系统进行研究。

实验中使用的激光波长分别为 $\lambda_R = 632.8 \text{ nm}$ 及 $\lambda_G = 532 \text{ nm}$, CCD 像素宽度 $\Delta x = \Delta y = 4.65 \mu\text{m}$, 能采集 $1024 \text{ pixel} \times 1360 \text{ pixel}$ 的全息图。被测量物体是高度约 40 mm 的中国古代仕女陶瓷头像, 物体到 CCD 的距离 $d = 1320 \text{ mm}$ 。通过对两种色光参考光角度的调整, 采用 $N \times N = 1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的数字全息图进行 1-FFT 波前重建时, 让红光及绿光的重建像分别在重建平面的第一及第二象限。

令全息图平面为 xy 平面, 全息图为 $I_H(x, y)$, 则重建平面光波场为

$$U_i(x_i, y_i) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp\left[\frac{jk}{2d}(x_i^2 + y_i^2)\right] \times \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ I_H(x, y) \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y^2)\right] \right\} \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{x_i}{\lambda d}x + \frac{y_i}{\lambda d}y\right)\right] dx dy, \quad (1)$$

式中 $j = \sqrt{-1}$, λ 为光波长, $k = 2\pi/\lambda$ 。

按照 1-FFT 计算的理论, (1) 式重建的像平面的像素宽度为^[10~12]

$$\Delta x_i = \Delta y_i = \frac{\lambda d}{N \Delta x}, \quad (2)$$

根据(2)式, 红绿两种色光重建平面的宽度分别为 $L_{0R} = \lambda_R d / \Delta x = 179.6 \text{ mm}$, $L_{0G} = \lambda_G d / \Delta x = 151.0 \text{ mm}$ 。如果要利用重建图像合成彩色图, 必须

统一不同色光重建场的物理尺寸。

3 1-FFT 离焦重建法

由(2)式知, 当 CCD 给定后, 如果要统一两种色光在重建平面的像素宽度, 可以通过改变取样数 N 或距离 d 来实现^[7,8]。然而, 改变距离 d 不但让光学系统的调整变得十分繁杂, 而且不能进行实时检测。因此, 通常采用改变取样数进行波前重建的方案^[9]。

令红色光及绿色光 1-FFT 重建平面上像素的宽度分别为 $\Delta x_R, \Delta x_G$, 若两像素的宽度相等, 两种色光全息图的取样数 N_R, N_G 应满足

$$\Delta x_R = \frac{\lambda_R d}{N_R \Delta x} = \frac{\lambda_G d}{N_G \Delta x} = \Delta x_G, \quad (3)$$

$$\text{即 } \frac{\lambda_R}{N_R} = \frac{\lambda_G}{N_G}。$$

对于所研究的实验, 有

$$\frac{N_R}{N_G} = \frac{\lambda_R}{\lambda_G} = 1.189473. \quad (4)$$

不难看出, 给定 N_R 或 N_G 后, 很难得到整数的 N_G 或 N_R 。当 N_G 给定时, 通常选择 N_R 的整数值即 $N_R = \text{Int}(1.189473 \times N_G)$ 进行重建计算, 重建平面上像素的宽度不严格一致。

为减小不同色光重建像的像素宽度差异, T. Patrice^[13] 提出一种 1-FFT 离焦重建法。该方法通过轻微调整不同色光的重建距离, 较好地统一重建平面上像素的宽度, 即将(3)式写成

$$\frac{\lambda_R d_R}{N_R} = \frac{\lambda_G d_G}{N_G}. \quad (5)$$

令 $N_R = 1.189 \times N_G$, 以及

$$\begin{cases} d_R = \frac{2d\lambda_G \times 1189}{1000\lambda_R + \lambda_G \times 1189}, \\ d_G = 2d - d_R \end{cases}, \quad (6)$$

则能较好地统一重建平面上像素的宽度。Pascal 等^[10] 证明, 虽然离焦重建时重建系统的点扩散函数将展宽, 但展宽量远小于重建图像的像素宽度。因此, 1-FFT 离焦重建法能显著减小不同色光重建图像像素宽度的差异。

