

文章编号: 0253-2239(2006)01-0034-5

# 一种基于编码孔径成像原理的三维成像方法

郎海涛 刘立人 阳庆国

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 三维成像技术因其应用广泛而备受关注。根据编码孔径成像的基本原理,提出了一种非相干可见光三维成像方法。这种两步成像方法的第一步采用空间位置编码的照相机阵列对物体拍照,在第二步中,首先将照相机阵列拍照得到的物体照片根据拍照时的位置关系合成为一幅图像,然后采用计算机程序模拟光学反投影解码方法解码再显出物体不同深度的表面分层图像。设计了初步的实验,该实验采用 1 部照相机依次在各编码位置对物体模型拍照,编码形式是包含 9 个点的无冗余阵列形式,物体模型只包含 2 个深度层次,布置在距离照相机阵列 1.5 m 的地方。实验得到了信噪比较高的物体模型的分层解码图像,验证了这种三维成像方法的可行性。

**关键词:** 成像系统; 三维成像; 编码孔径成像; 编码; 解码

中图分类号: TB863 文献标识码: A

## A Three-Dimensional Imaging Method Based on the Principle of Coded Aperture Imaging

Lang Haitao Liu Liren Yang Qingguo

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** Three-dimensional imaging techniques are very attractive for many applications. A non-coherent visible three-dimensional imaging method is proposed based on the principle of coded aperture imaging. It is a two-step imaging method. In the first step, the object is recorded by a cameras array which the distribution of every camera in the array is spatially coded. In the second step the object images by the cameras array are synthesized into an image according to the position, encoded images are decoded by the optical reverse projection decoding method, the stratified surface images with various depth are reconstructed. Experiments have been done to test and verify the performance of the proposed method. A camera was used to capture the images of the object successively at each coded points. The code pattern is a NRA consisting 9 coded points. Object model is composed of only two stratified planes, and is placed at the position 1.5 m away from the cameras array. High SNR reconstructed stratified decoded images of the object are obtained using computational decoding program. Experimental results prove the proposed method is feasible and viable.

**Key words:** imaging systems; three-dimensional imaging; coded aperture imaging; code; decode

## 1 引 言

对于三维成像技术的研究由来已久,它的应用也日趋广泛。按照成像时采用相干光或者非相干光可以将三维成像方法分为相干光成像和非相干光成像两类。全息术<sup>[1]</sup>是一种典型的相干光成像方法,这种方法是 1948 年伽博(Gabor)为提高电子显微镜的分辨力时提出的。这种相干光成像方法在实际应用中受到两个条件的制约,一是成像需要好的相干光源,另一个问题是保持记录过程中相干条件不

被破坏需要付出很大代价,这两个问题大大制约了相干光三维成像方法在实际中的应用。

在非相干光三维成像方法中,编码孔径成像是一种目前被广泛应用于无线电天文学、核医学等领域的成像技术,它的概念最初是由 Dicke<sup>[2]</sup>提出的。因为 X 射线等高能粒子具有极强的穿透性,加之材料对它们的强烈吸收,普通的折射成像方式已不适用,采用编码孔径成像的方法具有两个优点:一是它的量子收集率高;二是它具有层析的能力。因为它

作者简介: 郎海涛(1978~),男,满族,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事三维成像、激光通信等领域的研究。E-mail: langhaitao@siom.ac.cn

收稿日期: 2005-01-26; 收到修改稿日期: 2005-05-11

具有层析的能力,使这种技术得以应用于三维成像方面。常用的编码孔径形式包括菲涅耳波带片、圆环和编码孔阵列等形式。用菲涅耳波带片作为编码孔径成像是 Mertz 和 Young<sup>[3]</sup> 最早提出的,它的记录和再现的原理与全息成像非常相像。圆环编码孔最早是由 Walton<sup>[4]</sup> 提出的。编码孔阵列相对于前面两种孔径形式,可以获得更优质的再现图像,因此被广泛应用于在编码孔径成像领域。

