

基于区域二值编码方法的动态三维形貌测量

黄华权 吴庆阳 贺威

(深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 提出一种应用于结构光投影三维面形测量的基于区域的二值编码方法。该方法根据被测物体表面的最大起伏来确定区域编码范围和二值编码图案,然后利用基准区域级次直接获得变形条纹的连续相位分布,在保证可靠性和精度的前提下有效地减少了编码图案数量,提高了测量速度;同时,设计了用于动态三维形貌测量系统的硬件模块。该模块实现了240 frame/s的条纹投影与同步采集,满足了动态三维形貌采集的要求。实验测量采用6幅图案实现了40 frame/s的三维形貌采集,实现了动态三维形貌测量,相关实验结果证明了该技术的可行性。

关键词 测量; 动态三维形貌测量; 二值编码; 动态测量硬件模块

中图分类号 TP391.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1008004

Dynamic Three-Dimensional Shape Measurement Based on Regional Binary Encoding Method

Huang Huaquan Wu Qingyang He Wei

(Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract A regional binary encoding method that applied in the structured light projection three-dimensional (3D) shape measurement is proposed. This method determines the region encoding range and binary encoding patterns according to the maximum depth of the surface of measured object. Then the continuous phase distribution of the deformed fringe can be acquired directly by using the basic regional order. On the premise of guaranteeing the reliability and accuracy, this technique can effectively reduce the number of encoded patterns and improve the measurement speed. Meanwhile, hardware module used in the dynamic three-dimensional shape measurement system is designed, which can achieve high-speed fringe projection and synchronized image capture at 240 frame/s and meet the requirements of dynamic 3D shape acquisition. Experimental measurement uses six patterns to accomplish the 3D shape acquisition at a speed of 40 frame/s, which realizes the dynamic 3D shape measurement. The experimental results are presented to demonstrate the feasibility of this technique.

Key words measurement; dynamic three-dimensional shape measurement; binary code; dynamic measurement hardware module

OCIS codes 120.6650; 120.5050; 150.6910; 110.6880

1 引言

基于数字条纹投影技术的三维(3D)形貌测量方法^[1-6]由于其非接触、测量范围大、高精度、易于实现自动化等优点,已经得到大量深入的研究并获

得了广泛的应用。近年来,基于数字条纹投影的动态三维形貌测量技术^[7-10]引起了人们的广泛关注。其中典型方法是傅里叶变换轮廓术^[11]。该技术只需投影一帧正弦光栅便可实现三维形貌测量,但该

收稿日期: 2013-04-10; **收到修改稿日期**: 2013-05-21

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项(61027014)、国家自然科学基金青年项目(11109052)、深圳大学应用技术开发项目(201151)

作者简介: 黄华权(1988—),男,硕士研究生,主要从事现场可编程门阵列嵌入式系统设计和高速三维形貌测量等方面的研究。E-mail: huanghuaquan@email.szu.edu.cn

导师简介: 吴庆阳(1973—),男,副教授,硕士生导师,主要从事三维传感和机器视觉方面的研究。E-mail: wuqy@szu.edu.cn(通信联系人)

技术过分依赖于图像质量,当测量复杂面形物体时,相位展开容易出错;当测量多个孤立物体时,相位无法展开。另一类方法通过投影多幅正弦光栅和编码图案,将相位展开与条纹编码技术结合^[12],采用相移法来求解变形条纹的截断相位,利用条纹编码解码获得截断相位级次,从而获得被测物体表面的连续相位分布。这类方法具有较好的测量精度和可靠性,但所需投影的图像帧数一般较多,难以直接应用于动态三维形貌测量。因此,如何利用数量较少的编码图案实现可靠性较高的三维形貌测量是一个非常重要的问题。