令 $N_G = 2500$, 求得 $N_R = 2975$, $d_R = 1320.3 \text{ mm}$ 及 $d_G = 1319.7 \text{ mm}$ 。图 2 给出了 CCD 采集的 $1024 \text{ pixel} \times 1360 \text{ pixel}$ 全息图周围补零形成的绿光及红光全息图。图 3 给出了两种色光的 1-FFT 离焦重建图像。

由于 1-FFT 离焦重建算法较好地统一了像素宽度, 在重建图像中以相同的像素数截取绿光及红

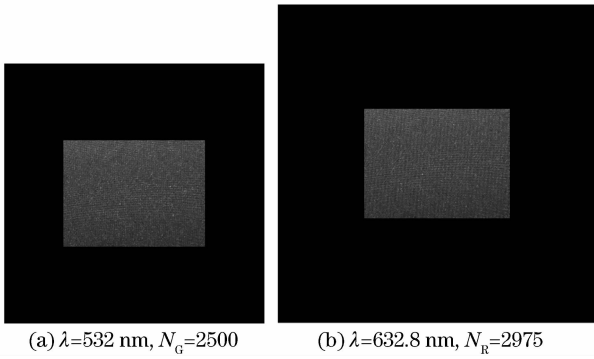


图 2 通过补零形成的绿光及红光全息图
Fig. 2 Green and red hologram formed by zero-padding

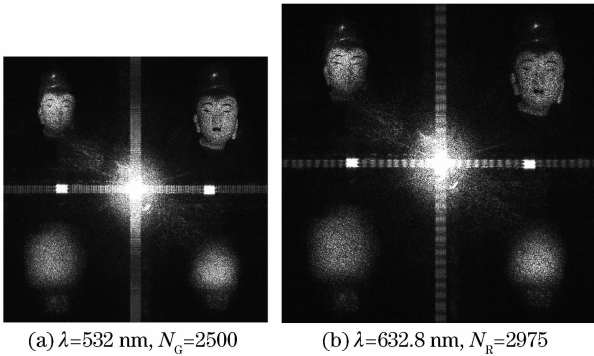


图 3 绿光及红光的 1-FFT 离焦重建图像
Fig. 3 1-FFT defocus reconstructed image of green and red light

光的重建像后,让两种色光的强度分别与真彩色图像的绿光及红光分量相对应,合成彩色图像。但是,当需要得到较多像素描述的物体重建像时,需要较大的补零全息图,补零操作不但增加了计算量,而且,较大数组的选择经常受到计算机内存的限制。

4 DDBFT 算法

4.1 DBFT 重建算法简介

DDBFT 算法是对 DBFT 算法的改进,首先对 DBFT 算法做简要介绍^[6,14]。

对数字全息记录系统建立直角坐标 $O-xyz$,令 $z = 0$ 平面为 CCD 平面, $z = d_1$ 为某观测平面。若已经获得到达 CCD 平面的共轭物光复振幅 $U^*(x, y)$,共轭物光经过距离 d_1 的衍射到达观测平面的复振幅 $U_1(x_1, y_1)$ 可由菲涅耳衍射积分表示为

$$U_1(x_1, y_1) = \frac{\exp(jkd_1)}{j\lambda d_1} \exp\left[\frac{jk}{2d_1}(x_1^2 + y_1^2)\right] \times \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ U^*(x, y) \exp\left[\frac{jk}{2d_1}(x^2 + y^2)\right] \right\} \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{x_1}{\lambda d_1}x + \frac{y_1}{\lambda d_1}y\right)\right] dx dy. \quad (7)$$

