

# 基于高度信息的自由曲面可编辑投影显示技术

李彦<sup>\*\*</sup>, 苏显渝, 陈文静<sup>\*</sup>

四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610065

**摘要** 提出了一种基于高度信息的自由曲面可编辑投影显示技术。利用基于条纹投影的平面标定技术,建立了测量范围内的相位-高度映射表;采用高精度相移技术和三频时间相位展开方法,获得了自由曲面的水平和垂直相位分布信息;利用反向条纹投影技术建立了投影仪像素与相机像素间的几何及强度传递关系。利用该显示技术可在曲面上投影基于其高度信息的预期编码图像,实现高度信息的可编辑投影和三维显示。给出了在自由曲面上投影等高线和伪彩色编码、冰川雪线变化的动态过程及仿真实体添加等实例。

**关键词** 机器视觉; 视觉测量; 反向条纹投影技术; 可编辑投影; 相位-高度映射; 高度编码

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815026

## Editable Projection Display Technology of Free-Form Surfaces Based on Height Information

Li Yan<sup>\*\*</sup>, Su Xianyu, Chen Wenjing<sup>\*</sup>

Department of Optic-Electronic, College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

**Abstract** An editable projection display technology of free-form surfaces based on height information is proposed. The plane calibration technology based on fringes projection is used to establish the phase-height mapping table within the measurement range. The horizontal phase and vertical phase distributions on the free-form surface can be obtained by using the high-precision phase-shifting technique and the three-frequency temporal-phase unwrapping method. The geometry and intensity transfer relations between the projector pixels and the CCD camera pixels are established by the inverse fringe projection technology. By this display technique, the expected encoded image based on its height information can be projected on the free-form surface to realize an editable projection of high information and a 3D display. Some examples, such as the contour and the pseudo-color encoding projection on free-form surfaces the dynamic projection of glacier snowline variation and the add of simulation entities are given.

**Key words** machine vision; visual measurement; inverse fringe projecting technique; editable projection; phase-height mapping; height-encoded

**OCIS codes** 150.1135; 120.2650; 120.2830

## 1 引言

基于结构光投影的三维测量技术具有快速、非接触、高精度等优点,被广泛应用于产品质量控制、医学诊断、机器视觉等领域<sup>[1-4]</sup>。其中,傅里叶变换轮廓术<sup>[5-6]</sup>仅需采集一帧变形条纹图即可实现三维形貌测量,但其测量精度有限,且难以测量复杂物体。相位测量轮廓术<sup>[7-8]</sup>可实现复杂物体的高精度测量,但至少需要采集三幅具有一定相移量的变形条纹图,不适合瞬时和动态过程的测量。与上述投影直条纹的传统条纹投影技术不同,反向条纹投影

技术通过建立投影仪与电荷耦合器件(CCD)相机像素间的位置和强度传递关系,将变形条纹图投影到物体上,得到期望条纹图,能方便地用简单的技术快速完成形貌检测。

反向条纹投影技术由 Schönleber 等<sup>[9]</sup>于 1997 年提出。Li 等<sup>[10-11]</sup>对反向条纹投影技术的原理和应用前景进行了详细阐述,并将其应用于工业元件的检测中。Leckel 等<sup>[12]</sup>利用该技术实现了动态形变物体的检测。蔡元元等<sup>[13-14]</sup>将反向条纹投影技术应用于多投影仪的拼接。唐廷勇等<sup>[15]</sup>基于反向条纹投影技术解决了球面屏幕投影的形变问题。

收稿日期: 2018-03-30; 修回日期: 2018-06-01; 录用日期: 2018-06-11

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项(2013YQ490879)

\* E-mail: chengwj0409@scu.edu.cn; \*\* E-mail: liyan\_9303@163.com

肖朝等<sup>[16-17]</sup>提出了一种基于正向相位映射的反向条纹生成的方法以及一种提升反向条纹测量精度的方法。

目前,反向条纹投影技术主要用于检测工业元件的形变、拼接多投影仪及校正曲面投影变形等方面,关于其在三维显示技术中的应用研究鲜有报道。现有的电子沙盘<sup>[18-19]</sup>显示技术,虽然具有强大的数据库支撑,可以模拟实地景观,但仍是在平面显示屏上显示三维实体在二维平面上的投影效果,缺乏在三维实物模型上显示的真实感。

本文提出了一种基于高度信息的自由曲面可编辑投影显示技术,该技术可在三维实物模型上实现具有真实感的三维显示。该方法包括三个基本技术步骤:1)采用基于条纹投影的平面标定技术,建立测量范围内的相位-高度映射表,以查表获得自由曲面