本文提出的三维成像方法基于编码孔径成像的原理,成像过程包括空间编码分布的相机阵列对物体的拍照记录和计算机模拟光学反投影解码再现物体分层图像两个步骤。图 1 左侧是这种方法编码记录的示意图。图中用一前一后两个平面图像表示三维物体。相机阵列对物体拍照时位于和物体视线垂直的平面上,我们称这个平面为相机平面。每一个相机都拍摄一张物体的照片,称这张照片为一个基元图像。编码记录完成后,首先将所有的基元图像根据它们被拍照时的位置关系在计算机中合成为一个图像,这个图像就是编码图像。然后采用计算机程序模拟光学反投影的解码方法对编码图像解码,再现物体不同深度的表面图像。图 1 右侧表示计算机解码得到物体距离相机阵列较近一层的图像。

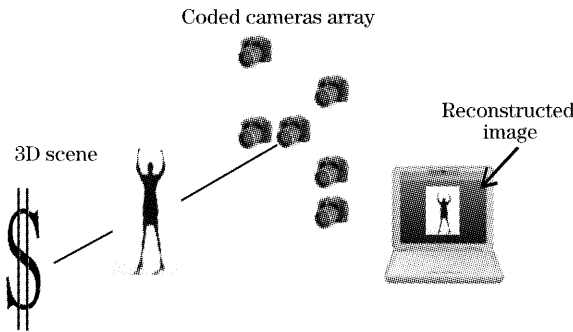


图 1 物体的编码记录和解码再现

Fig. 1 Coded record and computational reconstruction

## 2 原理分析

为了介绍编码记录和解码再现的原理我们将相机对物体的拍照简化为编码孔成像的形式,这一简化并没改变相机拍照这一过程的物理实质。

图 2 是编码记录的示意图,为简单起见,首先分析一个平面物体的情况,对于三维物体的情况将在后面分析。物体平面与相机平面距离为  $z$ ,成像平面是一个假想的将相机的成像介质连接在一起的平面,图 2 中

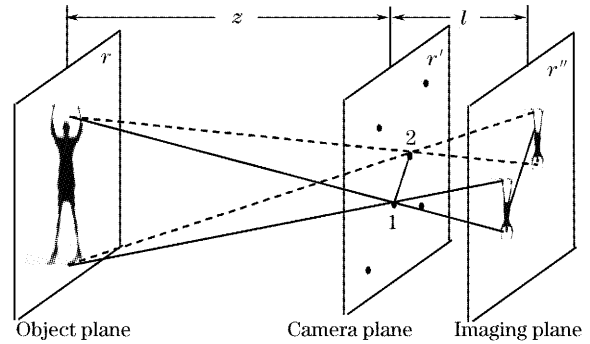


图 2 编码记录的基本原理

Fig. 2 Basic principle of coded recording

$$l = zf / (z - f), \quad (1)$$

$f$  代表相机的焦距,通过这一变换将相机阵列对物体拍照这一成像关系变换为图 2 所示的几何投影关系,相机平面上的点代表相机所在的位置,点的分布形式就是编码形式。每个相机拍摄一张物体的照片,物体在成像平面上形成一个倒立的缩小的像,如果用函数表示物体平面上的原始物体的话,成像平面上的像表示为  $O\left(-\frac{l}{z}r''\right)$ ,通过不同的相机拍摄的物体图像,因为相机在相机平面的分布位置不同,在成像平面上的分布位置也不相同,每个图像都以各自相机在图像平面的投影位置为投影中心,如果用  $C(r')$  函数表示相机的分布形式,根据几何投影关系在图像平面上这个分布形式被放大为  $C\left(\frac{z}{z+l}r''\right)$ ,所有的基元图像在成像平面的叠加就构成了编码图像  $I(r'')$ :

$$I(r'') = O\left(-\frac{l}{z}r''\right) * C\left(\frac{z}{z+l}r''\right), \quad (2)$$

显然编码图像  $I(r'')$  与原始的图像  $O(r)$  已经大不一样,解码的过程就是从编码图像  $I(r'')$  中恢复出与原始图像  $O(r)$  尽量相同的图像  $R(r)$  的过程。