传统的互补型光栅编码方法^[13]利用两种互补的编码对变形条纹进行编码,然后利用两种解码来计算条纹级次,从而获得变形条纹的连续相位分布。该方法很好地解决了误码问题,具有较高的可靠性,但是其所需的编码图案一般为7幅或更多,难以满足动态测量的要求。因此,本文提出一种基于区域的二值编码方法,有效地减少了编码图案数量。同时,设计了条纹图案高速产生模块,摄像机与投影仪同步信号模块,实现了240 frame/s的图案投影与同步采集,且条纹图案可以根据相位求解算法改变,具有普适性,很好地解决了多幅条纹图案高速投影与同步采集的问题。最后,由硬件模块、投影仪和高速摄像机组成的三维形貌测量系统,采用三幅正弦相移光栅和三幅二值编码图案实现了40 frame/s的三维形貌采集,从而实现了较高精度的动态三维形貌测量。

2 原 理

2.1 相移法原理

相移法的基本思想是通过多幅具有不同相移的正弦条纹图案来求取截断相位值。其最大的优点是点对点求取相位值,变形条纹某一点的相位值与该点光强度的变化值有关,可以避免由于物体表面反射率不均匀引起的误差,精度较高。

常用的三步相移法利用三幅依次具有 $2\pi/3$ 相位差的正弦条纹来求取相位值。这三幅图像的光强度值可表示为

$$I_1(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos[\phi(x,y) - 2\pi/3], \quad (1)$$

$$I_2(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos \phi(x,y), \quad (2)$$

$$I_3(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos[\phi(x,y) + 2\pi/3], \quad (3)$$

式中 $A(x,y)$ 是平均光强度, $B(x,y)$ 是光强调制度, $\phi(x,y)$ 为所求相位。由(1)~(3)式可计算出相

位函数

$$\phi(x,y) = \arctan\left[\frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{(2I_2 - I_1 - I_3)}\right]. \quad (4)$$

(4)式通过反正切函数求取相位函数 $\phi(x,y)$,相位值被截断在 $(-\pi, \pi)$ 内,必须将截断相位展开成连续相位分布。

2.2 基于区域的二值编码原理

一般情况下,投影仪、摄像机和被测物体组成三维形貌测量系统。其框架如图1所示。

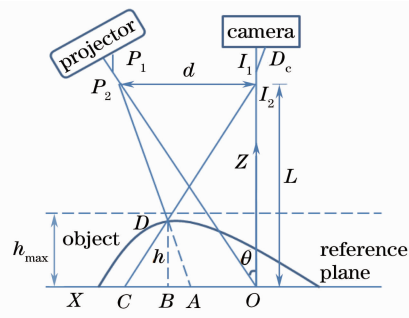


图1 三维形貌测量系统

Fig. 1 3D shape measurement system

这是一个常见的三维形貌测量系统。其中 P_1 和 P_2 分别是投影系统的入瞳和出瞳, P_1P_2 为投影系统光轴; I_1 和 I_2 分别是成像系统的入瞳和出瞳, I_1I_2 为成像系统光轴。成像光轴 I_1I_2 垂直参考平面,并与投影光轴相交于参考平面上的 O 点,它们之间的夹角为 θ 角。 D_c 为摄像机的一个成像单元。

当正弦条纹被投射到参考平面上时,参考平面上的每一个点相对于参考点 O 的相位值是唯一的和单调变化的。在测量物体三维形貌时,正弦条纹发生扭曲变形。物面上的 D 点和参考平面上的 C 点都对应着摄像机成像面上的同一个成像点 D_c ,而物点 D 可以看成是原本位于参考平面上 A 点的投射条纹形成的,所以这两个点的相位值相等,有 $\phi_D = \phi_A$,因此成像点 D_c 的相位变化在参考平面上对应于 \overrightarrow{AC} 。由相似三角形 ΔP_2DI_2 和 ΔADC 可得 \overrightarrow{AC} 与物面高度 h 的关系,即

$$h = \frac{\overrightarrow{AC}(L/d)}{1 + \overrightarrow{AC}/d}, \quad (5)$$

式中 d 和 L 分别对应于测量系统中投影仪与摄像机的距离,摄像机与参考平面的距离。

另外,几何距离 \overrightarrow{AC} 与相位分布的关系为

$$\overrightarrow{AC} = \overrightarrow{OC} - \overrightarrow{OA} = \frac{n}{2\pi}(\phi_c - \phi_D). \quad (6)$$