的高度信息;2)投影水平和垂直条纹,利用高精度相移技术和三频时间相位展开方法,获得自由曲面的水平和垂直相位信息,建立投影仪与 CCD 相机间的几何及强度传递关系;3)根据建立的传递关系,将基于高度编码的图像投影在自由曲面上,实现具有真实感的三维投影显示。给出了在自由曲面上投影等高线和伪彩色编码、冰川雪线变化的动态过程及仿真实体添加等实例。该技术还可以用于实物沙盘模型上的兵棋推演、铁路和高速公路建设的路径优选等。当自由曲面较大时,可以通过多投影仪拼接来实现可编辑的三维投影显示<sup>[20]</sup>。

## 2 原 理

### 2.1 高精度相位-高度映射关系的建立

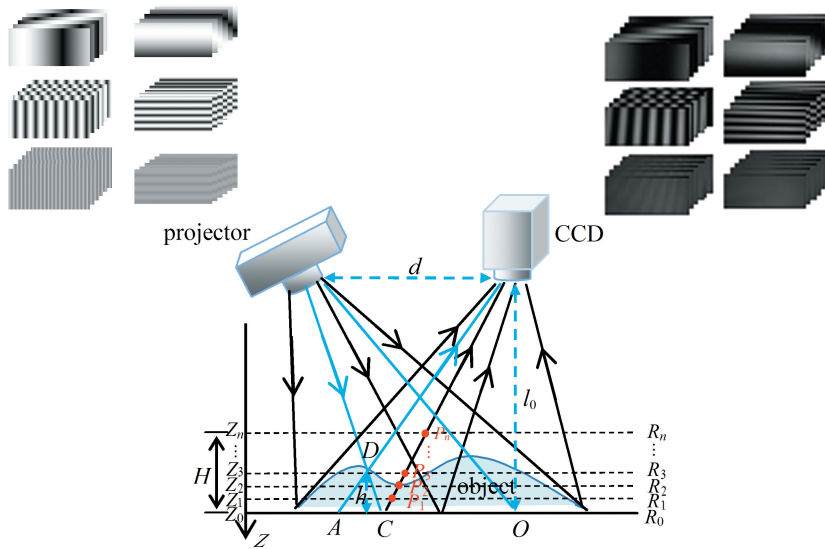


图 1 测量系统的理想光路和建立相位-高度映射关系的原理示意图

Fig. 1 Ideal light path in measurement system and schematic of establishment of phase-height mapping relation

图 1 所示为测量系统的理想光路和建立相位-高度映射关系的原理示意图。系统的光路由蓝色实线表示, $d$  为投影仪镜头中心到 CCD 镜头中心的距离(平行于参考面  $R_0$ ), $l_0$  为 CCD 镜头中心到参考平面  $R_0$  的距离,投影仪光轴和 CCD 光轴交于参考平面的  $O$  点。 $D$  为物面上某点,到参考面  $R_0$  的距离记为  $h$ 。 $R_i (i=1,2,\dots,n)$  为测量范围内固定高度的平面, $Z_i (i=0,1,2,\dots,n)$  为平面的高度, $H$  为高度的测量范围。当参考面上放置物体时,CCD 观察到的物面上的  $D$  点相当于参考平面上的  $A$  点, $D$  点和  $C$  点的相位相等。投影仪投射标准正弦条纹到物体表面,CCD 记录经物体反射的变形条纹图,变形条纹  $I(i,j)$  表示为

$$I(i,j) = I_0(i,j) + I_0(i,j)r(i,j)\cos[2\pi f_0 i + \varphi(i,j)] + \eta(i,j) \quad (1)$$

式中  $I_0(i,j)$  为背景光强, $f_0$  为正弦条纹的基频,

$r(i,j)$  为物体表面的非均匀反射率, $\varphi(i,j)$  为系统结构参数和物面高度引起的附加相位分布, $\eta(i,j)$  为系统噪声。参考面上的相位分布表示为  $\varphi_0(i,j)$ ,物体放置在参考面上进行测量时,由物体高度变化引起的相位的变化为  $\Delta\varphi(i,j)$ ,在远心光路的理想情况下,CCD 上  $(i,j)$  像素记录的高度  $h(i,j)$  的计算公式为

$$h(i,j) = \frac{l_0 \Delta\varphi(i,j)}{\Delta\varphi(i,j) - 2\pi f_0 d} \quad (2)$$

(2)式也可以写为

$$\frac{1}{h(i,j)} = \frac{a_0}{\Delta\varphi(i,j)} + b_0, \quad (3)$$

式中  $a_0 = 2\pi f_0 d / l_0$ ,  $b_0 = 1 / l_0$ 。由(3)式可知,在远心光路的理想条件下,高度与相位间的关系可描述为线性关系。但实际的系统结构很难满足上述理想条件,故相位-高度映射关系不能简单地用线性关系表示。在建立高精度相位-高度映射表时,既可采用

多项式拟合也可采用分段线性拟合。一般而言,当镜头畸变不大时,采用多项式拟合能够保证较高的精度;但在镜头畸变较大时,采用分段线性拟合可以保证较高的精度。采用多次多项式拟合的相位-高度的公式为

$$h(i, j) = C_0(i, j) + C_1(i, j)\varphi(i, j) + C_2(i, j) \cdot \varphi^2(i, j) + C_3(i, j)\varphi^3(i, j) + \dots, \quad (4)$$