令 L 为 CCD 面阵宽度, N 为取样数, 当用 1-FFT 对(7)式计算时,计算结果的物理宽度满足

$$L_1 = \lambda d_1 N / L. \quad (8)$$

在记录数字全息图时,若物体到 CCD 的距离为 d ,如果期望得到物理宽度 L_v 的衍射场,令 $d = d_1 + d_2$,将距离 d 的衍射分解为经距离 d_1 衍射后再进行距离 d_2 的衍射“接力”计算。这时,第二次计算得到的物理宽度为

$$L_v = \lambda N d_2 / L_1, \quad (9)$$

将(8)式代入(9)式得

$$d_1 = \frac{dL}{L_v + L}, \quad (10)$$

由此可见,选择不同的重建距离 d_1 和 d_2 ,就能让不同色光的重建物像有相同的尺寸,这就是 DBFT 算法。

由于 DBFT 重建算法基于两次菲涅耳衍射的 1-FFT 计算完成,基于上面假定的相关参数,仅当衍射距离 d_1 满足关系式 $L_1 = L = \sqrt{\lambda d_1 N}$ 时,第一次衍射计算结果才是振幅及相位的取样均满足取样定理的衍射场^[11,12]。显然,这是一个非常特殊的条件。由于第二次衍射计算的正确性取决于第一次计算结果的正确取样,不满足取样定理的 1-FFT 衍射计算将产生“频谱混叠”。因此,从严格的理论意义而言,DBFT 方法通常只能重建受“频谱混叠”干扰的物光场^[14]。作为实例,令红色光重建像平面宽度为基准物理宽度 $L_v = 179.6$ mm,通过(9),(10)式求得 $d_1 = 34$ mm 和 $d_2 = 1286$ mm,图 4(a)给出绿色光的 DBFT 重建结果。为便于比较,图 4(b)绘出红色光的 1-FFT 重建像。很明显,绿色光的 DBFT 重建图像(第一象限)已经与红色光的 1-FFT 重建像(第二象限)尺度相同,然而,由于频谱混叠,降低了重建图像的质量。

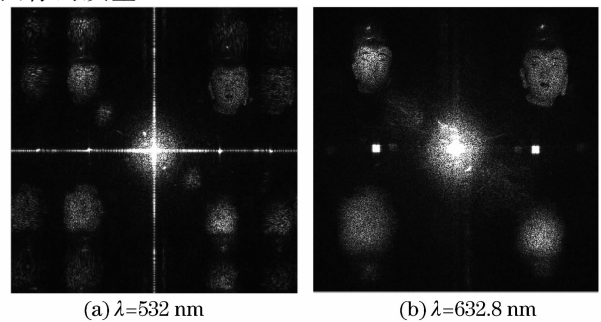


图 4 绿色光的 DBFT 重建结果与红色光的 1-FFT 重建像比较

Fig. 4 Comparison between DBFT reconstructed result of green light and 1-FFT reconstructed image of red light

4.2 DBFT 重建算法的改进研究

分析 DBFT 重建的物理过程知,重建运算事实上只涉及沿光轴传播进入 CCD 窗口的这部分物光角谱分量。中间衍射场的能量主要集中在中间平面的中央区域。参照文献[12]的讨论方法,令 $\Delta x_1 = \Delta y_1$ 为 $z = d_1$ 平面的取样间距,考查中间平面上完全满足取样定理区域的以像素为单位的宽度 N_c , N_c 应满足

$$\left. \frac{\partial}{\partial p} \frac{k}{2d_1} [(p\Delta x_1)^2 + (q\Delta y_1)^2] \right|_{p,q=N_c/2} = \pi, \quad (11)$$

求解得

$$N_c = \frac{\lambda d_1}{\Delta x_1^2}. \quad (12)$$

若要让后续计算满足取样定理,可以在中间平面中央设一个宽度为 N_c 像素的方形孔径光阑,滤除不满足取样定理的光波场后,则能有效重建理论上无频谱混叠干扰的物光场。

基于获取无干扰数字全息图的研究,改进后的 DBFT 算法步骤为^[22]:

- 1) 首先对全息图做 FFT 变换获得全息图频谱;
- 2) 在全息图频谱平面上设计滤波窗,取出共轭物光频谱;
- 3) 将共轭物光频谱移到频谱平面中心,通过周边补零形成 $N \times N$ 点的共轭物光频谱;
- 4) 通过 IFFT 计算形成无干扰全息图;
- 5) 根据物体的尺寸,选择需要的计算宽度 L_v ,利用无干扰全息图进行物光场的 DBFT 重建,但在中间衍射平面上引入宽度为 N_c 像素的孔径光阑。