在实际应用的三维形貌测量系统中,有 $\overrightarrow{AC} \ll d$,简化(5)、(6)式得相位差与高度之间的关系

$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{h \cdot \tan \theta}{n}, \quad (7)$$

式中 $\Delta\phi = \phi_c - \phi_b$, n 为投影到参考平面上的一个条纹宽度。

由相移法原理可知,变形条纹图像中每一个点相对于参考点 O 的相位值是唯一的和单调变化的。在实际测量中,被测物体表面的最大起伏 h 总会小于一个设定的最大高度 h_{\max} ,如图1所示。因此,在确定实际测量系统后, θ 和 n 也是已知量,那么由(7)式可以确定 $\Delta\phi$ 的一个最大值,即需要进行编码的一个最大区域。基于这个思想,只需对覆盖这个区域 $\Delta\phi$ 的相邻 N 根条纹进行编码即可,而无需对每个变形条纹都进行编码。其中 N 可表示为

$$N = \text{ceil}[\Delta\phi/(2\pi)], \quad (8)$$

式中, $\text{ceil}(\cdot)$ 表示对实数进行向上取整。

基于以上分析,提出一种基于区域的二值编码方法。该方法首先确定测量范围和参考平面;然后根据设定的最大高度,利用相位差与高度之间的关系确定一个最大的区域编码范围;接着利用二值编码对相邻 N 根条纹进行编码整合。测量时首先测定参考平面,对拍摄的二值编码图像进行解码,获得参考平面的基准整合相位分布,同时对基准整合条纹进行区域编码,得到基准区域级次。在测量物体时,亦可求得变形条纹的整合相位分布。最后,通过比较每个相同成像单元的变形条纹整合相位值与基准整合相位值的大小,利用基准区域级次直接

获得变形条纹的连续相位分布。

下面,模拟该区域二值编码方法的一般求解过程。首先,假设相位差 $\Delta\phi$ 小于 8π ,联合(8)式取 N 为4,因此只需用两幅二值编码图像对相邻4根正弦条纹进行编码,第三幅编码图案是为了解决误码问题,获得正确的整合相位分布,其编码方式如图2(b)所示。

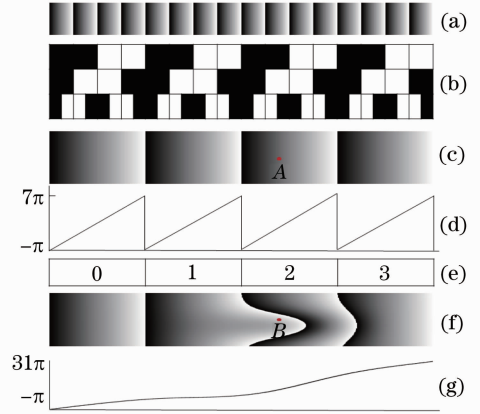


图2 连续相位求解过程

Fig. 2 Solving process of continuous phase

图2(a)为参考平面的截断相位分布,相位值位于 $(-\pi, \pi)$ 之间;图2(b)表明了二值编码条纹的编码方式,黑白格子分别代表码值0和1。解码时,首先对前两幅编码图案进行解码,得到条纹级次 k_1 ;再对三幅编码图案进行解码,得到条纹级次 k_2 ,且

$$k_2 = \text{ceil}(k_2/2). \quad (9)$$

因此,整合相位分布 $\phi'(u, v)$ 可表示为

$$\phi'(u, v) = \begin{cases} \phi(u, v) + k_2 \times 2\pi, & \phi(u, v) \leq -\pi/2 \\ \phi(u, v) + k_1 \times 2\pi, & -\pi/2 < \phi(u, v) < \pi/2, \\ \phi(u, v) + (k_2 - 1) \times 2\pi, & \phi(u, v) \geq \pi/2 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\phi(u, v)$ 为截断相位分布, $\phi'(u, v)$ 为整合相位分布。