本文采用的计算机解码算法原理基于光学反向投影的方法,其原理如图 3 所示。采用与相机编码形式  $C(r')$  完全相同的孔径分布形式  $D(r')$  作为解码形式,编码图像透过解码平面反向投影,得到解码再现图像:

$$R(r) = D(r') * I(r'') =$$

$$O(r) * \left[ D\left(\frac{l}{z+l}r\right) * C\left(\frac{l}{z+l}r\right) \right], \quad (3)$$

从图 3 中可以看出,当编码图像中的某一个基元图像通过投影得到它的那个孔反向投影时投影在原来物体的位置,形成再现图像(如图 3 中实线所示,基

元图像 A 通过孔 1 反向投影在原来物体的位置), 当通过其他的孔反向投影时投影在其他位置, 形成噪声(如图 3 中虚线所示, 基元图像 A 通过孔 3 反向投影情况)。从(3)式可以看出, 如果编码形式的自相关函数是一个  $\delta$  函数, 那么解码图像就是物体图像的真实再现, 不存在背景噪声。

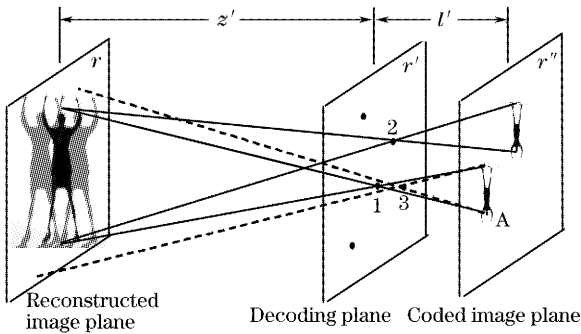


图 3 光学反投影法的基本原理

Fig. 3 Basic principle of optical reverse propagation

以上分析了平面物体的记录和解码再现的情况, 实际的三维物体可以看作是由无数个这样的平面物体叠加而成的, 用  $O_i(r)$  表示距离照相机平面不同深度的物体的分层图像, 在成像平面得到的编码图像就是所有的这些层的编码图像的叠加:

$$I(r'') = \sum_{i=1}^n O_i\left(-\frac{l}{z_i} r''\right) * C\left(\frac{z_i}{z_i + l} r''\right), \quad (4)$$

由(4)式可以看出, 距离照相机平面不同深度的物体层次在成像平面的放大率不同, 在成像平面的分布也随着相机分布形式在成像平面投影大小的不同而不同, 编码图像就是所有的物体层次在成像平面编码图像的叠加。反投影解码再现时通过调整解码平面与再现图像平面和编码图像平面的距离关系可以将不同层次的物体图像分层再现出来。(5)式给出了解码再现距离照相机平面为  $z_m$  的物体层的情况:

$$R_m(r) = O(r) * \left[ D\left(\frac{l}{z_m + l} r\right) * C\left(\frac{l}{z_m + l} r\right) \right] + \sum_{i=1}^n O\left(\frac{z_m}{z_i} r\right) * \left[ D\left(\frac{z_m}{z_m + l} r\right) * C\left(\frac{z_i}{z_i + l} r\right) \right]. \quad (i \neq m) \quad (5)$$

### 3 编码和解码

通过上文的分析可以看出编码形式对于解码图像的质量有着很大的影响, 尤其是它的自相关特性。得到广泛应用的编码形式主要包括随机码(Random code)、无冗余码(Nonredundant code)和均匀冗余码(Uniformly redundant code)。随机码是应用较

早的一种编码形式, 它是由 Dicke<sup>[2]</sup> 最先提出的, 一个典型的随机码的自相关函数如图 4(a) 所示, 图中已经对相关强度做了归一化处理, 从中可以看出随机阵列的两个缺点, 第一个缺点是它的旁瓣噪声过高(最大值接近中心峰的), 第二个缺点是它的旁瓣的不均匀性。