式中多项式拟合系数  $C_x(i, j)$  ( $x=0, 1, 2, \dots$ ) 由标定方法确定<sup>[21-23]</sup>。参考文献[24]给出了分段线性拟合相位-高度映射关系的建立方法,本文采用分段线性拟合法。

## 2.2 反向条纹投影技术的原理

反向投影的关键在于建立投影仪坐标  $(l, m)$  与 CCD 坐标  $(i, j)$  之间的映射关系,包括几何和强度的反向传递关系。图 2 所示为投影仪与 CCD 间几何关系建立的过程。1) 计算机产生已知相位分布且满足相移技术和三频时间相位展开方法条件的水平条纹和垂直条纹图,并分别投影到三维物体上(以竖条纹为例);2) 利用多步相移技术和三频时间相位展开技术从 CCD 获取的变形条纹中得到展开相位;3) 根据绝对相等的关系,建立投影仪与 CCD 间水平(垂直)方向上的几何对应关系。

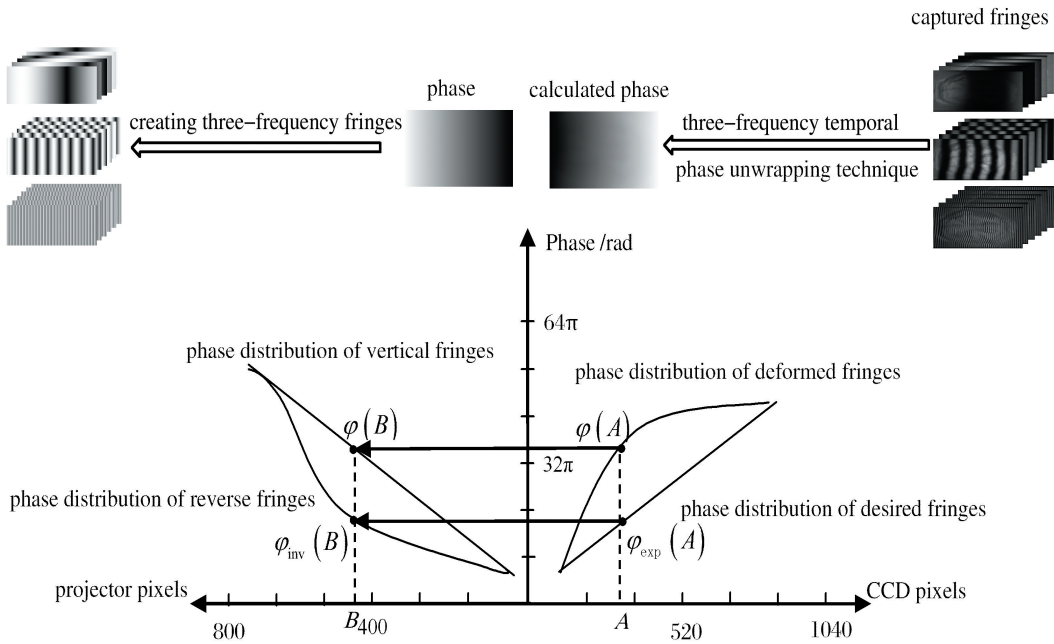


图 2 投影仪与 CCD 之间几何关系建立的过程图

Fig. 2 Process of establishment of geometric relationship between projector and CCD

如图 2 所示, CCD 靶面上任意点 A 从变形条纹中计算出来的相位为  $\varphi(A)$ , 利用投影仪与 CCD 对应点相位相等的关系  $\varphi(A) = \varphi(B)$ , 可找到 A 点在投影仪上对应 B 点的位置。假设期望在 A 点得到一个新的相位值  $\varphi_{\text{exp}}(A)$ , 需要给像素点 B 赋予相位值  $\varphi_{\text{inv}}(B)$ , 且  $\varphi_{\text{inv}}(B) = \varphi_{\text{exp}}(A)$ 。遍历 CCD 上的所有像素位置, 即能确定投影仪每个像素点的相位值, 从而计算出反向条纹。

不失一般性设垂直方向上标准的正弦条纹为

$$I_{\text{pro.v}}(l, m) = 0.5 + 0.5\cos[\varphi_v(l, m)], \quad (5)$$

式中  $\varphi_v(l, m)$  为投影仪面上点  $(l, m)$  的相位, 可表达为

$$\varphi_v(l, m) = 2\pi m / P, \quad (6)$$

式中  $P$  为条纹周期。该条纹投射到物体上经漫反射后, CCD 获得变形条纹  $I_{\text{cam.v}}(i, j)$ , 表示为

$$I_{\text{cam.v}}(i, j) = I_0(i, j) + I_0(i, j)r(i, j) \cdot \cos[\varphi_v(i, j)], \quad (7)$$