图2(c)、(d)给出了参考平面的整合相位分布,对该整合相位分布进行区域编码,可求得如图2(e)所示的基准区域级次。通过模拟扭曲变形的正弦条纹,可求得如图2(f)所示的变形整合相位分布。图2(c)中的A点和图2(f)中的B点对应着摄像机

的同一成像单元,通过比较这两个整合相位值的大小来正确使用基准区域级次。若B点的相位值大于A点的相位值,则B点是由A点所对应的上一个基准区域级次的整合条纹变形而来,否则B点和A点处于相同的基准区域级次。基于这个思想,图2(f)中所有像素点的连续相位分布表示为

$$\Phi(u, v) = \begin{cases} \phi'_{\text{obj}}(u, v) + K \times 8\pi, & \phi'_c(u, v) \geq \phi'_i(u, v) \\ \phi'_{\text{obj}}(u, v) + (K - 1) \times 8\pi, & \phi'_c(u, v) < \phi'_i(u, v) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\phi'_{\text{obj}}(u, v)$ 为变形条纹的整合相位分布, K 为如

图2(e)所示的基准区域级次, $\phi'_c(u, v)$ 、 $\phi'_i(u, v)$ 分别

为图 2(c) 中和图 2(f) 中相同成像单元的整合相位值, $\Phi(u, v)$ 为变形条纹的连续相位分布。最终, 变形条纹的连续相位分布如图 2(g) 所示。该软件模拟过程表明基于区域的二值编码方法是正确可行的。后面的相关实验结果将充分证明其可行性。

3 动态三维测量系统的硬件模块设计

提出的二值编码测量方法需投影三幅正弦光栅和若干二值编码图案, 若应用于动态三维形貌测量, 则要求高速投影与同步采集多幅图案, 因此, 必须设计相应的条纹图案高速产生模块和摄像机与投影仪同步信号模块。

3.1 条纹图案高速产生模块

单片式数字光处理(DLP)投影仪一般兼容视频图形阵列(VGA)视频接口, 所以这里使用 DE2 平台, 利用其数模转换芯片 ADV7123 设计了基于 VGA 视频接口的条纹图案高速产生模块, 实现条纹图案的高速产生。

DE2 平台采用 ADI 公司的高速视频信号数模转换(D/A)芯片 ADV7123, 提供 10 bit RGB 视频

信号的 D/A 转换, 转换后的信号连接到 15 脚的 D-SUB 接口作为 VGA 视频输出信号。其中, 芯片 ADV7123 可由 DE2 平台上的现场可编程门阵列(FPGA)芯片 Altera Cyclone II EP2C35F672C6 编程控制。

VGA 同步时序与视频数据(RGB 数据)需满足被称为工业标准的 VGA 时序规格。图 3 为 VGA 视频信号时序规格参数定义图。其中, 水平同步信号(HSYNC)表征一行 RGB 数据的结束和下一行 RGB 数据的开始, 而垂直同步信号(VSYNC)表征一帧 RGB 图像数据的结束和下一帧 RGB 图像数据的开始。表 1 列出了分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$, 刷新频率为 120 Hz 的 VGA 视频信号时序规格参数。根据这些时序规格参数, 使用硬件描述语言 Verilog HDL 编程设计出相应的 VGA 时序信号, 并在满足时序要求时读出存储在片上 ROM 模块中的灰阶图案数据, 实现了条纹图案的高速产生。该模块较好地解决了高速投影多幅条纹图案的问题, 且条纹图案可以根据相位求解算法改变, 具有普适性。

