

# 基于立体匹配技术的数字全息三维形貌重构

张赞赞 王辉 吴琼 李志光

浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004

**摘要** 针对数字全息对物体三维形貌的重构与测量,提出了一种将数字全息术与立体匹配术相结合的三维测量方法。首先利用离轴菲涅耳数字全息系统,采集三维物体的单幅离轴菲涅耳全息图;然后将获取的数字全息图分为两个部分,分别进行数值再现,可以得到两个再现像,两个再现像存在视差。最后利用立体匹配算法获取两幅视图再现像的视差,根据几何关系获取物体的深度信息,重构物体的三维形貌。实验中,分别对不连续物体和连续物体进行三维形貌的重构,得到了准确的三维物体深度信息。数值模拟和初步实验结果表明该方法有效可行。

**关键词** 全息;三维形貌;立体匹配;视差

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.110901

## 3D Shape Reconstruction Based on Digital Holography of Stereo Matching Technology

Zhang Zanzan Wang Hui Wu Qiong Li Zhiguang

*Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China*

**Abstract** Based on the combination of digital holography and stereo matching technology, a 3D measurement method for 3D shape reconstruction and measurement of digital holography is presented. Firstly, the off-axis Fresnel digital holography system is used, and the single off-axis Fresnel digital hologram of 3D object is obtained. And then, the digital hologram is divided into two parts, two reconstructed images are obtained after the reconstruction, and two reconstructed images exist disparity. At last, the disparity map can be achieved from the matching of two views. Based on geometric relationship, the depth information can be derived from disparity map and used to reconstruct 3D shape of the object. In the experiments, the shape of the scatter and continuous objects are measured by the proposed method, and relative accuracy depth information is derived. The validity of this method is proved by numerical simulation and initial optical experiment.

**Key words** holography; 3D shape; stereo matching; disparity

**OCIS codes** 090.1995; 100.3010; 110.3175

## 1 引言

数字全息术具有对微结构无损伤、非接触、高分辨率和快速处理成像等诸多优点<sup>[1-3]</sup>,已被应用到微结构三维形貌测量的领域之中。目前,利用数字全息技术进行三维物体形貌的测量原理基本都是用计算机数值模拟数字全息图的衍射,再现原始物场的波前分布,然后提取出物光波的相位信息,最后再根据相位与面形变化的关系重构物体的三维形貌<sup>[4]</sup>。然而,提取的相位介于 $[-\pi, \pi]$ 之间,称为包裹相位,需要相位解包裹算法恢复物体的真实相位<sup>[5]</sup>。在实际应用中,相位去包裹存在一些困难:一方面由于激光散斑噪声和数字化的噪声的存在,使得相位展开容易出错;另一方面,为了满足采样定理,要求相邻采样点正确的相位分布的相位差必须小于 $\pi$ <sup>[6-8]</sup>,因此实际物体本身突变将引起相位展开出现误差,这就要求有效消除包裹相位中的不

收稿日期: 2014-04-22; 收到修改稿日期: 2014-05-28; 网络出版日期: 2014-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(11374267)、浙江师范大学创新团队项目

作者简介: 张赞赞(1988—),女,硕士研究生,主要从事数字全息三维成像方面的研究。E-mail: zhangzanzan163@163.com

导师简介: 王辉(1958—),男,博士,教授,主要从事信息光学、全息技术等方面的研究。E-mail: wh@zjnu.cn(通信联系人)

连续点。为了解决这些问题,人们提出了很多相位去包裹的算法。文献[9]提出了双波长相位解包裹算法,它能对表面梯度变化较大或结构复杂的物体进行比较精确的相位解包裹;文献[10]提出分割线算法恢复真实相位,文献[11]则避开相位解包裹问题,提出聚焦度算法获得三维物体的面形。虽然利用上述方法能获取物体的表面形貌,但是存在一定的局限性。如目前的相位解包裹算法存在不足之处,比如算法复杂、计算耗时并且当被测物体本身有间断或表面梯度变化很大时,相位解包裹算法可能引入不可预料的误差,很难恢复准确的真实相位。

本文提出利用立体匹配技术实现数字全息再现像的三维形貌重构。数字全息图与光学全息图一样,记录了物体的三维信息,全息图的不同区域可以再现出不同视角的像。将数字全息图分成两个相等部分分别进行再现,再现像等价于双目视觉中的“右视图”和“左视图”。然后利用立体匹配算法获取两幅再现像的视差,根据几何关系获取物体的深度信息,重构三维形貌。数字全息术与立体匹配相结合,避免了相位解包裹的过程,且计算量小、用时少,并且能够直接得到准确的三维形貌,对于毫米量级深度变化的小物体形貌检测有重要的实用意义。