式中  $\varphi_v(i, j)$  为 CCD 上点  $(i, j)$  的相位。根据投影仪与摄像机对应点的绝对相位相等的关系  $\varphi_v(l, m) = \varphi_v(i, j)$ , 可建立投影仪与摄像机间的水平方向上的几何位置关系:

$$m(i, j) = P\varphi_v(i, j) / (2\pi). \quad (8)$$

重复上述过程, 投影水平条纹, 获得投影仪与摄像机垂直方向上的位置关系  $l(i, j)$ , 从而建立其几何关系。CCD 整像素点  $(i, j)$  在投影仪上的对应点通常为非整像素点, 如图 3 中空点所示。在投影仪生成反向投影图时, 需要利用插值技术<sup>[11, 25]</sup>来得到投影仪上整像素点的值, 如图 3 中实心点所示。

由(5)、(7)式可以得到投影仪与摄像机间的强度映射关系为

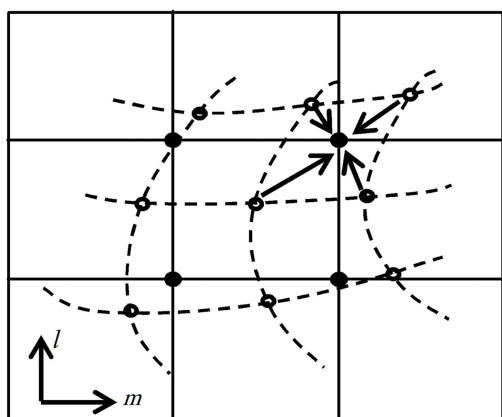


图 3 摄像机像素点映射到投影仪坐标系  $(l, m)$  的示意图  
Fig. 3 Schematic of mapping of camera pixels to  $(l, m)$  in projector coordinate

$$I_{\text{pro},v} = \frac{I_{\text{cam},v} - I_0 + I_0 r}{2I_0 r} \quad (9)$$

基于位置传递关系和强度传递关系,投影仪可以在被测曲面上投影显示满足预期要求的图像。

采用反向条纹投影技术,并不需要描述完整的图像形成过程,只需要投影仪像素阵列  $(l, m)$  和 CCD 相机阵列  $(i, j)$  之间的几何和强度变换的信

息。该过程可以描述为

$$\begin{pmatrix} l \\ m \\ I_{\text{pro}} \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} i \\ j \\ I_{\text{CCD}} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中  $f$  为两个阵列之间的变换函数,它建立了 CCD 相机像素与投影仪像素之间的映射关系,本质上代表自由曲面对两个阵列之间光线传递过程的调制。因此,利用 2.1 节所描述的相位与高度映射关系,可以获得 CCD 相机像素  $(i, j)$  上的高度信息,将其编码后即可通过 (10) 式传递到投影仪的像素  $(l, m)$  上。可见只要自由曲面确定,投影仪和 CCD 相机像素之间的几何关系即变换函数  $f$  也唯一确定。因此在不同的应用中,可以根据需要对高度信息用不同的编码方式,实现可编辑投影显示。

### 2.3 基于高度信息的可编辑投影方法

利用编码物体的高度信息结合建立的几何和强度反向传递关系,可实现基于高度信息的可编辑投影和三维显示。

#### 2.3.1 基于高度信息的假彩色可编辑投影

假彩色编码<sup>[26]</sup>将单色图像赋予彩色的处理,基于一种指定的规则对灰度值赋以颜色。

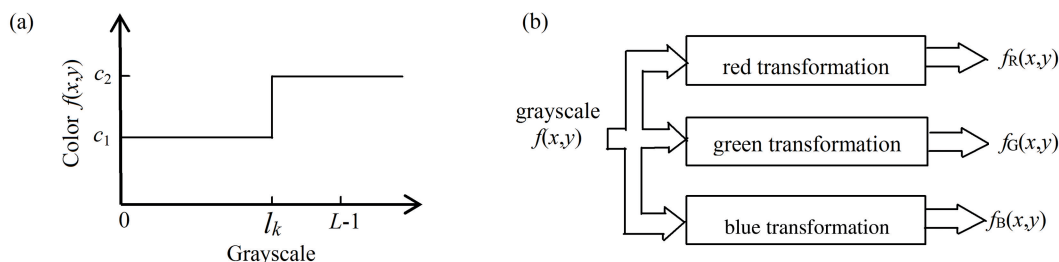


图 4 假彩色编码原理图。(a)灰度分层技术 (b)灰度图伪彩色处理

Fig. 4 Principle of pseudo-color encoding. (a) Grayscale stratification technique; (b) grayscale pseudo-color processing

图 4(a)所示为基于灰度分层技术的假彩色图像编码原理示意图。当灰度级为  $0 \sim l_k$  时,颜色赋为  $c_1$ ;当灰度级大于  $l_k$  时,颜色赋为  $c_2$ 。灰度图假彩色变换编码技术如图 4(b)所示,变换得到的三个分量分别输入红绿蓝(RGB)三通道,即可合成一幅假彩色图像。基于高度信息的假彩色编码先将高度信息映射到范围为  $[0, 255]$  的灰度值,然后可通过上述两种假彩色编码方式对其进行编码。

