

# 基于白光数字莫尔的三维数字成像系统\*

彭 翔 张宗华 朱绍明 胡小唐

(天津大学精密仪器及光电子工程学院, 天津 300072)

**摘 要** 提出一种基于数字莫尔的三维光学数字成像系统。此系统采用了非相干光投影和空间相移算法以及混合模板相位复原技术来重构连续位相分布图。给出一种光学几何灵敏度的确定方法并由此获得空间自由表面的三维数字图像。文中还给出由该光学数字化系统得到的真实人体面部的三维数字图像的实验结果。

**关键词** 三维光学数字化, 数字莫尔, 机器视觉。

## 1 引 言

三维物体形状的数字像在三维造型、自动检测、机器人视觉、医学诊断等方面有着广泛的用途。基于光学测量的常见方法有: 相位测量法<sup>[1]</sup>、空间相位检测法<sup>[2]</sup>、线性相位滤波法<sup>[3]</sup>、莫尔法<sup>[4]</sup>等。其中数字莫尔是基于相位映射的一类三维视觉技术。数字莫尔的核心在于将条纹自动分析技术与光学莫尔原理相结合, 通过对相位调制投影条纹图的数字解调首先获得与空间表面高度变化成正比的折叠相位分布图, 然后通过有效的相位复原技术来重建连续的相位分布图, 在此基础上还需根据光学几何的结构参数确定系统的灵敏度由此才能最终提取空间物体表面的三维数字像。

最近, 我们曾报道了基于空间数字相移广义载波条纹图自动分析的相干光数字莫尔技术<sup>[5, 6]</sup>。随后, 又提出了基于混合模板的相位复原技术<sup>[7, 8]</sup>。本文将利用空间数字相移和基于混合模板构造的相位复原方法及特别设计的正弦光栅建立非相干光数字莫尔系统, 并进一步给出重建的相位分布图与空间物体表面三维数字像的映射关系及实验确定方法, 由此建立三维光学数字成像系统。

## 2 系统设计

三维光学数字成像系统如图 1 所示。光学部分由非相干光投影单元和特别设计的正弦光栅及光学成像单元组成, 三维数字图像处理的硬件部分由 CCD 摄像机、图像采集系统、计算机和监视器组成。软件部分包括: 条纹图采集模块、空间数字相移模块、折迭相位分布图计算方法模块、混合模板构造模块、相位复原算法模块、相位分布图与空间物体表面三维数字

\* 国家自然科学基金资助项目(69875013)。

收稿日期: 1998-04-27; 收到修改稿日期: 1998-07-07

像映射模块、及三维数字像显示模块等。所有这些功能模块和分层管理的人机交互界面是根据面向对象(OOP)的思想利用 C++ 设计的, 构成一个功能强大的三维光学数字成像系统自动分析软件包。

## 2.1 系统设计原理

本系统的自制光栅是用计算机模拟产生正弦型光栅, 采用照相制版的方法得到的。投影

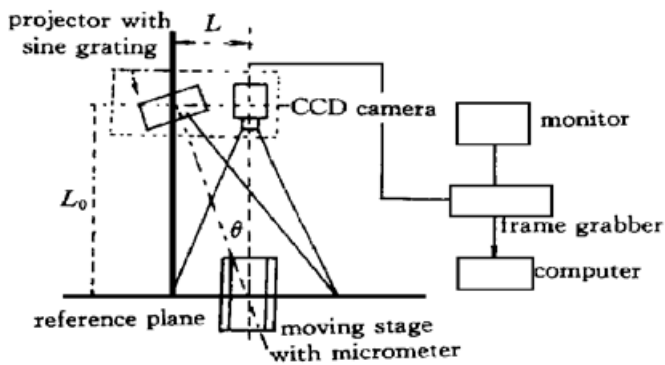


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for determining optical sensitivity

系统把此光栅条纹投影在物体表面时, 受物体表面形状的调制, 其变形光场可表示为:

$$I(x, y) = r(x, y) \{ a(x, y) + b(x, y) \times \cos [ 2\pi x / P_0 + \Delta\varphi(x, y) ] \} \quad (1)$$

式中,  $r(x, y)$  为与物体表面反射率有关的参数,  $a(x, y)$  为背景光强,  $b(x, y)$  为条纹对比度,  $P_0$  为条纹周期,  $\Delta\varphi(x, y)$  是与物体表面形状相关联的相位因子。采用基于混合模板的相位复原技术可获得连续的相位分布。连续的相位分布和物体表面各点相对高度之间的

关系由系统的灵敏度  $K$  确定。标定系统的光学结构参数, 由下述的(4)式即可求得  $K$ , 从而可求得待测物体的三维数字像。

## 2.2 系统算法总体思路

本系统算法的总体思路可用一个流程图表示如下:

原始条纹图 → 空间相移 → 折迭相位 → 混合模板构造 → 相位复原 → 物体三维数字像 → 三维数字像的显示

## 2.3 空间数字相移算法

折迭相位可按如下公式计算<sup>[5]</sup>:

$$\Delta\varphi(m, n) = \arctan \left[ \frac{I_3(m, n) - I_1(m, n)}{I_3(m, n) + I_1(m, n) - 2I_2(m, n)} \right] \quad (2)$$

其中,  $I_i(m, n)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 相应于三幅相互之间经过  $90^\circ$  空间数字相移的相位调制投影条纹图。根据(2)式计算得到了折迭相位, 折迭相位在  $\Delta\varphi(m, n) = \pm\pi$  处存在  $2\pi$  弧度的间断点。在具体的程序设计时, 将整个折迭相位值平移  $2\pi$  弧度, 即折迭相位在  $(0, 2\pi)$  处存在  $2\pi$  弧度的间断点。

## 2.4 基于混合模板的相位复原算法

如果条纹图包含边界区域, 则在边界内的像素具有很低的广义振幅值, 说明条纹图在边界内包含无效像素。这些无效像素丢失了相位的精度, 导致了相位复原过程的局部误差传播。于是, 根据广义振幅值有可能通过设置阈值来识别边界区。混合模板是在使用模板技术标出图像的边界区域以及用折迭相位识别出高频噪声局部间断源的基础上构造而成的。获得误差源的混合模板数据后, 就可以进行相位复原。其基本思想是: 按行逐行进行相位复原, 当扫描到某一行时, 则将该行的有效像素都进行相位复原; 对于无效像素, 则全部置 0。在相位复原时, 复原路径不通过已经标定的无效点, 从而避免误差源的传播, 便可以得到正确的连续相位分布<sup>[7, 8]</sup>。

## 2.5 系统光学参数设计

系统所用的 CCD 靶面单个像素尺寸水平×垂直为  $12.7 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$ ; 摄像感测面积水平×垂直为  $6.4 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$ 。投影系统透镜焦距  $f_2 = 85 \text{ mm}$ 。假设探测面积为  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ , 成像系统和投影系统物距均为  $l_2 = 1000 \text{ mm}$ 。根据这些条件可设计得到投影及成像系统的参数:

1) 成像系统放大率为:  $a_1 = 400/4.8 = 83.33$ ; 2) 摄像机成像透镜焦距为:  $f_1 = l_2/(a_1 + 1) = 11.86 \text{ mm}$ ; 为满足在 CCD 靶面上每一条纹水平方向有四个像素<sup>[1, 2]</sup>, 根据 CCD 靶面单个像素水平尺寸和成像系统放大率  $a_1$  可计算出物面每一条纹宽度为:  $w = 4 \times 0.0127 \times a_1 = 4.23 \text{ mm}$ 。

2) 根据投影系统透镜(场镜)焦距  $f_2$  和物距  $l_2$  可求得投影系统像距  $l_1 = f_2 l_2 / (l_2 - f_2) = 92.89 \text{ mm}$ ; 投影系统的放大率为:  $a_2 = l_2 / l_1 = 10.76$ ;

3) 根据物面每一条纹宽度和投影系统放大率  $a_2$  求得物面光栅节距为:  $P = w / a_2 = 0.39 \text{ mm}$ ; 每毫米光栅数(即条纹空间频率)为:  $n = 1/P = 2.54 \text{ 1/mm}$ 。

可以根据不同要求的探测面积和摄像机成像系统及投影系统物距(工作距离), 按照以上方法设计得到相应的投影及摄像系统参数。

## 3 系统光学灵敏度的实验确定

重建的相位分布图与空间物体表面三维数字像的映射关系由系统的灵敏度确定<sup>[9]</sup>。即,

$$\Delta\phi(x, y) = K \Delta z(x, y) \quad (3)$$

式中  $K$  为系统的灵敏度,  $\Delta\phi(x, y)$  为相对相位分布,  $\Delta z(x, y)$  为空间物体表面的高度变化, 即三维数字像。理论上, 系统的灵敏度的解析表达可根据光学空间几何的结构参数推导出来。根据光学空间几何关系在一级近似的情况下可推导出:

$$K = \frac{2\pi L \cos \theta}{P_0 L_0} \quad (4)$$

式中  $P_0 = L_0 P / d \cos \theta$  为光栅投影在校准平板上的空间周期;  $d$  为光栅中心到投影系统出瞳中心的距离;  $P$  为光栅周期;  $\theta$  为投影系统光轴与成像系统光轴之间的夹角;  $L$  为投影系统出瞳和成像系统入瞳的中心之间的距离;  $L_0$  为投影系统出瞳和成像系统入瞳的中心到校准平板初始位置的距离。