## 2 菲涅耳数字全息原理

### 2.1 菲涅耳数字全息记录

图1给出了菲涅耳数字全息记录原理图,其中全息记录面位于  $X_h Y_h$  平面内。物体某点  $(x_o, y_o, z_o)$  发出的光在记录平面上的复振幅分布菲涅耳近似为

$$O(x_h, y_h) = A \exp \left\{ ik \left[ \frac{(x_h - x_o)^2}{2z_o} + \frac{(y_h - y_o)^2}{2z_o} \right] \right\}, \quad (1)$$

引入参考光  $R(x_h, y_h)$  与物光波叠加在记录面上形成干涉条纹,光电成像器件将干涉条纹强度记录下来即可得到数字全息图。数字全息图可以看成是一个二维数组,可以表达成

$$H(x_h, y_h) = |O(x_h, y_h)|^2 + |R(x_h, y_h)|^2 + O^*(x_h, y_h)R(x_h, y_h) + O(x_h, y_h)R^*(x_h, y_h). \quad (2)$$

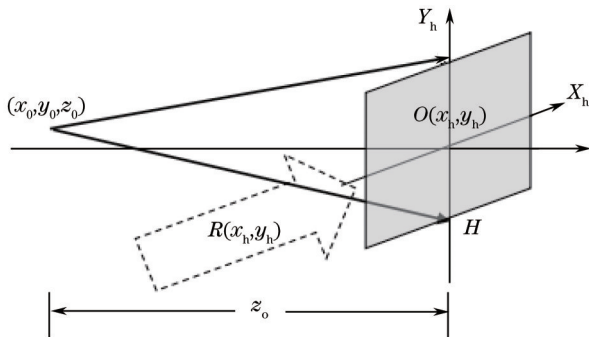


图1 菲涅耳数字全息记录过程

Fig.1 Recording of Fresnel digital holography

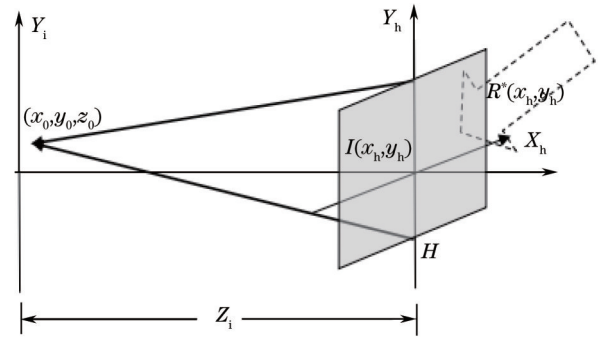


图2 菲涅耳数字全息再现过程

Fig.2 Reconstructing of Fresnel digital holography

### 2.2 菲涅耳全息再现

数字全息图的再现就是从(2)式中恢复原物体像。图2是菲涅耳数字全息等效再现光路,设采用原参考光的共轭光  $R^*(x_h, y_h)$  照明全息图,则在  $z = z_i$  平面上的再现像光场分布为

$$U(x_i, y_i) = \int_H R^*(x_h, y_h) H(x_h, y_h) \exp \left\{ ik \left[ \frac{(x_i - x_h)^2}{2z_i} + \frac{(y_i - y_h)^2}{2z_i} \right] \right\} dx_h dy_h = \int_H R^*(x_h, y_h) [|O(x_h, y_h)|^2 + |R(x_h, y_h)|^2 + O^*(x_h, y_h)R(x_h, y_h) + O(x_h, y_h)R^*(x_h, y_h)] \exp \left\{ ik \left[ \frac{(x_i - x_h)^2}{2z_i} + \frac{(y_i - y_h)^2}{2z_i} \right] \right\} dx_h dy_h, \quad (3)$$

在全息图记录时,如果满足零级项与再现像分离条件,可单独讨论上述积分中的某一项。这里仅关如下注积分

$$u(x_i, y_i) = \int_H O^*(x_h, y_h) R(x_h, y_h) R^*(x_h, y_h) \exp\left\{ik \left[ \frac{(x_i - x_h)^2}{2z_i} + \frac{(y_i - y_h)^2}{2z_i} \right]\right\} dx_h dy_h, \quad (4)$$