3.1 节实验中设计的各个通道的灰度-强度编码函数如图 5 所示。将物体的高度映射到  $[0, 255]$  灰度级范围内后作为输入函数,分别通过 R、G、B 变换函数将灰度级进行变换,合成期望的彩色图作为输出。

结合投影仪与 CCD 间的传递关系,实现基于高度信息的假彩色可编辑投影。

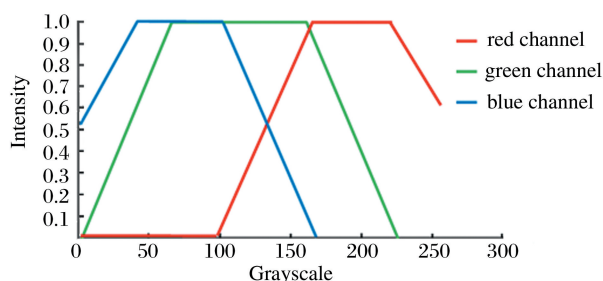


图 5 彩色变换编码函数示意图

Fig. 5 Schematic of color-encoding function

### 2.3.2 基于高度信息的等高线可编辑投影

等高线是指地形图上高度相等的相邻各点所连成的闭合曲线。借用灰度分层思想定义等高线时,在等高线位置,灰度值设置为 0,其余位置灰度值设置为 1。如图 6 所示,以两条等高线为例详细说明等高线编码的原理,假设需在高度为  $H_1$ 、 $H_2$  位置生成两条等高线,为了让显示的等高线具有一定的宽度,设置阈值  $U$ ,当某点高度  $H(x,y)$  满足  $H_1-U \leq H(x,y) \leq H_1+U$  或  $H_2-U \leq H(x,y) \leq H_2+U$  时,将该点的灰度值赋为 0(黑色),否则赋值为 1(白色)。若要在某一高度范围内,生成  $n$  条等高线,应将高度等分为  $n+1$  份,确定等高线位置  $H_1, H_2, H_3, \dots, H_n$ ,按照所述的两条等高线编码方法对其进行编码。

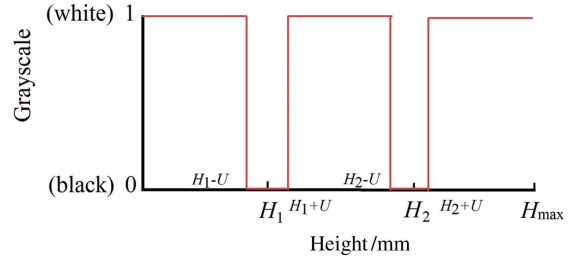


图 6 等高线编码的示意图

Fig. 6 Schematic of contour-encoding

当  $U=0.5$  时,等高线可表示为

$$C(x,y) = \text{round}^+ \left( \frac{\prod_{i=1}^n \text{round} \left| H(x,y) - i \frac{H_{\max} - H_{\min}}{n+1} \right|}{\prod_{i=1}^n H_{\max}} \right), \quad (11)$$

式中  $H_{\max}$  和  $H_{\min}$  分别表示最高和最低高度,round 表示以四舍五入法取整,round<sup>+</sup> 表示以进一法取整, $n$  为等高线条数。若某点在等高线上, $C(x,y) = 0$ ;若某点不在高度线上, $C(x,y) = 1$ 。

## 3 实验

图 7 所示为实验装置。投影仪是数字光处理(DLP)投影仪,分辨率为  $1280 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$ ; CCD 的分辨率为  $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$ ;被测物体是一个山峰的沙盘模型。采用相移(PS)技术、三频时间相位展开方法和标定技术得到山峰的三维面形分布,然后将高度信息以不同的形式编码,并生成投影图像,再通过投影仪将编码好的高度信息投影到三维模型上,从而可在三维面上观察到不同的图案。商用 DLP 投影仪存在伽马非线性效应,会影响到 PS 方法的相位计算精度,故需要对其进行伽马校准,使经投影仪系统投射到物体表面的条纹图为标准正弦条纹,投影仪系统的伽马值测量和校正过程参照参考文献[27-28]所提方法。简要过程如下:产生若干组具有不同伽马预校正值的数字光栅相移图像,对投影仪进行预校正;每组分别产生三步相移图像和多步(步数大于等于 12)相移图像,将其投影到标准参考平面上;同时由 CCD 相机获取相应各组的相移图像,计算各组多步相移和三步相移的展开相位误差,拟合出伽马-相位误差的分布曲线。最小相位误差所对应的伽马值,即近似为投影仪的伽马值。将经伽马校正后的条纹投影在物体上,抑制了伽马效应对测量的影响。