由于建立无干扰全息图时额外增加了两次 FFT 计算,将改进后的 DBFT 算法简称为 DDBFT 算法。

5 SPH4FFT 重建法

传统全息理论已经指出,球面波作为重建波可以获得放大率不同的重建像^[15]。根据物体投影尺寸与 CCD 面阵的关系,设计合适的球面波照射全息图,就能利用角谱衍射公式进行物光场波前重建。然而,用角谱衍射公式进行物光场波前重建时,需要得到物光场的频谱。对球面波照射下全息图透射光的频谱进行的理论研究表明,各级衍射波的频谱必然展宽,很难通过简单的滤波窗滤除零级衍射波干扰^[21]。但是,如果预先通过对全息图进行频域滤波

处理,形成只包含物光或共轭物光的无干扰全息图,再用球面波照射作波前重建,就能获得无干扰的重建图像^[22]。根据重建计算中需要的 4 次 FFT 计算量,称 SPH4FFT 为重建算法。

由于 SPH4FFT 重建算法也必须首先获取无干扰数字全息图,重建时前 4 个步骤与 DDBFT 方法相同。当无干扰数字全息图形成后,再在球面波照射下用角谱衍射公式进行物光场重建,详细表述为:

设无干扰全息图由共轭物光 $U^*(x, y)$ 组成,球面波 $R_c(x, y)$ 照射下放大率为 M 的重建物光场可用角谱衍射公式表示为^[18,22]

$$U_i(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}[U^*(x, y)R_c(x, y)] \times \exp[jkz_i \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)}] \}, \quad (13)$$

式中

$$z_i = \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{z_c} - \frac{1}{z_r} \right)^{-1}, \quad (14)$$

$$R_c(x, y) = \exp \left[\frac{jk}{2z_c} (x^2 + y^2) \right], \quad (15)$$

$$M = z_i/d, \quad (16)$$

z_i 为重建距离, z_c 为重建波的波面半径, z_r 为参考光的波面半径。当选择好放大率 M 后,先根据(16)式确定 z_i ,再根据(14)式求出 z_c ,最后,由(13)式完成重建计算。

6 DDBFT 与 SPH4FFT 算法的实验证明及比较

从上述研究可以看出, DDBFT 算法与 SPH4FFT 算法均能以不同的放大率重建物光场。现基于图 1 的实验,对以上两种重建算法进行实验证明及比较。由于物体高度约 40 mm,对于 DDBFT 算法,可以选择计算宽度 L_v 略大于 40 mm 进行重建。令 $L_v = 52$ mm,图 5 给出 DDBFT 重建的图像彩色分量及合成的彩色图像。可以看出,经过改进的 DBFT 重建算法有效地消除了频谱混叠对重建图像的影响,重建出具有干净背景的彩色图像。由于只使用一幅数字全息图,能够用于彩色实时数字全息的研究。

为便于比较,让 SPH4FFT 的重建图像与 DDBFT 重建图像有相同的相对尺度,即将放大率选择为 $M = L/L_v = 0.0915$ 。图 6 给出两种色光的 SPH4FFT 重建图像分量及合成的彩色图像。