设参考光为平行光, (4)式可以表示为

$$u(x_i, y_i) = |R|^2 \int_H O^*(x_h, y_h) \exp\left\{ik \left[ \frac{(x_i - x_h)^2}{2z_i} + \frac{(y_i - y_h)^2}{2z_i} \right]\right\} dx_h dy_h = \\ |R|^2 \int_H \exp\left\{-ik \left[ \frac{(x_h - x_o)^2}{2z_o} + \frac{(y_h - y_o)^2}{2z_o} \right]\right\} \exp\left\{ik \left[ \frac{(x_i - x_h)^2}{2z_i} + \frac{(y_i - y_h)^2}{2z_i} \right]\right\} dx_h dy_h. \quad (5)$$

设全息图在  $x$  和  $y$  方向的大小分别为  $L_x$  和  $L_y$ , 仅考虑  $x$  方向的积分, (5)式可以写成

$$u(x_i) = |R|^2 A \exp\left(ik \frac{z_o x_i^2 - z_i x_o^2}{2z_o z_i}\right) \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \exp\left[ik \frac{(z_o - z_i)x_h^2}{2z_o z_i}\right] \exp\left[i2\pi \frac{(z_i x_o - x_i z_o)x_h}{\lambda z_o z_i}\right] dx_h. \quad (6)$$

如果再现平面非常靠近物点, 即  $z_o - z_i \approx 0$ , 则可以得到

$$u(x_i) = |R|^2 A \exp\left(ik \frac{z_o x_i^2 - z_i x_o^2}{2z_o z_i}\right) \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \exp\left[i2\pi \frac{(z_i x_o - x_i z_o)x_h}{\lambda z_o z_i}\right] dx_h = C \frac{\sin\left[\frac{\pi}{\lambda z_i} \left(x_i - \frac{z_i}{z_o} x_o\right) L_x\right]}{\frac{\pi}{\lambda z_i} \left(x_i - \frac{z_i}{z_o} x_o\right)} \exp\left(ik \frac{x_i^2}{2z_i}\right) \exp\left(-ik \frac{x_o^2}{2z_o}\right). \quad (7)$$

同理, 对于  $y$  方向有

$$u(y_i) = \frac{\sin\left[\frac{\pi}{\lambda z_i} \left(y_i - \frac{z_i}{z_o} y_o\right) L_y\right]}{\frac{\pi}{\lambda z_i} \left(y_i - \frac{z_i}{z_o} y_o\right)} \exp\left(ik \frac{y_i^2}{2z_i}\right) \exp\left(-ik \frac{y_o^2}{2z_o}\right). \quad (8)$$

(8)式的意义是, 再现像是一个 sinc 函数分布, 当全息图很大时, (8)式可以近似为  $\delta$  函数, 即

$$u(y_i) = C \delta\left(y_i - \frac{z_i}{z_o} y_o\right), \quad (9)$$

当  $z_i = z_o$  时, 原物点的像点就处于再现平面上。  $z_i \neq z_o$  时再现平面上的像可以认为是实际像点的投影。当全息图大小有限时, 像点弥散成为由 sinc 函数决定的弥散斑。图3给出了再现平面上的像斑中心位置与实际像点位置的关系。

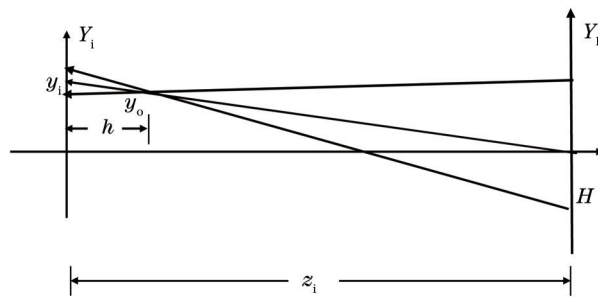


图3 再现平面的像点坐标  $y_i$  与实际像点  $y_o$  的关系

Fig.3 Relationship between image point of reconstructed plane and actual image point

### 2.3 再现像体视对的获取

全息图不同部分记录着物体发出的不同视角的物光场, 如果将获取的全息图 DH 分成 I 和 II 两部分, 则两部分记录的是物体的不同视角下的信息, 如图 4(a) 所示。若仅仅再现 I 或 II 部分的全息图, 则只能再现出与其对应的视角像, 图 4(b) 和 4(c) 给出了两个部分再现像的示意图。

全息图不同部分再现像的差异可以用视差 (disparity) 的大小来表示, 图 5 表示全息图两个部分再现的像点在再现平面上的投影像斑中心位置。设  $l_y = L_y/2$ , 在图 5 (a) 中, 全息图上半部中心坐标为  $l_y/2$ ; 在图 5 (b) 中,