图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental setup

### 3.1 基于高度的颜色编码的反向投影

图 8(a)所示为山峰沙盘的三维实物模型,根据 2.1 节所描述的方法获得沙盘的三维高度信息  $h(i,j)$ ,由计算机产生包含模型高度信息的假彩色编码图。利用(10)式所建立的投影仪像素阵列  $(l,m)$  和 CCD 相机像素阵列  $(i,j)$  之间的映射关系,将 CCD 相机像素  $(i,j)$  上的假彩色编码信息映射到投影仪像素  $(l,m)$  上生成投影图像,如 8(b)所示。该图像通过 DLP 投影仪投影到被测沙盘模型上后,高度彩色编码的二维图像较好地贴合在三维沙盘模型上,图 8(c)所示为从侧面观测的投影在山峰沙盘模型上的结果图,真正实现了三维数据的彩色编码显示。

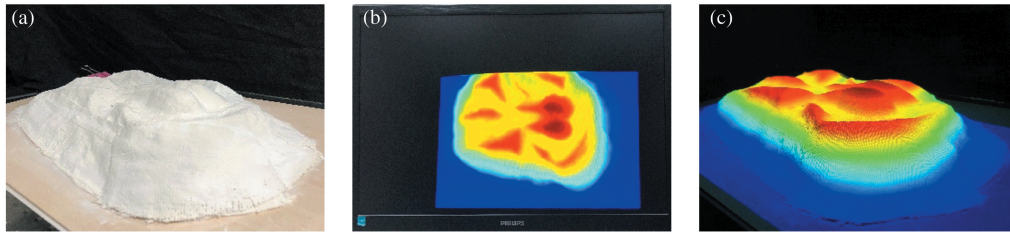


图 8 颜色编码的反向投影。(a)自由曲面;(b)彩色编码反向投影图;(c)曲面上彩色编码的三维显示  
Fig. 8 Inverse projecting of color-encoding. (a) Free-form surface; (b) inverse projection of color-encoding;  
(c) 3D display of color-encoding on surface

### 3.2 基于高度的等高线的反向投影

对同样的沙盘三维模型,根据 2.1 节所描述的方法获得沙盘的三维高度信息  $h(i, j)$ ,由计算机产生含有模型高度信息的等高线编码图。利用投影仪像素阵列  $(l, m)$  与 CCD 相机像素阵列  $(i, j)$  之间的映射关系式(10)式,将计算机产生的等高线编码图

从 CCD 相机方向映射到投影仪方向,在实物沙盘模型上得到等高线图。图 9(a)所示为生成的投影图,图 9(b)所示为从侧面观察到的在实物三维模型上的投影效果,可以看出,整个等高线编码的二维图像较好地贴合在三维沙盘模型上。

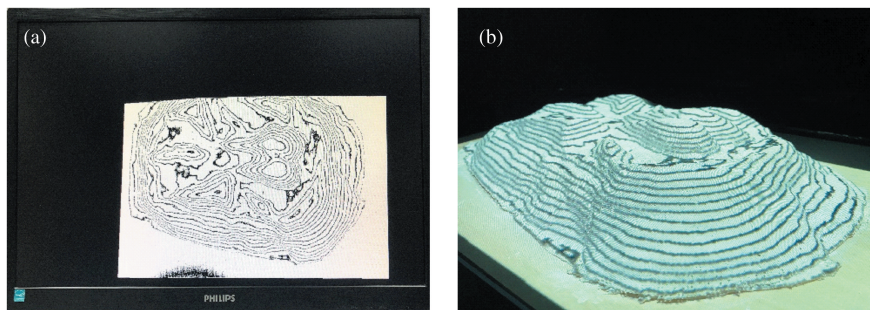


图 9 等高线编码的反向投影。(a)等高线编码反向投影图;(b)曲面上等高线编码的三维显示  
Fig. 9 Inverse projecting of contour-encoding. (a) Inverse projection of contour-encoding;  
(b) 3D display of contour-encoding on surface

### 3.3 基于高度的雪线模拟的反向投影

假设一年中雪线的变化仅与温度有关,且温度仅受高度的影响,可将雪线的变化简化为随高度变化的彩色编码。山峰上的积雪显示为白色,雪融化后的草场显示为绿色。图 10(a)所示为利用沙盘模型的三维高度信息,基于由(10)式建立的从 CCD 相机方向到投影仪方向的反向投影的几何映射关系由计算机产生雪线随高度变化的假彩色编码的投影图(由春到夏变化过程中某几个温度对应的雪线),图 10(b)所示为在山峰沙盘模型上投影显示的不同温度对应的雪线变化图。