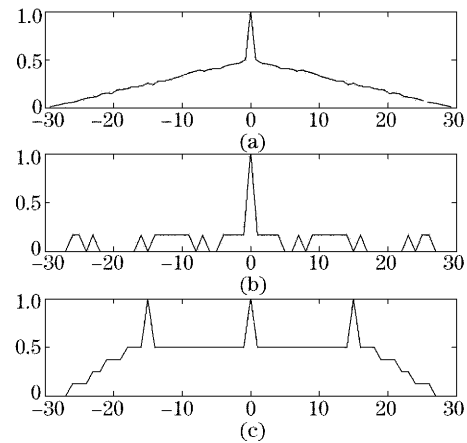


图 4 三种一维编码的自相关函数

Fig. 4 Autocorrelation functions of three code patterns

无冗余码的特点是码的分布是稀疏的, 如果用含有 1 和 0 的序列表示编码的话, 它的自相关函数[如图 4(b) 所示]中心峰值就是序列中 1 的数量, 旁瓣的数值只能是 1 或 0, 不会出现大于 1 的值。因为这个原因无冗余码能够最大限度地降低噪声。

均匀冗余码是近年来研究和应用都最为广泛的一种编码形式。1978 年 Fenimore<sup>[5]</sup> 提出了应用均匀冗余阵列作为编码形式的方法, 典型的均匀冗余阵列的一维周期性自相关函数如图 4(c) 所示, 相对于随机码和无冗余码而言, 均匀冗余阵列的最大优点是它具有均匀的旁瓣, 因此解码图像的背景噪声可以通过减去一个常量噪声值的方法消除。它的问题仍然是旁瓣噪声比较高。

三种编码形式比较而言, 无冗余码在成像信噪比方面具有明显的优势, 它的这一优势成为我们选择这种编码形式的主要原因。

按照解码方法的不同可以将解码方法分成光学解码方法和计算机解码方法两大类。光学解码方法<sup>[6~9]</sup> 已经被很多人广泛地研究过, 计算机解码方法<sup>[10,11]</sup> 实际上是对光学解码方法的一种模拟, 也就是说在计算机中完成光学解码的操作, 这种解码方法可以避免光学解码中由于光学元件的衍射效应导致的图像质量下降, 而且省去光学元件的开支, 还可以通过调整一些在光学解码中由于元器件的限制不能改变或者不能实现的参量来提高解码图像的质量。

量。本文参考了一些计算机解码算法<sup>[12~15]</sup>,设计了基于反向投影解码原理的计算机解码程序,应用该程序完成对编码图像的解码操作。

### 4 实验及结论

根据理论分析我们设计了初步的实验,以验证本文所述方法的可行性。物体模型只包含两个深度层次,其中一层是数字“1”,另一层是数字“2”,两层之间相距10 cm,不互相遮挡。本文参考了 Golay<sup>[16]</sup>的论文,生成了一个9个点的无冗余二维编码阵列,这个点阵的分布形式及其自相关函数如图5所示。为节省开支,实验采用一部佳能 PowerShotG2 数码相机依次在各编码位置拍照的方法代替由多个相机按照编码形式构成相机阵列一次拍照的方法,为表达和叙述方便以及上下文表达的一致性,我们仍采用相机阵列这一说法。物体模型靠近相机阵列的一层距离为150 cm,考虑照相机的视场等问题,相机阵列中相距最近的两部相机的距离为10 cm。

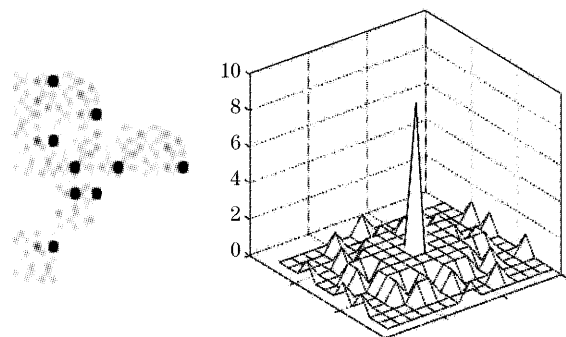


图5 实验所采用的编码及其自相关函数

Fig. 5 Code pattern and its autocorrelation function

图6(a)是拍摄的9幅基元图像中的两幅。图6(b)是将所有的基元图像合成得到的编码图像。图6(c)是应用我们设计的模拟光学反投影法的计算机程序解码得到的物体模型的分层图像。