全息图下半部中心坐标为  $-l_y/2$ 。

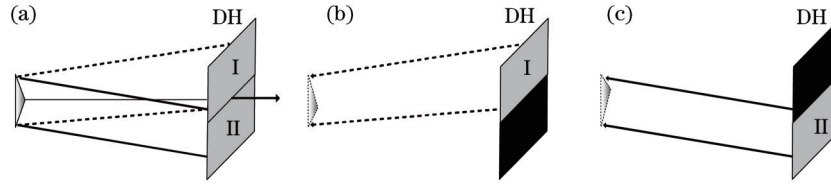


图4 全息图不同视窗与其再现像示意图。(a)物体在全息图上不同视角下的信息;(b) I部分全息图再现像;(c) II部分全息图再现像

Fig.4 Schematic diagram of hologram different windows and its reconstructed images. (a)Different perspectives information of object on the hologram; (b) reconstructed image of first hologram; (c) reconstructed image of second hologram

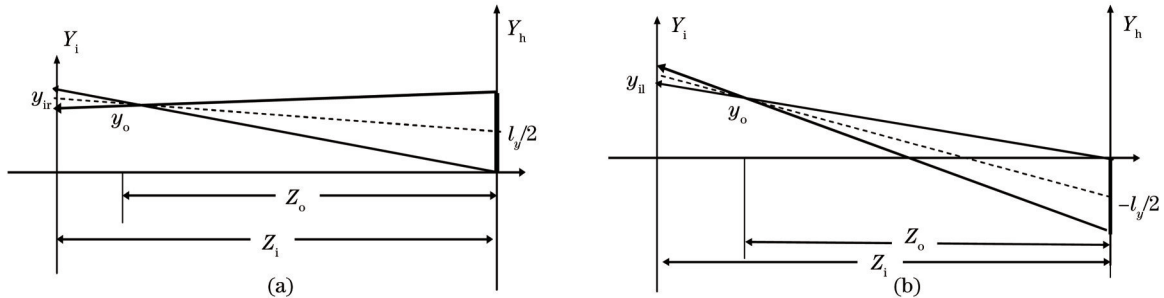


图5 全息图不同部分再现像在再现平面上的位置。(a)全息图上半部分再现像位置;(b)全息图下半部分再现像位置

Fig.5 Position of reconstructed image for different parts of hologram on the reconstructed plane. (a)Position of reconstructed image for the upper part of hologram; (b)position of reconstructed image for the lower part of hologram

从图5可以计算出实际像点在再现平面上投影的位置坐标为

$$y_{ir} = \frac{z_i}{z_o}(y_o - l_y/2) + l_y/2, \quad y_{il} = \frac{z_i}{z_o}(y_o + l_y/2) - l_y/2, \quad (10)$$

两个像斑中心位置差为

$$D(y_o) = y_{ir} - y_{il} = l_y - \frac{z_i}{z_o}l_y = l_y - \frac{z_i}{z_i + h}l_y = \frac{l_y h}{z_i + h}, \quad (11)$$

$D$ 叫做视差。

### 3 立体匹配的原理

#### 3.1 区域匹配算法

立体匹配是从不同角度摄制物体的两幅图,简称视图。对两幅不同角度视图中的对应点进行匹配,即给定一幅图像中的已知点(源匹配点)后在另一幅图像上寻找与之对应的目标匹配点(同名像点),以此获取视图间的视差。通过立体匹配算法获取视差,从中得到物体的深度信息。

立体匹配算法主要通过建立一个能量代价函数,通过此能量代价函数最小化来估计像素点视差值。利用立体匹配技术获得数字全息三维再现像的原理是:首先获取一幅菲涅耳数字全息图,然后将数字全息图等分成两个部分,并分别进行数字再现,两个再现像可以认为是“体视对”。利用(11)式,并结合图6,可以得到物点相对于再现平面的深度为

$$h(y_o) = \frac{z_i D(y_o)}{l_y - D(y_o)}. \quad (12)$$

已经有多种立体匹配算法可以获取视差 $D$ <sup>[12-15]</sup>。为了验证提出的三维重构方法的正确性,采用区域匹配算法<sup>[16]</sup>,其基本原理是给定一幅图像上的某一点,选取该像素点邻域内的一个子窗口,在另一幅图像中的一个区域内根据能量代价函数判断依据,寻找与子窗口图像最为相似的子图,而其匹配的子图中对应的像点就为该像素的匹配点。