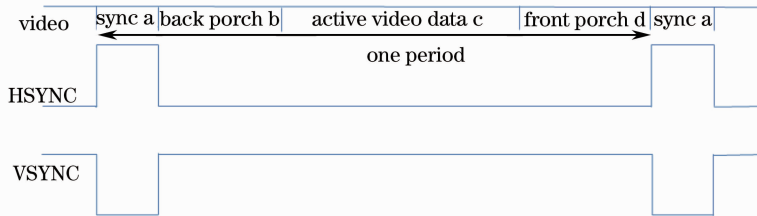


图 3 VGA 视频信号时序参数定义图

Fig. 3 VGA video timing parameter definitions

表 1 VGA 视频信号时序规格参数

Table 1 VGA video timing specification parameter definitions

Parameter	HSYNC	VSYNC
Frequency	97.551 kHz	119.989 Hz
Active	Rising edge	Falling edge
One period	10.251 μs	8.334 ms
Sync a	0.277 μs	0.041 ms
Back porch b	0.693 μs	0.390 ms
Active video data c	8.866 μs	7.873 ms
Front porch	0.416 μs	0.031 ms

3.2 投影仪与摄像机同步信号

由于单片式 DLP 投影仪采用数字微镜光学处理引擎成像, 即光源发出的光通过高速转动的色轮产生红绿蓝三基色, 经过数字微镜阵列的反射形成一幅彩色图像。而基于区域的二值编码方法的动态

测量只需高速投影灰阶条纹图案, 因此这里先分析 DLP 投影仪的红、绿、蓝三基色的投影时序波形, 卸掉其色轮组件, 利用投影时序的三基色通道实现 2 倍或 3 倍于普通投影仪的灰阶条纹投影速度。更重要的是, 必须根据该投影时序波形来设计正确的摄像机与投影仪同步信号, 从而实现条纹图案的高速投影与同步采集, 以满足动态三维形貌的测量要求。

这里使用型号为宏基 X1220 的单片式 DLP 投影仪, 其色轮组件为蓝红黄绿青白六段色轮。首先, 使用光电探测三极管和示波器(TDS3052B)来测量分析投影仪的三基色时序信号。图 4 为红(R)、绿(G)、蓝(B)三通道被赋予不同灰阶值时的波形时序图。其中, 波形 1 为 VGA 垂直同步时序信号 VSYNC, 频率为 120 Hz; 波形 R1 是 $R=1023, B=G=0$ 时的时序波形图; 波形 R2 是 $G=1023, R=$

$B=0$ 时的时序波形图；波形 R3 是 $B=1023, R=G=0$ 时的时序波形图；波形 R4 是 $B=G=1023, R=0$ 时的时序波形图；波形 2 为 $R=G=B=1023$ 时的时序波形图。综合分析波形 R1、R2、R3 和波形 2 的时序波形图，其测量结果表明若同时利用红、绿、蓝三通道实现 360 frame/s 灰阶图像的投影，那么在一个投影周期内的三幅灰阶条纹图像会因投影仪的彩色互调机制而无法相互分开，如波形 2 的时序波形图所示，因此无法同步摄像机来实现正确的三维形貌采集。然而，如波形 R4 所示的波形时序图表明可以利用蓝、绿两个基色通道实现 240 frame/s 灰阶条纹图像的高速投影，而且可根据该时序波形设计出正确的摄像机与投影仪同步信号，将投射到被测物体表面的变形条纹同步采集回来用于三维重建，实现动态三维形貌的测量。