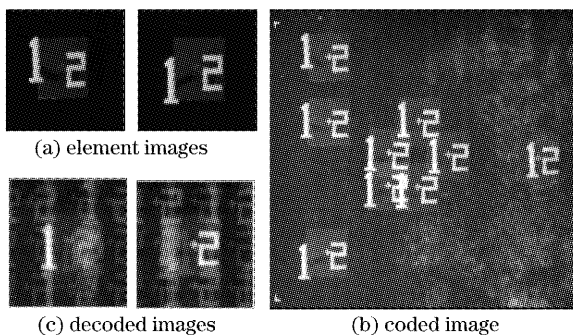


图6 实验结果

Fig. 6 Results of the experiments

从图6(c)可以看出,噪声影响了解码图像的质量,Tipton提出了一种迭代滤波的方法可以进一步降低解码图像中的噪声,他的基本思想是将解码图像作为物体再现图像的第一次评估,用它与不包含主峰的编码的自相关函数的卷积作为背景噪声的第一次评估,然后从物体图像的第一次评估中减去背景噪声的第一次评估得到物体再现图像的进一步评估结果,并将它作为物体再现图像的第二次评估结果,利用它计算出背景噪声的第二次评估,从物体图像的第二次评估中减去背景噪声的第二次评估得到物体图像的第三次评估结果……依此类推,可以得到物体再现图像经过不同次数的滤波处理的结果。

本文对 Tipton 的方法稍加修改,首先对解码图像,也就是物体图像的第一次评估,作归一化处理,然后对每次计算得到的背景噪声的评估和物体图像的评估也都作了归一化,图7和图8是物体模型的第一层和第二层的解码图像分别经过8次滤波得到的图像,图7(a)和图8(a)是最初的解码图像也就是相应物体层的第一次评估。从图7和图8可以看出经过这种迭代滤波处理后的再现图像背景噪声明显降低,图像质量进一步提高。

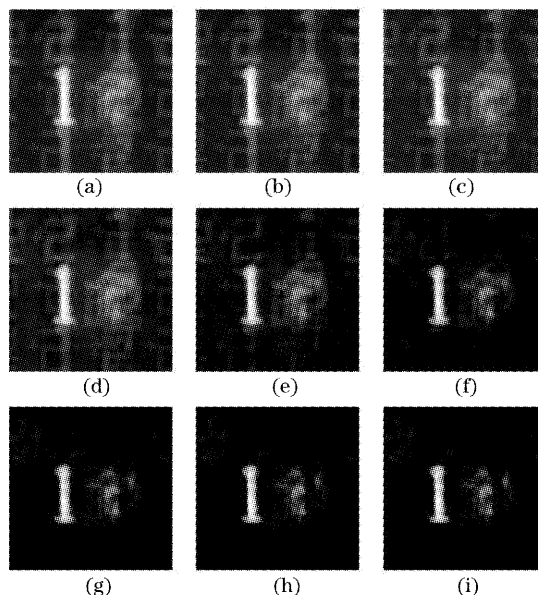


图7 物体模型第一层数字“1”解码图像的迭代滤波结果。(a)原始的解码图像,(b)~(i)分别经过1~8次滤波处理的解码图像

Fig. 7 Experimental results for reconstructed image digit “1” using iteration filtering algorithm. (a) Original reconstructed image of digit “1”, (b)~(i) filtered image after 1~8 iterations respectively