设两个视图数组分别用  $L(x,y)$  和  $R(x,y)$  表示,区域匹配的窗口像素数为  $n \times m$ ,对于第  $(i,j)$  点所在的邻

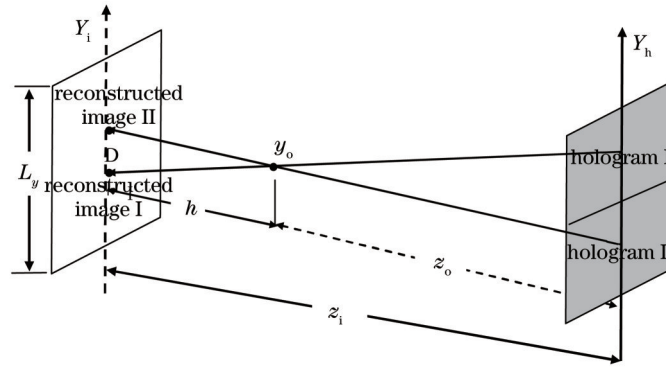


图6 深度与视差几何关系

Fig.6 Geometric relationship between depth and disparity

域内,两个图像的能量差为

$$e(i,j,D) = \frac{1}{mn} \sum_{x=i}^{i+n} \sum_{y=j}^{j+m} [L(x,y+D) - R(x,y)]^2 \tag{13}$$

首先,预先选定视差搜索范围为  $D_{max}$ ,对每一个视差  $D$  计算其能量差矩阵。接着对每个能量差矩阵进行多次均值滤波来滤除能量变化较大的值以实现平滑。最后寻找每个像素的最小能量差,并把对应的  $D$  作为最优视差估计值。

### 3.2 横向分辨率和纵向分辨率

横向分辨率与全息图的大小有关,设两个部分全息图的宽度都为  $L_y/2$ ,根据衍射原理,再现像最小分辨间隔为

$$\delta_{min} = 2 \frac{\lambda}{L_y} z_i, \tag{14}$$

式中  $\lambda$  为再现光的波长,(14)式就是立体匹配再现时,数字全息图再现像的横向分辨率。

纵向分辨率是指深度测量的最小值。由于当视差  $D$  小于  $\delta_{min}$  时,两个匹配点是不能区分的,所以要求  $D(y_0) \geq \delta_{min}$ 。根据(11)式有

$$\frac{l_y h}{z_i + h} \geq \frac{\lambda}{l_y} z_i, \tag{15}$$

即

$$h \geq \frac{\lambda z_i^2}{l_y^2 - \lambda z_i}, \tag{16}$$

代入  $l_y = L_y/2$ ,得到可以测量的深度变化最小值为

$$h_{min} = \frac{4\lambda z_i^2}{L_y^2 - 4\lambda z_i}. \tag{17}$$

设全息图记录器件在  $y$  方向的长度  $L_y = 10 \text{ mm}$ ,记录波长为  $532 \text{ nm}$ ,图7给出了深度分辨率与像距的关系。

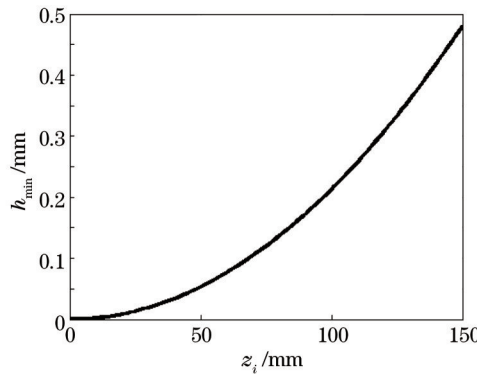


图7 深度分辨率与像距的关系

Fig.7 Relationship between depth resolution and image distance

## 4 实验及分析

### 4.1 菲涅耳全息模拟

根据菲涅耳数字全息原理,采用计算机全息技术得到数字菲涅耳全息图。模拟物体是一系列不连续的物点,各物点的三维坐标及振幅、相位因所需而设。物点所占区域的横向尺寸为2 mm;其最小深度为0.3 mm,最大深度为5.0 mm;CCD像素数为1024 pixel $\times$ 1024 pixel,像素间隔为3.45  $\mu\text{m}$ ;菲涅耳数字全息记录及再现时所用波长为532 nm,记录距离与再现距离均为66 mm。