比较图 5 及图 6 两组图像可以看出,虽然 SPH4FFT 的重建图像有相对细致的结构,但两组图像质量无本质区别。然而,在 DDBFT 重建过程

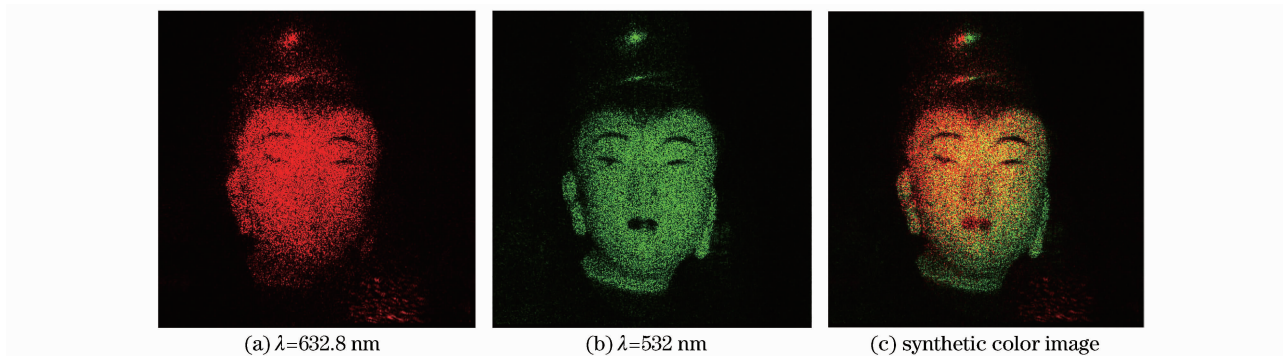


图 5 两种色光的 DDBFT 重建图像分量及合成的彩色图像

Fig. 5 DDBFT reconstructed image components and its synthetic color image of two color lights

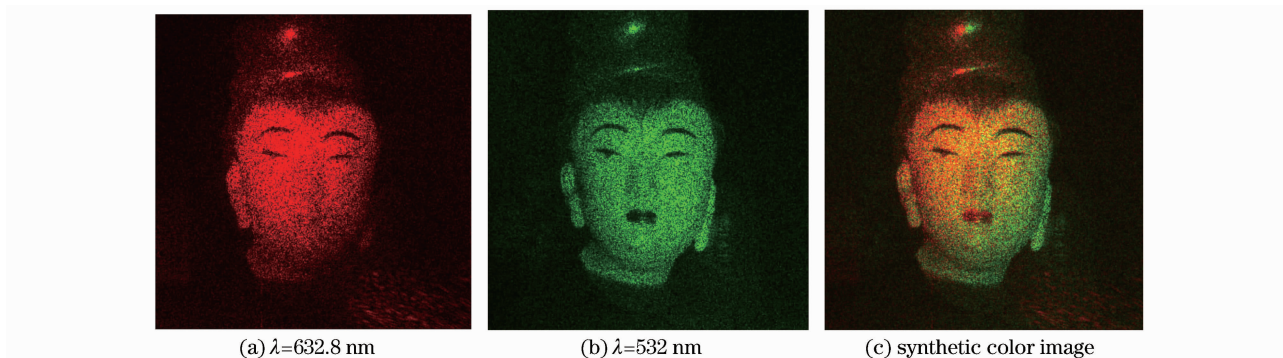


图 6 两种色光的 SPH4FFT 重建图像分量及合成的彩色图像

Fig. 6 SPH4FFT reconstructed image components and its synthetic color image of two color lights

中,虽然在中间衍射平面设置滤波窗,让第二次衍射计算时中间场的取样满足取样定理,消除了频谱混叠对重建像的影响,但是理论研究表明,只要中间衍射平面的宽度不等于最终重建平面的宽度,重建图像的相位分布就不满足取样定理^[11,12]。此外,由于 DDBFT 重建是基于菲涅耳衍射积分形成的,只能用于满足傍轴近似的数字全息检测。相较而言,SPH4FFT 重建算法不但充分利用了物光场能量,计算结果能够用于不满足傍轴近似的数字全息检测,而且,只要初始场的取样满足取样定理,重建场就是振幅及相位分布同时满足取样定理的光波场^[12]。通过数字全息的波前重建来重现所记录物体的信息,让重建场的振幅及相位分布同时满足取样定理无疑是十分重要的。

7 彩色 CCD 记录彩色数字全息图的实验研究

利用重建平面综合使用技术,原则上可以用单色 CCD 实时记录三种色光的全息图。然而为能让重建图像不相互干扰,光学系统的调整十分繁杂。因此,使用能够有效分离三种色光的彩色 CCD 可以