图 11 所示为山峰沙盘模型上显示的不同时刻对应的山峰阴影随太阳高度变化的阴影变化,从左至右表示太阳从升起到落下。

实验结果表明,反向条纹投影技术能实现自由曲面高度信息的可视化。该可视化是真实的三维显示,观察者可在任意位置观察与高度相关的期望图像。

### 3.4 在实物沙盘模型上的仿真实体投影添加

在提出的自由曲面可编辑投影显示系统中,建立了(10)式所描述的投影仪与 CCD 像素之间的映射关系,因此可在实物沙盘模型上进行具有人机交互功能的仿真实体添加。例如,手持激光笔向实物沙盘上投射激光点一类的指示标记,CCD 相机获取指示标记的位置,利用(10)式确定其在投影仪方向的对应该像素位置,并在投影图上相应位置处添加需要的仿真实体。图 12 所示为通过手持激光笔指示系统添加的集中军事符号,如迫击炮、医护兵、工兵等。

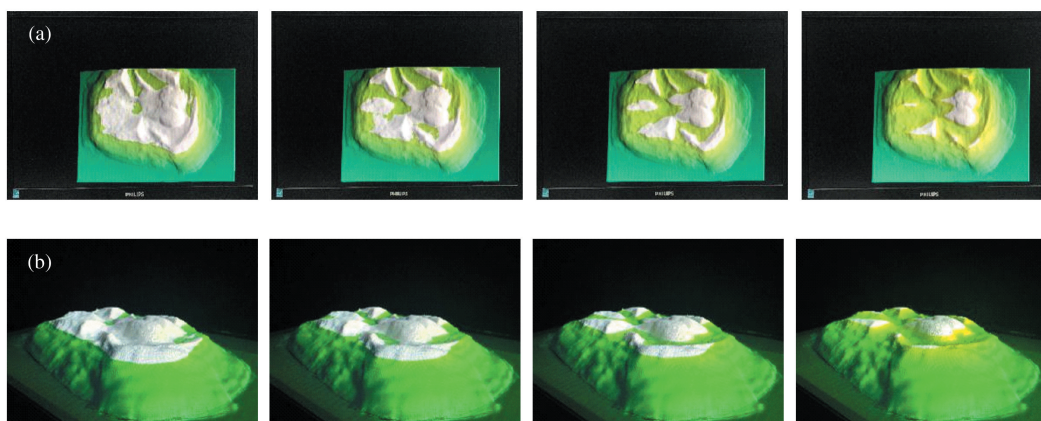


图 10 雪线变化模拟的反向投影。(a)雪线编码反向投影图 (b)与图 10(a)对应的曲面上雪线的三维显示  
Fig. 10 Inverse projecting of snow-line variation simulation. (a)Inverse projection of snow-line encoding;  
(b) 3D display of snow-line encoding corresponding to Fig. 10(a)

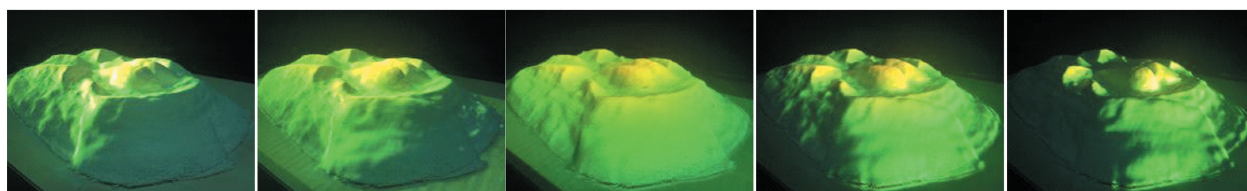


图 11 曲面上阴影编码的三维显示  
Fig. 11 3D display of shadow encoding on surface

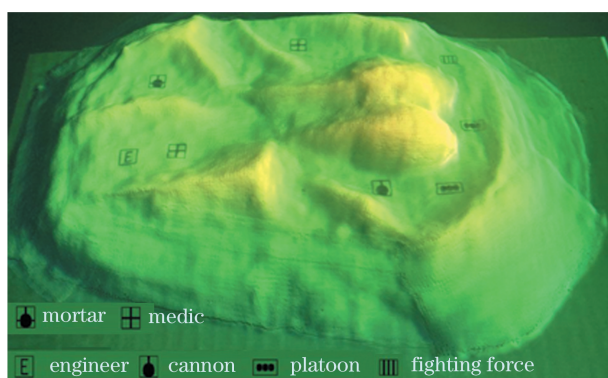


图 12 在实物沙盘上投影添加的军事符号  
Fig. 12 Military symbols projected on physical sand plates

## 4 结 论

提出了一种基于高度信息的自由曲面可编辑投影显示技术。所提方法利用相移技术、三频时间相位展开方法、平面标定技术来获得自由曲面的三维信息,利用反向条纹投影技术建立了投影仪与 CCD 相机间的几何及强度传递关系,可以直接应用于地理教学、实物沙盘上的兵棋推演及雪线冰川变化的模拟研究。该方法还可间接优化和解决其他与高度

信息相关的问题,如路径优选、实物沙盘模型上的仿真实体投影添加等。

## 参 考 文 献

- [1] Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: A tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128-160.
- [3] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [4] Wu Q Y, Zeng Z, Zhang B C, *et al.* A 360° three-dimensional measurement system and its calibration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0404002.  
吴庆阳, 曾增, 张佰春, 等. 一种新的 360° 三维测量系统及标定技术 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0404002.
- [5] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(1): 156-160.
- [6] Mao X F, Su X Y, Chen W J, *et al.* Analysis on