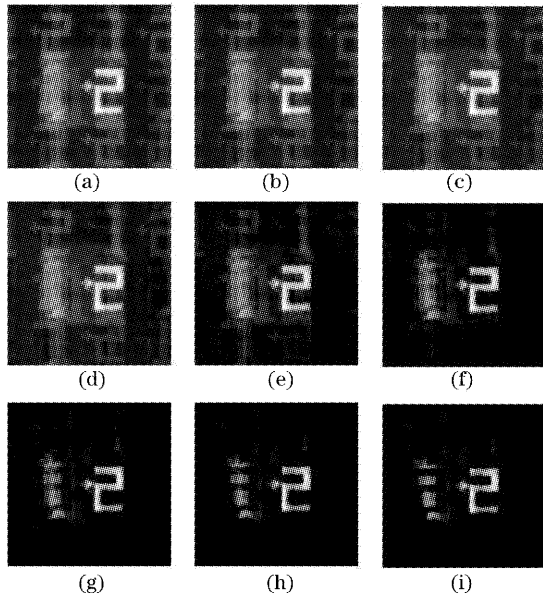


图 8 物理模型第二层数字“2”解码图像的迭代滤波结果。(a)原始的解码图像,(b)~(i)分别经过1~8次滤波处理的解码图像

Fig. 8 Experimental results for reconstructed image digit “2” using iteration filtering algorithm. (a) Original reconstructed image of digit “2”, (b)~(i) filtered image after 1~8 iterations respectively

相对于现有的一些三维成像方法及距离评价方法,本文提出的这种方法具有能够对远距离、大尺度的物体进行三维成像的优点,这些优点为该方法在空间遥感等方面的应用提供了可能性。

### 参 考 文 献

1 Yu Meiwen. *Optical Holography and Its Applications* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 70 (in Chinese)  
于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 70

2 Dicke. Scatter-hole cameras for X-rays and gama rays [J]. *Astrophys. J.*, 1968, **153**: L101  
3 L. Mertz, N. O. Young. Fresnel transformations of images[C]. *Proceedings, International Conference on Optical Instruments and Techniques*, 1961. 305~310  
4 Walton. An aperture imaging system with instant decoding and tomographic capabilities[J]. *Nucl. Med.*, 1973, **14**: 861  
5 E. E. Fenimore, T. M. Cannon. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(3): 337~347  
6 H. Weiss, E. Klotz, R. Lirrdde *et al.*. Coded aperture imaging with X-rays[J]. *Optica Acta*, 1977, **24**(4): 305~325  
7 E. Klotz, R. Linde, H. Weiss. A new method for deconvoluting coded aperture images of three dimensional X-ray objects [J]. *Opt. Commun.*, 1974, **12**(2): 183~187  
8 Liren Liu. Coded aperture three-dimensional tomographic imaging [J]. *Physics*, 1980, **10**(3): 134~140 (in Chinese)  
刘立人. 编码孔三维分层成像. *物理*, 1981, **10**(3): 134~140  
9 Chen Linsen, Jiang Yaguang. Coded aperture imaging: A HIF processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, **8**(10): 899~903 (in Chinese)  
陈林森,姜亚光. 编码孔径成像:一种全息逆滤波处理[J]. *光学学报*, 1988, **8**(10): 899~903  
10 E. E. Fenimore, T. M. Cannon. Uniformly redundant arrays: Digital reconstruction methods[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(10): 1858~1864  
11 J. Jimenez, Pedro Olmos, J. L. de Pablos *et al.*. Gamma ray imaging using coded aperture masks: A computer simulation approach[J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(5): 549~560  
12 Daniel L. Marks, David J. Brady. Three-dimensional source reconstruction with a scanned pinhole camera[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11): 820~822  
13 Lo. I. Yin, Stephen M. Seltzer. Tomographic decoding algorithm for a nonoverlapping redundant array[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(20): 3726~3735  
14 Yao Hongbing, He Anzhe. Improvement of the reconstruction algorithm of optical computerized tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 158~161 (in Chinese)  
姚红兵,贺安之. 光学层析重建算法改进的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 158~161  
15 Cheng Jing, Han Shensheng, Xu Zhizhan. The iterative algorithm of digital reconstruction of coding imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1349~1354 (in Chinese)  
程 静,韩申生,徐至展. 数字重建编码成像的迭代算法[J]. *光学学报*, 1998, **18**(10): 1349~1354  
16 Marcel J. E. Golay. Piont arrays having compact, nonredundant autocorrelations[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**: 272~273