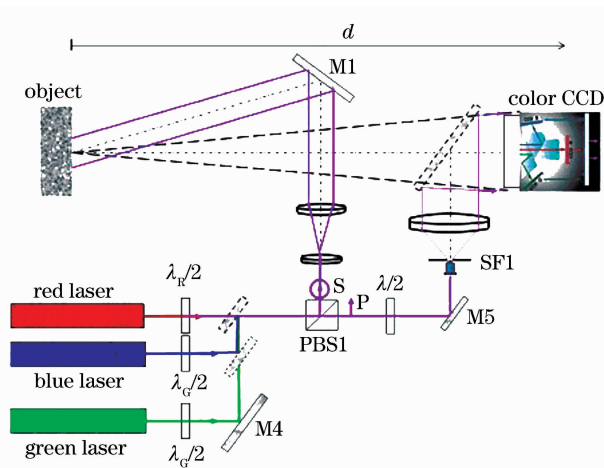


图 7 彩色 CCD 记录彩色数字全息图的实验系统

Fig. 7 Experimental system using a color CCD to record digital color hologram

显著简化研究工作,图 7 给出这种系统的光路图^[23]。由于三种色光能有效分离,故可以让照明物光及参考光共用一个光路。对于给定的光学元件,虽然每一光路对不同色光有不同的光学参数,但是基于上面的讨论,理论上可以根据给定的光学参数准确地重建统一尺寸的物光场。

在数字全息研究的国际合作中,宋庆和等^[24]在

Pascal 等^[10]的实验室按照图 7 的实验系统进行了红绿蓝三色光照明情况的真彩色数字全息研究。基于其采集的一个彩色数字全息图,利用 SPH4FFT 重建方法给出重建实例。该全息图的相关参数为:物体是高度约 40 mm 的中国京剧脸谱陶瓷模型,彩色 CCD 像素数为 1024 pixel×1344 pixel,像素宽度

为 4.65 μm 。物体到 CCD 的距离为 2000 mm,红绿蓝三激光波长分别为 671, 532, 457 nm。选择 1024 pixel×1204 pixel 的全息图进行重建。由于全息图宽度为 4.76 mm,选择放大率 $M=0.1$ 。每一色光分量的重建像及合成的真彩色图像如图 8 所示。

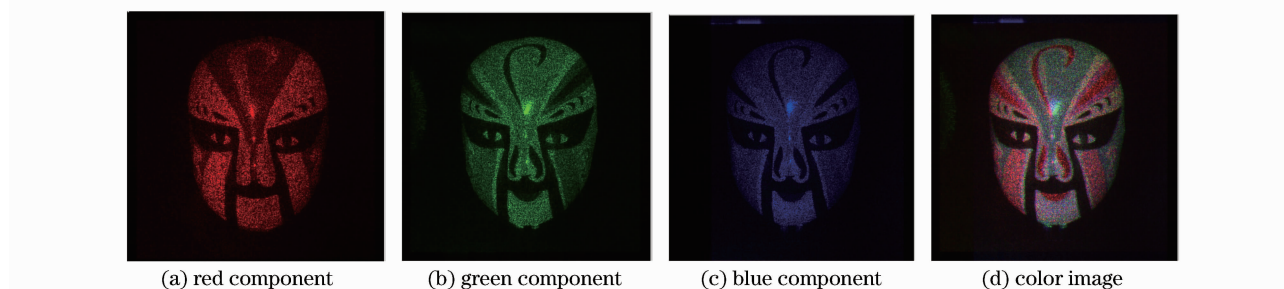


图 8 用彩色数字全息图及 SPH4FFT 方法重建的彩色图像

Fig. 8 Color image reconstructed by a digital color hologram and SPH4FFT algorithm

8 结 论

简要介绍了单色 CCD 及彩色 CCD 记录彩色全息图的方法。对常用的彩色图像重建方法进行了简要介绍,对较有代表性的 1-FFT 离焦重建法、DDBFT 重建法以及 SPH4FFT 重建法做了综述研究与分析,并给出了相应的实验研究实例。上述工作对彩色数字全息的研究及应用提供了有益的参考。