本文给出一种通过实验确定光学灵敏度的方法。实验系统如图 1 所示。投影系统把光栅投影在具有漫反射效应的校准平板上。由 CCD 摄像机摄取此时投影在校准平板上的光栅图作为参考条纹图。水平导轨用以控制校准平板沿着成像系统光轴的方向移动, 并且用精度为  $0.01 \text{ mm}$  的螺旋微调器来控制每次移动的距离。成像系统和投影系统中心的距离为:  $L = 182.5 \text{ mm}$ , 校准平板到成像系统中心的原始距离  $L_0 = 1500 \text{ mm}$ , 从而可以容易计算角度  $\theta$ 。光栅的空间周期  $P$  已知, 利用投影关系可求出在  $L_0$  位置时投影光栅在坐标原点的空间周期为:  $P_0 = 4.23 \text{ mm}$ 。

实验时, 首先利用 He-Ne 激光将成像系统光轴和导轨精确调节在同一直线上, 以保证平板移动时沿着成像系统光轴的方向。投影系统将光栅投影在校准平板上, 由 CCD 摄像机摄取光栅条纹图, 经图像采集卡数字化后输入计算机。调整平板每次前移  $\Delta z = 1 \text{ mm}$ , 并采集相应的条纹图。同样的过程重复 100 次, 采集下 101 幅图像。然后, 利用空间相移算法计算出各

个位置时原始条纹图的折迭相位分布。把第一幅条纹图,即对应  $L_0 = 1500 \text{ mm}$  位置时的条纹图作为参考条纹。从第二幅开始的折迭相位图依次和第一幅折迭相位图相减,算得对应全场各个位置时的相位差  $\Delta\Phi(m, n)$  ( $i = 1, 2, \dots, 100; m, n = 0, 1, 2, \dots, 511$ ),再根据相位与表面高度变化的映射关系将相位  $\Delta\Phi(m, n)$  值转换成实际高度变化坐标  $\Delta z_{ti}$  ( $i = 1, 2, \dots, 100; m, n = 0, 1, 2, \dots, 511$ ) 值,称之为计算值。根据实验过程,这 100 幅光栅条纹图的相对参考平面的  $z$  坐标已经给出,作为实验值  $\Delta z_{ei}$  ( $i = 1, 2, \dots, 100;$ )。为保证数值的可靠性,计算  $\Delta z_{ti}(m, n)$  的平均值。在保证光栅条纹和  $y$  轴平行的情况下,可仅对水平方向的点平均,而在垂直方向取中间的点。即:

$$\overline{\Delta z_{ti}} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \Delta z_{ti}(m, \frac{N}{2}) \quad (5)$$

式中  $M$ 、 $N$  分别表示 CCD 在水平和垂直方向的像素个数(512, 512)。由此可计算出校准平板在纵向各个位置(相应于不同的  $z$  坐标)时的相对误差为:

$$e_{ri} = \frac{|\overline{\Delta z_{ti}} - \Delta z_{ei}|}{\overline{\Delta z_{ti}}} \times 100\%, \quad (i = 1, 2, \dots, 100) \quad (6)$$

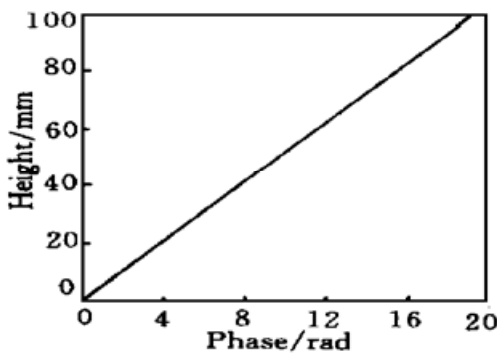


Fig. 2 Experimental relationship between phase map and 3D range image of object surface

平均相对误差为:

$$\overline{e_r} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} e_{ri} \times 100\% \quad (7)$$

把实验方法得到的结果与用(3)式计算得出的结果比较,发现它们的平均相对误差为 0.75%。

图 2 表示相对相位与表面高度变化的实验关系曲线。图中的实线表示计算值,点表示实验值,该拟合直线的斜率即为所要确定的光学灵敏度。根据图 2 可由实验的方法确定光学灵敏度  $K$ ,进而获得重建的相位分布图与空间物体表面三维数字像的映射关系。