对模拟所得的菲涅耳数字全息图数值分为大小相同的两部分,根据2.3节体视对再现原理,并分别再现。对再现像经过滤波处理后得到两个视图,如图8所示。

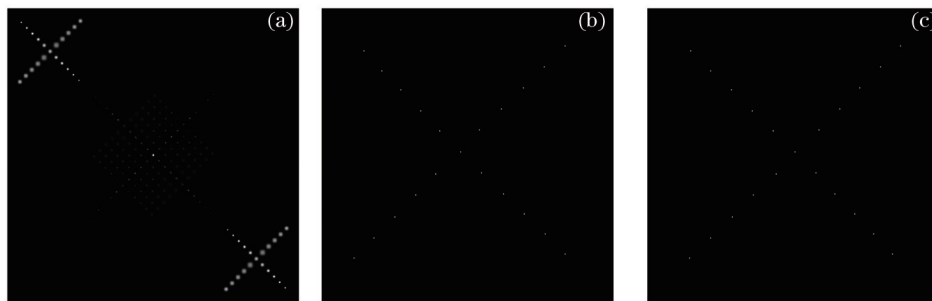


图8 菲涅耳数字全息再现像及视图对。(a)全息图再现像;(b)视图I;(c)视图II

Fig. 8 Reconstructed image in Fresnel digital holography and views. (a) Reconstructed image of hologram; (b) view I; (c) view II

对两个视图进行图像匹配,根据2.3节所述的原理,最终得到物点的三维形貌,如图9所示。

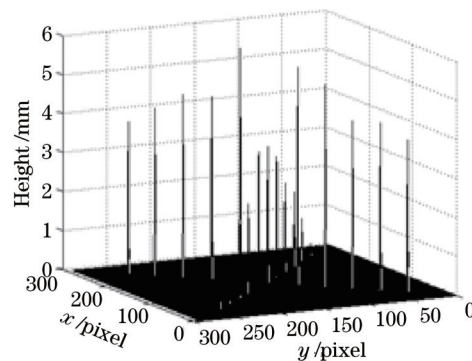


图9 物体三维形貌

Fig.9 3D shape of object

从模拟结果看,重构出的物点深度信息的最小深度为0.3 mm,最大深度为6 mm,这与预设深度略有误差。其原因可能在于:由于物体本身是三维的,如果像点不在再现平面上,所得到的视图实际上是投影像,像点是一个弥散斑。在对视图进行图像处理时,只选取了该弥散斑灰度级相同且最亮点中的一个点来作为该物点的再现像,这就导致该物点的再现像与原物点的位置发生了偏移,进而使源匹配点与同名像点之间的匹配并不是严格对应。从而在计算视差 $D$ 时引入了误差,最终使计算得到的物体深度存在一定的误差,重构的物体三维形貌有所偏差。尽管存在误差,但模拟结果表明,采用立体匹配算法能获取两幅视图的视差,并求得物体的深度信息,重构出物体的三维形貌。

### 4.2 实际物体验证

实验所用的物体是“阳”字繁体字金属浮雕徽章,如图10所示,经测量浮雕深度约为1 mm。采用图11所示光路记录其数字全息图,光路及其相关元件参数和模拟实验一致。激光束被分束镜 $BS_1$ 分成两束,一束经透镜 $L_1$ 扩束照明物体 $O$ ,另一束经反射镜 $M$ 和透镜 $L_2$ 扩束后作为参考光。物体 $O$ 经透镜 $L_1$ 成像于 $o$ 处, $o$ 发出的光即为数字全息图需要记录的物光波。物体像 $o$ 与记录平面的距离和参考光点源与记录平面的距离相等,这样光路形成无透镜傅里叶变换全息光路。