参 考 文 献

- 1 Patrice Tankam, Pascal Picart, Denis Mounier *et al.*. Method of digital holographic recording and reconstruction using a stacked color image sensor [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(3):320~328
- 2 S. Schedin, G. Pedrini, H. J. Tiziani *et al.*. Simultaneous three-dimensional dynamic deformation measurements with pulsed digital holography [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(34):7056~7062
- 3 J. M. Desse, F. Albe, J. L. Tribillon. Real-time color holographic interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(25):5326~5333
- 4 I. Yamaguchi, T. Matsumura, J. Kato. Phase shifting color digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(13):1108~1110
- 5 Chen Xingwu, Zhao Huiying, Ge Baozhen *et al.*. Computer generating and numerical reconstructing color hologram [J]. *Optics Technique*, 2003, **29**(2):239~241
陈兴梧,赵慧影,葛宝臻等.彩色全息图的计算机产生和数字再现[J].*光学技术*, 2003, **29**(2):239~241
- 6 F. Zhang, I. Yamaguchi. Algorithm for reconstruction of digital holograms with adjustable magnification [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(14):1668~1670
- 7 P. Ferraro, S. De Nicola, G. Coppola *et al.*. Controlling image size as a function of distance and wavelength in Fresnel-transform reconstruction of digital holograms [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(8):854~856
- 8 A. Domenico, C. Giuseppe, D. N. Sergio *et al.*. Method for superposing reconstructed images from digital holograms of the same object recorded at different distance and wavelength [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(1):113~116
- 9 J. L. Zhao, H. H. Jiang, J. L. Di. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7):2514~2519
- 10 Pascal Picart, Julien Leval. General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(7):1744~1761
- 11 David Mas, Javier Garcia, Carlos Ferreira *et al.*. Fast algorithms for free-space diffraction patterns calculation [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **164**(4-6):233~245
- 12 J. C. Li, Z. Peng, Y. Fu. Diffraction transfer function and its calculation of classic diffraction formula [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **280**(2):243~248
- 13 T. Patrice. Méthodes d'holographie numérique couleur pour la métrologie sans contact en acoustique et mécanique [D]. Thèse soutenue publiquement le 12 octobre 2010 à l'IVERSITE DU MAINE de France
- 14 Li Junchang, Fan Zebin. Algorithm of the non-interpolation wave-front reconstruction of the color digital holography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4):2457~2461
李俊昌,樊则宾.彩色数字全息的非插值波面重建算法研究[J].*物理学报*, 2010, **59**(4):2457~2461
- 15 Joseph W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. New York: Mc Graw Hill, 1968
- 16 Li Junchang. FFT computation of angular spectrum diffraction formula and its application in wavefront reconstruction of digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5):1163~1167
李俊昌.角谱衍射公式的快速傅里叶变换计算及在数字全息波面重建中的应用[J].*光学学报*, 2009, **29**(5):1163~1167
- 17 Li Junchang, Lou Yuli, Gui Jinbin. Three methods for scattering wave fields reconstruction by convolution [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5):1176~1181
李俊昌,楼宇丽,桂进斌.散射光波场卷积重建的三种方法研究[J].*光子学报*, 2009, **38**(5):1176~1181
- 18 J. C. Li, T. Patrice, Z. J. Peng *et al.*. Digital holographic reconstruction of large objects using a convolution approach and adjustable magnification [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(5):572~574

- 19 P. Pascal, T. Patrice, M. Denis *et al.*. Spatial bandwidth extended reconstruction for digital color Fresnel holograms [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11):9145~9156
- 20 T. Patrice, P. Pascal, M. Denis *et al.*. Method of digital holographic recording and reconstruction using a stacked color image sensor [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(3):320~327
- 21 Jun-chang Li, Zu-jie Peng, Patrice Tankam *et al.*. Design of the spatial filter window for digital holographic convolution reconstruction of object beam field [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(21):4166~4170
- 22 Li Junchang, Fan Zebin, Tankam Patrice *et al.*. The study of color digital holography free from the zero-order diffraction interruption [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(3):250~255
- 李俊昌,樊则宾, Tankam Patrice 等. 无零级衍射干扰的彩色数字全息研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(3):250~255
- 23 Patrice Tankam, Qinghe Song, Mayssa Karray *et al.*. Real-time three-sensitivity measurements based on three-color digital Fresnel holographic interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(12):2055~2057
- 24 Song Qinghe, Wu Yanmei, Tankam Patrice *et al.*. Research on the recording hologram with Foveon in digital color holography [C]. *SPIE*, 2010, **7848**:784819