- measurement method of improved Fourier transforms profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1291-1295.  
毛先富, 苏显渝, 陈文静, 等. 改进傅里叶变换轮廓术的测量算法研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1291-1295.
- [7] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [8] He Y H, Cao Y P, Zhong L J, *et al.* Improvement on measurement accuracy of digital phase measuring profilometry by frequency filtering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 220-224.  
何宇航, 曹益平, 钟立俊, 等. 采用频域滤波提高数字相位测量轮廓术的测量精度[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 220-224.
- [9] Schönleber M, Tiziani H J. Fast and flexible shape control with adapted LCD fringe masks[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3098: 35-42.
- [10] Li W S, Bothe T, Kalms M, *et al.* Applications for inverse pattern projection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5144: 494-503.
- [11] Li W S, Bothe T, Osten W, *et al.* Object adapted pattern projection-part I: Generation of inverse patterns[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2004, 41(1): 31-50.
- [12] Leckel E, Sang J, Wagemann E U, *et al.* Impact of source spontaneous emission (SSE) on the measurement of DWDM components[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2000: 31-33.
- [13] Cai Y Y, Su X Y, Xiang L Q. Geometric alignment of multi-projector display system based on the inverse fringe projection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(12): 79-84.  
蔡元元, 苏显渝, 向立群. 基于反向条纹投影的多投影显示系统几何校准[J]. *光电工程*, 2006, 33(12): 79-84.
- [14] Cai Y Y, Su X Y. Inverse fringe projection technique using multi-projectors simultaneously[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1641-1646.  
蔡元元, 苏显渝. 采用多投影器的反向条纹投影技术[J]. *光学学报*, 2006, 26(11): 1641-1646.
- [15] Tang T Y, Su X Y. Inverse fringe projection and its application in the digital globe [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(4): 60-65.  
唐廷勇, 苏显渝. 反向条纹投影技术及其在数字地球仪中的应用[J]. *光电工程*, 2010, 37(4): 60-65.
- [16] Xiao C, Su X Y, Jing H L. A new method for generation of inverse projected fringe[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(11): 2120-2124.  
肖朝, 苏显渝, 荆海龙. 一种新的反向投影条纹生成方法研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(11): 2120-2124.
- [17] Xiao C, Chen F, Zhong M. Method for improving measurement accuracy of inverse fringe[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 111204.  
肖朝, 陈锋, 钟敏. 一种提升反向条纹测量精度的方
- 法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 111204.
- [18] Zhang D F, Guo J L, Wang H B, *et al.* On development of 3-dimensional large-area ESTs [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(8): 91-96.  
张德锋, 郭金良, 王华兵, 等. 三维大区域电子沙盘实现技术研究[J]. *光电与控制*, 2008, 15(8): 91-96.
- [19] Yan Y M, Guo X. Investigation on interactive electronic sand table system with computer vision[J]. *Computer Technology and Development*, 2017, 27(6): 195-198.  
严一鸣, 郭星. 基于计算机视觉的交互式电子沙盘系统研究[J]. *计算机技术与发展*, 2017, 27(6): 195-198.
- [20] Xing S J, Liu S, Sang X Z. Multi-projector three-dimensional display for 3D geographic information system[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 139: 385-396.
- [21] Huang J H, Wu Q Y. A new reconstruction method based on fringe projection of three-dimensional measuring system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 52: 115-122.
- [22] Li Y, Su X Y, Wu Q Y. Accurate phase-height mapping algorithm for PMP[J]. *Journal of Modern Optics*, 2006, 53(14): 1955-1964.
- [23] Su X Y, Song W Z, Cao Y P, *et al.* Phase-height mapping and coordinate calibration simultaneously in phase-measuring profilometry[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(3): 708-712.
- [24] Zhao W J, Su X Y, Chen W J. Discussion on accurate phase-height mapping in fringe projection profilometry[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(10): 104-109.
- [25] Cai Y Y, Su X Y, Li Y, *et al.* Inverse fringe projection technique based on the coordinate transformation using cubic interpolation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(5): 85-90.  
蔡元元, 苏显渝, 李勇, 等. 基于三次插值坐标变换的反向条纹投影技术[J]. *光电工程*, 2006, 33(5): 85-90.
- [26] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital image processing*[M]. Ruan Q Q, Ruan Y Z, Transl. 3rd Edition. Beijing: Electronic Industry Press, 2011: 262-278.  
冈萨雷斯 R C, 伍兹 R E. *数字图像处理* [M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 262-278.
- [27] Vo M, Wang Z Y, Pan B, *et al.* Hyper-accurate flexible calibration technique for fringe-projection-based three-dimensional imaging[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16926-16941.
- [28] Hoang T, Pan B, Nguyen, D, *et al.* Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(12): 1992-1994.