图10 实验用浮雕物体

Fig.10 Experiment with relief object

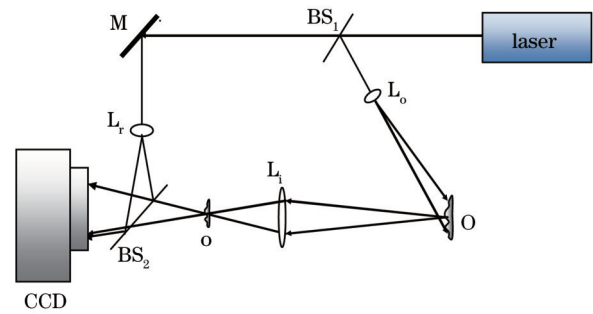


图11 反射数字全息实验光路

Fig.11 Optic setup for reflecting of digital hologram

图12(a)是整个数字全息图再现时得到的原始像和共轭像,取原始像作为立体匹配的目标。图12(b)和图12(c)是分别利用数字全息图的两部分再现后所取得原始像。

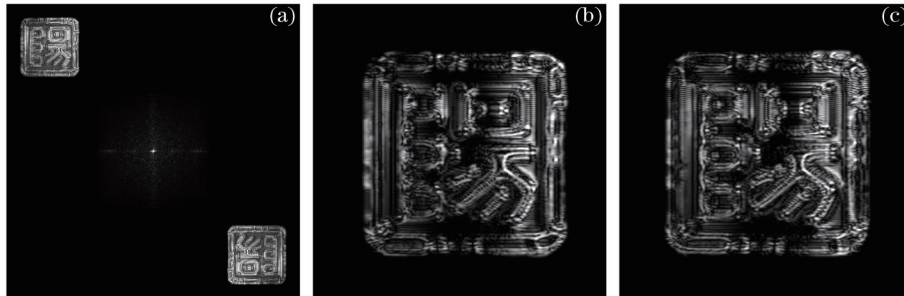


图12 数字全息再现像及视图对。(a)全息图再现像;(b)视图I;(c)视图II

Fig.12 Reconstructed image in digital holography and views. (a) Reconstruction of hologram; (b) view I; (c) view II

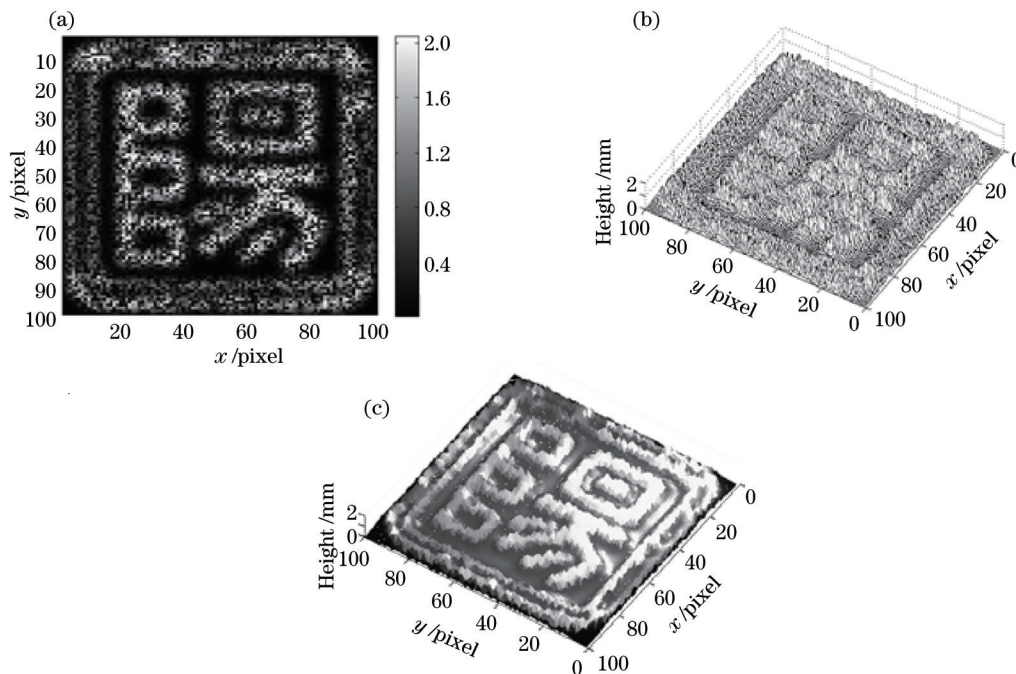


图13 利用立体匹配技术得到物体的三维形貌。(a)视差图;(b)深度图;(c)三维形貌图

Fig.13 3D shape of object using stereo matching technology. (a) Disparity map; (b)depth map; (c)3D shape map

在图13中,图(a)是经过区域匹配算法得到的视差灰度  $D(x,y)$  图像,图(b)是与  $D(x,y)$  对应的深度为  $h(x,y)$  的三维图像,图(c)是将整个全息图再现的原始像作为纹理,对  $h(x,y)$  进行贴图得到的结果。

从实际实验结果可以得到结论,利用反射式数字全息光路对浮雕物体拍摄数字全息图。对获取的以原始像为目标的两个视图通过区域匹配算法对两幅视图进行匹配,以此来得到物体的视差图和对应的深度