最后，图 5 显示了动态三维测量系统的时序波形

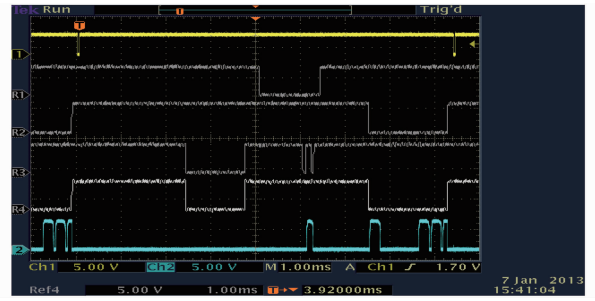


图 4 投影仪的投影时序波形图

图。其中，波形 1 为 VGA 时序信号 VSYNC，频率为 120 Hz；波形 R1 为使用 DE2 平台产生的反馈信号，用来维持投影仪引擎在卸掉色轮组件后正常工作；波形 R4 是蓝、绿两个基色通道的时序波形信号；据此，设计了如波形 2 所示的摄像机同步采集触发信号，频率为 240 Hz，上升沿有效。在动态三维形貌测量实验中，摄像机的曝光时间统一设置为 2.3 ms。

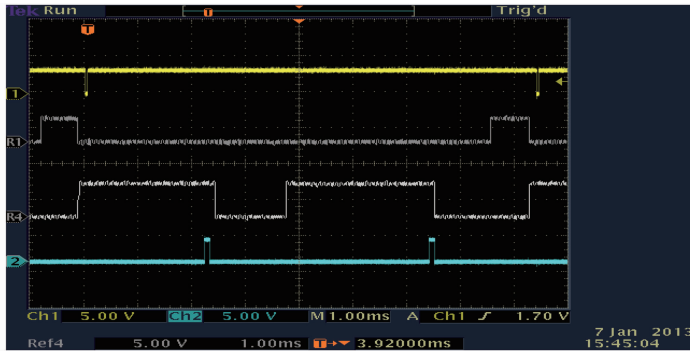


图 5 系统时序波形图

Fig. 5 Waveform chart of system timing

4 实验及结果

实验中的动态三维形貌测量系统如图 6 所示。其中，DLP 投影仪型号为宏基 X1220，分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ ；高速 CCD 摄像机为 Basler 公司的 piA640-210gc，分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。在实验测量中，选择灰太狼玩具、浮雕模型和人体手掌作为测量对象，其表面的最大起伏分别为 33、12、55 mm。设定最大高度 h_{\max} 为 100 mm，实验测量系统的投影光轴与摄像机光轴夹角约为 30° ，投影到参考平面的一个条纹宽度约为 15.56 mm。因此，联合(7)、(8)式可知只需对相邻的 4 根条纹进行编码即可，即只需投影两幅编码图像和一幅互补编码图像。由于实验中所投影的相移光栅周期为 32 pixel，则栅线周期为 32，因此传统的互补型编码方法需用至少 6 幅编码图案来对 32 根