## 4 实验结果

根据本文建立的三维光学数字成像系统所得到的真实人脸的三维数字化实验结果示于图 3。其中,图 3(a)表示相位调制投影条纹图;图 3(b)表示根据空间相移算法得到的折迭相位

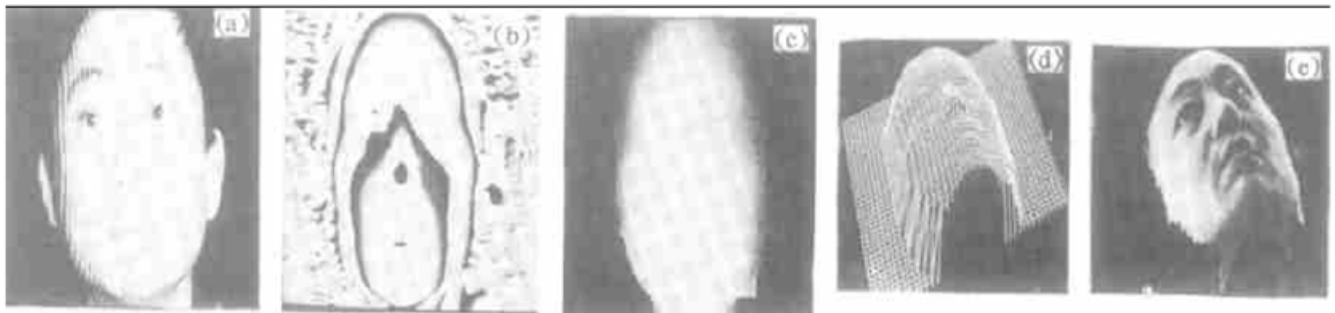


Fig. 3 Experimental result for human face digitization. (a) Phase modulated fringe pattern of the projection onto a human face, (b) Wrapped phase map obtained by spatially digital phase-shift algorithm, (c) Unwrapped phase map obtained by a composite-template construction technique, (d) Mesh plot for 3D reconstruction of a human face, (e) Reconstructed texture of 3D image for a human face

图; 图 3(c) 表示根据混合模板相位复原技术得到的连续相位分布图; 图 3(d) 表示重建的人脸三维数字像网格图; 图 3(e) 表示重建的人脸三维数字像的纹理图。

**讨 论** 利用此系统, 可以一次获得物体形状的三维数字像, 具有大面积、非接触、重复性好、精度高(相对误差可达 0.75%)等优点。当然, 还有许多问题有待解决: 如何获得对比度较好的莫尔条纹, 在实验之前, 如何更加精确地标定系统的光学结构参数等。

### 参 考 文 献

- [1] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse object. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18) : 3105~ 3108
- [2] Toyooka S, Iwaasa Y. Automatic profilometry of 3-D diffuse object by spatial phase detection. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10) : 1630~ 1633
- [3] Tang Shouhong, Hung Y Y. Fast profilometer for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(20) : 3012~ 3018
- [4] Meadows D M, Johnson W O, Allen J B. Generation of surface contours by moire pattern. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(4) : 942~ 947
- [5] 彭 翔, 高 志, 朱绍明等. 光学广义载波条纹图的计算机辅助分析. *中国激光*, 1995, **22**(7) : 541~ 545
- [6] 彭 翔, 朱绍明, 高 志. 基于广义载波条纹图数字解调的三维形貌测量技术. *光学学报*, 1995, **15**(10) : 1385~ 1388
- [7] 彭 翔, 朱绍明, 叶声华. 含噪声及分割间断区的光学条纹图的位相解码. *中国激光*, 1997, **24**(4) : 352~ 358
- [8] Peng X, Zhu S M, Ye S H *et al.*. The problem of phase unwrapping for fringe pattern overlaid with random noise and segmented-discontinuity. *Proc. SPIE*, 1996, **2899** : 96~ 104
- [9] Wykes C, Morshedizadeh R. Surface topography measurement using digital moire contouring. *Proc. Instn Mech Engrs.*, 1995, **209** : 317~ 325

## 3D Digital Imaging System Based on White-Light Digital Moire

Peng Xiang      Zhang Zonghua      Zhu Shaoming      Hu Xiaotang

(College of Precision Instrumentation & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 27 April 1998; revised 7 July 1998)

**Abstract** A 3D digital imaging system based on white-light digital moire is presented. The system makes use of incoherent illumination and a spatially digital phase-shift algorithm as well as an efficient phase unwrapping algorithm with the composite-template construction technique. In addition, an approach to the determination of optical geometry sensitivity is given from which the 3D digital image of surface topography can be obtained. The 3D digital image made on a human face as an experimental result is shown.

**Key words** 3D optical digitizing, digital Moire, machine vision.