图。由图 13 可知,浮雕物体两个视图进行匹配后的结果存在峰刺,特别是在图像各部分的边缘区域,与原图相比,图像边缘出现膨胀现象,光滑性整体下降,且边缘定位不够清晰。存在峰刺的原因在于对图像进行匹配时,其视差图中包含一些不真实的视差估计。尤其在图像边缘,由于存在像素灰度级的阶跃变化,这就造成在匹配过程中产生较大的能量变化。即使已在图像匹配过程中对图像经过多次均值滤波以实现平滑,但由于图像中深度不连续区域的影响,不可避免地出现错误的匹配,最终导致这些错误匹配的信息呈现在三维形貌图上。但是,从图 13(c)结果看,通过立体匹配后整体上还是能够较准确地恢复出物体的三维形貌。虽与原浮雕物体的深度存在一定的误差,但是实验结果显示其深度也为 1 mm,这表明采用立体匹配技术重构物体三维形貌的方法具有一定的有效性和可行性。

## 5 结 论

针对相位解包裹法恢复物体三维形貌存在的限制及不足之处,提出数字全息术与图像匹配技术相结合的方法来重构物体的三维面形分布,最终得到了比较理想的实验结果。由于记录器件的限制,数字全息图口径一般都很小,即记录的物体视角很小,这样全息图不同区域所再现的视图像的视差也很小,现有的立体匹配算法很难满足这样的精度,寻找与数字全息图再现像视差相适应的立体匹配算法是以后努力的方向。

### 参 考 文 献

- 1 U Schnars, W P O Jüptner. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction [J]. Appl Opt, 1994, 33(2): 179-181.
- 2 C Yamaguchi. Phase-shifting digital holography [J]. Opt Lett, 1997, 22(16): 1268-1270.
- 3 L Ma, H Wang, Y Li, *et al.*. Partition calculation for zero-order and conjugate image removal in digital in-line holography [J]. Opt Express, 2012, 20(2): 1805-1815.
- 4 Wang Yunxin, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. 3D profile measurement for micro-optical component by using digital holographic microscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412003.  
王云新,王大勇,赵洁,等.基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J].光学学报,2011,31(4):0412003.
- 5 Wang Hui. Digital Holography Display in 3D and Detection [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013. 146-151.  
王辉.数字化全息三维显示与检测[M].上海:上海交通大学出版社,2013.146-151.
- 6 Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongzhen, *et al.*. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0309002.  
马利红,王辉,金洪震,等.数字全息显微定量相位成像的实验研究[J].中国激光,2012,39(3):0309002.
- 7 Zhang Zhihui, Wang Huaying, Liu Zuoqiang, *et al.*. Phase unwrapping algorithms based on fast Fourier transform [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 120902.  
张志会,王华英,刘佐强,等.基于快速傅里叶变换的相位解包裹算法[J].激光与光电子学进展,2012,49(12):120902.
- 8 Du Yanlong, Wang Yurong, Meng Xiangfeng, *et al.*. Gabor in-line phase-shifting digital holography based on 4f system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 060902.  
杜延龙,王玉荣,孟祥峰,等.基于4f系统的Gabor同轴相移数字全息[J].激光与光电子学进展,2013,50(6):060902.
- 9 Wang Yujia, Jiang Zhuqing, Gao Zhirui, *et al.*. Investigation on phase unwrapping in dual-wavelength digital holography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1009001.  
王羽佳,江竹青,高志瑞,等.双波长数字全息相位解包裹方法研究[J].光学学报,2012,32(10):1009001.
- 10 B Gutmann, H Weber. Phase unwrapping with the branch-cut method: role of phase-field direction [J]. Appl Opt, 2000, 39(26): 4802-4816.
- 11 L Ma, H Wang, Y Li, *et al.*. Numerical reconstruction of digital holograms for three-dimensional shape measurement [J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2004, 6: 396-400.
- 12 Qingqing Yang, Pan Ji, Dong XiaoLi, *et al.*. Fast stereo matching using adaptive guided filtering [J]. Image and Vision Computing, 2014, 32(3): 202-211.
- 13 Behzad Salehian, Abdghasem A Raie, Ali M fotouhi, *et al.*. Efficient interscanline consistency enforcing method for dynamic programming-based dense stereo matching algorithms [J]. Journal of Electronic Imaging, 2013, 22(4): 043028.



- 
- 14 Di Hongwei, Chai Ying, Li Kui. A fast binocular vision stereo matching algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2180-2184.  
狄红卫, 柴颖, 李逵. 一种快速双目视觉立体匹配算法[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2180-2184.
- 15 Baris Baykant Alagöz. Obtaining depth maps from color images by region based stereo matching algorithms [J]. OncuBilim Algorithm and Systems Labs, 2008, 8(4): arXiv:0812.1340v2.