条纹进行编码，而采用这里提出的基于区域的二值编码方法，仅仅只需投影 3 幅编码图像，灵活有效地减少了编码图案数量，提高了测量速度。

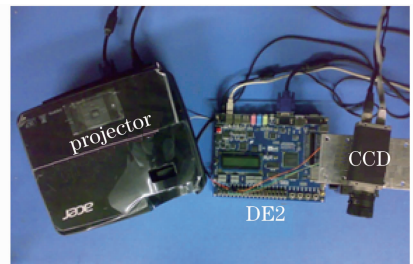


图 6 动态三维形貌测量系统

Fig. 6 Dynamic 3D shape measurement system

实验中采用 3 幅三步相移光栅和 3 幅编码图像对被测物体进行实验测量。首先测定参考平面，获得参考平面的基准整合相位分布和基准区域级次，如图 7 所示。

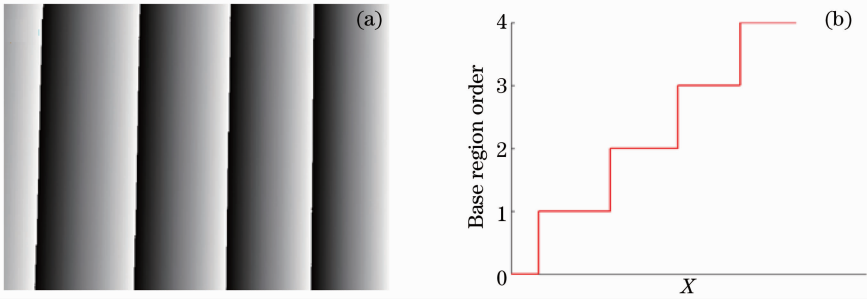


图 7 (a) 基准整合相位分布; (b) 基准区域级次

Fig. 7 (a) Integrated-phase of reference plane; (b) base region order

实验测量选择两个孤立的静态物体为测量对象,如图 8 所示。其中左边为灰太狼玩具,右边为浮雕模型。测量结果如图 9 所示,其中图 9(a)为孤立静态物体的截断相位分布图;图 9(b)为孤立物体表面的整合相位分布图;图 9(c)为通过比较图 7(a)和图 9(b)中每个相同像素点的整合相位值的大小,利用图 7(b)所示的基准区域级次求得的连续相位分布图;图 9(d)为 3D 重建结果。该测量结果表明,提出的方法适用于孤立物体的三维形貌测量。



图 8 两个孤立的静态物体

Fig. 8 Two isolated static objects

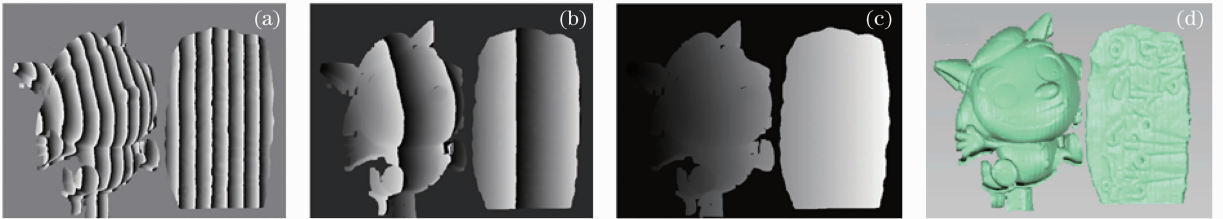


图 9 孤立物体的测量结果。(a) 截断相位图; (b) 整合相位图; (c) 连续相位图; (d) 3D 重建结果

Fig. 9 Measuring results of the two isolated static objects. (a) Wrapped phase map; (b) integrated-phase map; (c) unwrapped phase map; (d) 3D reconstructed result

接着,实验对人体手指由闭合到张开的缓慢变化过程进行动态三维形貌采集。该动态三维形貌测

量系统的条纹投影速度为 240 frame/s,则三维形貌的记录速度为 40 frame/s。图 10(a)~(c)给出了手

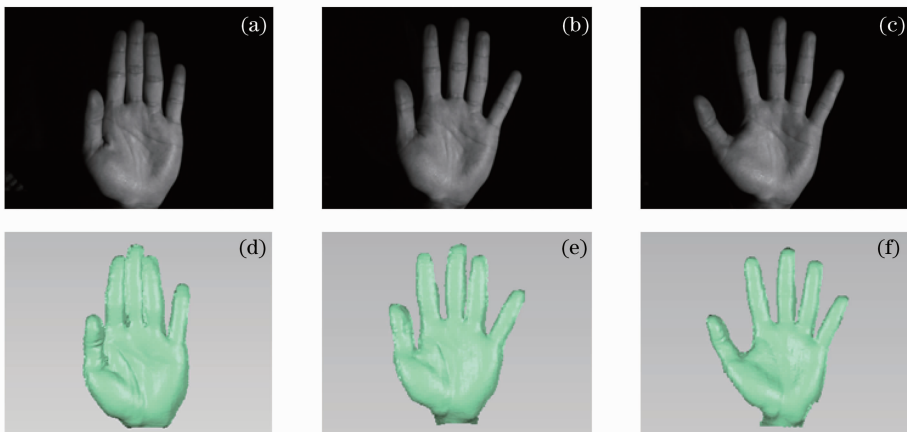


图 10 (a)、(b)、(c)分别为三个状态手掌的图像; (d)、(e)、(f)分别为其 3D 重建结果

Fig. 10 (a), (b), (c) Images of palm at three states and (d), (e), (f) their 3D reconstructed results