60 W 全光纤结构宽带超荧光光源

超荧光是介于激光与荧光之间的一种过渡状态,是放大的自发辐射(ASE)。基于稀土掺杂光纤的宽带超荧光光源与传统的超辐射发光二极管(SDL)光源相比,超荧光光源具有输出功率高、荧光谱线宽、使用寿命长等优点;此外超荧光光源与激光相比,超荧光光源具有无自脉冲、无弛豫振荡、无模式竞争、极高时间稳定性等突出优点。因此性能优良的超荧光光源已经广泛应用于光学层析、医学诊断、光谱检测以及光纤通信等领域。

北京工业大学高功率光纤激光课题组采用独特的设计实现了输出功率 60 W,全光纤结构的宽带超荧光光源,实验装置示意图如图 1 所示。种子光的最大输出功率为 3 W,经过一级光纤放大器后输出功率达到了 60 W,此时抽运功率为 79 W,光-光转换效率为 76%。如图 2 所示,超荧光种子源放大后的输出光谱带宽为 1000~1150 nm,3 dB 带宽为 21 nm。超荧光光源属于 ASE,无自脉冲、无弛豫振荡、无纵模跳跃,表现出了极高的时间稳定性。

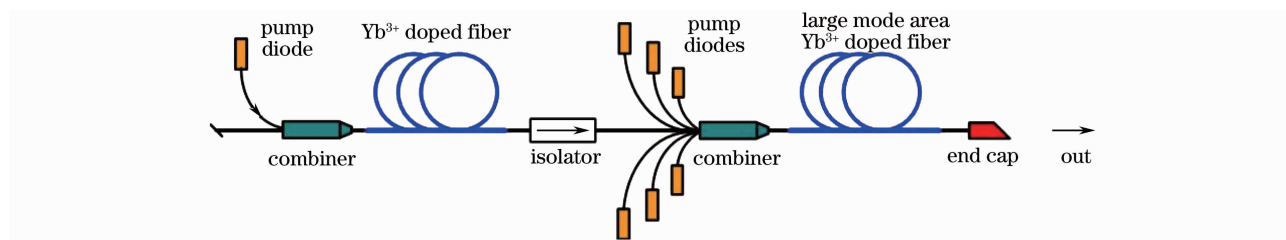


图 1 超荧光光源实验装置图

Fig. 1 Schematic setup of the superfluorescent source

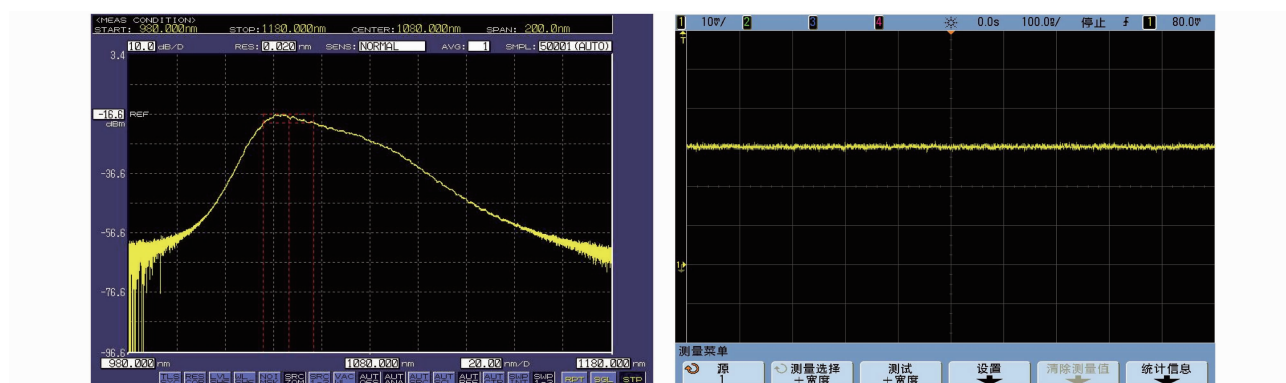


图 2 超荧光光源的输出光谱和稳定性图

Fig. 2 Optical spectrum and stability of the superfluorescent source

刘 江 王 璞

(北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心,北京 100124)