指缓慢张开过程中的三个状态,图 10(d)~(f)为其三维重建结果。由测量结果可见,该动态三维形貌测量系统很好地记录了手掌缓慢变化的动态过程,实现了动态物体的三维形貌测量。

5 结 论

提出一种基于区域的二值编码方法的动态三维形貌测量技术,在保证可靠性和精度的前提下有效地减少了编码图案数量,提高测量速度;设计的动态测量系统硬件模块,包括条纹图案高速产生模块和摄像机与投影仪同步信号模块,很好地解决了高速投影与同步采集多幅条纹图案的问题。实验结果表明,该技术能够准确采集动态变化过程中物体的三维形貌。

参 考 文 献

- 1 Liu Changjie, Yang Xueyou, Ye Shenghua. A new visual technology of 3-D measurement using LCD projection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2005, 19(2): 41-44.
刘常杰, 杨学友, 叶声华. 采用 LCD 投影实现三维曲面测量技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19(2): 41-44.
- 2 G Sansoni, M Trebeschi, F Docchio. State-of-the-art and applications of 3-D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation[J]. Sensors, 2009, 9(1): 568-601.
- 3 Bian Xintian, Su Xianyu, Chen Wenjing. Analysis on 3-D object measurement based on fringe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 416-420.
边心田, 苏显渝, 陈文静. 基于条纹投影的三维坐标测量方法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 416-420.
- 4 Zhu Ronggang, Zhu Rihong, Li Jianxin. Application of virtual grating phase-shifting fringe method for three-dimensional shape measurement[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s108003.

- 朱荣刚, 朱日宏, 李建欣. 一种虚条纹相移算法在结构光三维测量中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s108003.
- 5 Dai Meiling, Yang Fujun, Geng Min. Single color fringe projection for measuring three-dimensional shapes with discontinuities[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412005.
戴美玲, 杨福俊, 耿敏. 单幅彩色条纹投影的不连续物体表面三维形貌测量[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412005.
- 6 Wang Luyang, Da Feipeng. Three-dimensional shape measurement technique based on complementary color-encoded fringe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612004.
王露阳, 达飞鹏. 基于互补色编码条纹投影的三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0612004.
- 7 Peisen S Huang, Chengping Zhang, Fu-Pen Chiang. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection[J]. Opt Eng, 2003, 42(1): 163-168.
- 8 Song Zhang, Peisen S Huang. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement[J]. Opt Eng, 2006, 45(12): 123601.
- 9 Chao Zuo, Qian Chen, Guohua Gu. High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes[J]. Opt Express, 2012, 20(17): 19493-19510.
- 10 Zhang Qican, Su Xianyu. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010001.
张启灿, 苏显渝. 动态三维面形测量的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010001.
- 11 Qican Zhang, Xianyu Su. High-speed optical measurement for the drumhead vibration[J]. Opt Express, 2005, 13(8): 3110-3116.
- 12 Yu Xiaoyang, Wu Haibin, Yin Liping. 3D measurement technology based on structured light by combining Gray code with phase-shift[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(12): 2152-2157.
于晓洋, 吴海滨, 尹丽萍. 格雷码与相移结合的结构光三维测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(12): 2152-2157.
- 13 Sun Xuezhen, Su Xianyu, Zou Xiaoping. Phase unwrapping based on complementary structured light binary code[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(10): 1947-1951.
孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开[J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1947-1951.

栏目编辑:宋梅梅