

# 基于低调制度特征的在线三维测量方法

彭 旷 曹益平 武迎春 郑素珍

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 提出了一种基于低调制度特征进行像素匹配的在线三维测量方法。仅将一固定的正弦条纹投影到在线匀速运动的待测物体上,物体运动产生相应的等效相移变形条纹图。当 CCD 等步距采集多帧变形条纹图时,由于物体的运动致使变形条纹图中物体像素不对应,需要对所采集的条纹图进行像素匹配。在对变形条纹图提取物体调制度信息的基础上,使用大津法进行自动二值化处理,截取物体低调制度区域作为特征模板,实现像素匹配,从而获得物体上点对点的多帧等步相移条纹图,利用等步相移算法解相并恢复出待测物体的三维形态信息。仿真和实验证明了所提方法的有效性和实用性。

**关键词** 测量; 调制度; 像素匹配; 大津法; 二值化

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0708006

## On-Line Three-Dimensional Measurement Method Based on Low Modulation Feature

Peng Kuang Cao Yiping Wu Yingchun Zheng Suzhen

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** An on-line three-dimensional (3D) measurement method based on low modulation feature for pixel matching is proposed. Only a fixed sinusoidal fringe is projected on the measured object moving with a constant speed. The object's movement can produce the corresponding phase shifting deformed patterns. When several deformed patterns are recorded at equivalent steps by CCD, pixel matching must be done for these patterns in which the points are not one-to-one corresponding because of the measured object's movement. On the basis of cutting the modulation information of the object from deformed patterns, Otsu algorithm is used to do the binarization automatically. The area having low modulation is segmented to be regarded as a featured template to realize the pixel matching and several phase shifting deformed patterns in which the points are one-to-one corresponding are acquired. The equal-step phase shifting algorithm is used to reconstruct the surface information of the measured object. Simulations and experiments show feasibility and validity of this method.

**Key words** measurement; modulation; pixel matching; Otsu algorithm; binarization

**OCIS codes** 120.2830; 120.5050; 120.6650; 100.5088

## 1 引 言

物体的三维(3D)形态特征是物体最重要的特征之一,随着工业和科技的发展,现在工厂对在线三维测量有着很大的需求,并且对其精度与速度的要求都在不断提高。光学测量由于其高效和高精度的特点受到了极大的重视并得到了深入的研究,其中包括傅里叶变换轮廓术(FTP)<sup>[1-3]</sup>和相位测量轮廓术(PMP)<sup>[4-5]</sup>,这两种方法都是将光栅图投影到运

动中的被测物体上,物体的高度会对光栅图的相位信息进行调制,摄像机会记录下变形条纹信息并传递给计算机进行处理,实现物体的在线三维测量。

傅里叶变换轮廓术只需要对一幅变形条纹图进行解调,即可恢复出物体的三维形态信息,具有速度快和易采集的特点,但是由于在对变形条纹图进行处理的过程中要进行空间滤波,物体的非基频信息将会被滤除,同时由于傅里叶变换轮廓术是对物体

**收稿日期**: 2013-01-23; **收到修改稿日期**: 2013-03-25

**基金项目**: 国家 863 计划(2007AA01Z333)、国家科技重大专项(2009ZX02204-008)、四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)

**作者简介**: 彭 旷(1991—),男,博士研究生,主要从事三维传感和光电信息处理等方面的研究。E-mail: michael\_pk@163.com

**导师简介**: 曹益平(1962—),男,博士,教授,主要从事三维传感、光电信息处理及光机电一体化等方面的研究

E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net(通信联系人)

的频谱信息进行处理,必须保证所采集到的各级频谱之间不出现混叠现象,因此范围会受到限制,精度也相对较低。相位测量轮廓术是目前在低噪声情况下采用面结构光三维测量方法中精度最高的方法,通过采集变形条纹图并进行像素匹配和正确解相,即可恢复出物体的三维轮廓信息。在此基础上,李坤等<sup>[6]</sup>提出了利用物体本身的调制度信息作为像素匹配标记的方法。

本文提出了一种基于物体低调制度特征的在线三维测量方法。物体的调制度能反映出物体相位展开可靠性的高低,调制度越高,相位展开的可靠性就越高,因此一般用来作为相位展开的依据。相位展开的误差会扩散,在进行相位展开的过程中会按照调制度的高低依次进行展开,并且展开至最后调制度低的区域时可以采用二次拟合的方法来提高展开的可靠性。与此同时,由于低调制度区域具有非常明显的灰度特征,因此可以将其用做模板来进行像素匹配。

## 2 在线三维测量原理

在线三维测量原理如图1所示,其中CRT为显

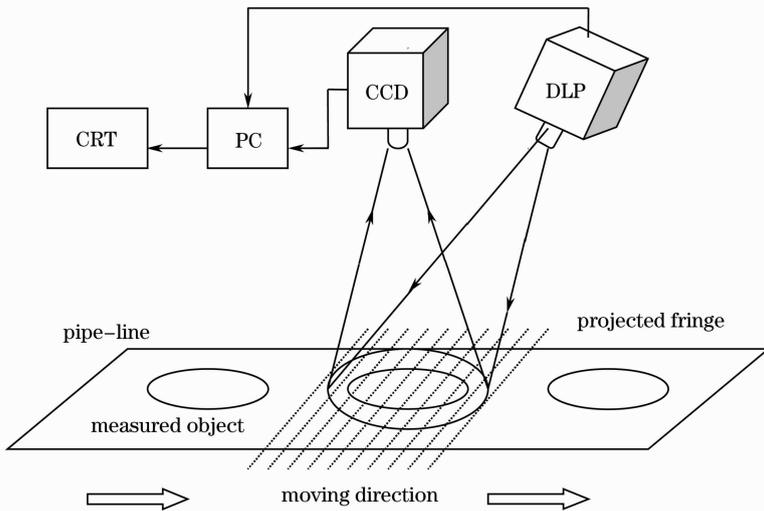


图1 在线三维测量原理图

Fig. 1 On-line 3D measurement schematic diagram

对(1)式等号两边做傅里叶变换,得到的结果可表示为

$$G_n(f_x, f_y) = G_{n0}(f_x, f_y) + G_{n1}(f_x, f_y) + G_{-n1}(f_x, f_y), \quad (2)$$

示器,PC为计算机,CCD为线阵摄像机,DLP为光栅投影仪,待测物体位于流水线传送带上,传送带运动速度是恒定的,且物体运动方向与CCD和DLP放置方向平行。CCD和DLP都被计算机所控制,计算机中装有与CCD和DLP配套的应用程序及处理数据的软件。

计算机编译产生一个固定不变的正弦光栅条纹,通过DLP投影到运动中的物体上,光栅条纹方向与物体运动方向垂直,每隔相同的时间,由计算机控制CCD采集 $N$ 帧变形条纹图。由于流水线是匀速运动,则采集 $N$ 帧条纹图时物体的位置是等距的,相邻二幅图像所产生的等效相移为 $\Phi_0$ ,文中取 $N=5$ ,则CCD采集到的变形条纹图 $I_n(x, y), n=1, 2, 3, 4, 5$ 为

$$I_n(x, y) = R(x, y) \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\Phi(x, y) + n\Phi_0] \}, \quad (1)$$

式中 $R(x, y)$ 为物体表面反射率, $A(x, y)$ 为背景强度, $B(x, y)$ 表征条纹的对比度, $\Phi(x, y)$ 为相位调制因子,其中包含了物体的高度信息。

式中 $G_{n0}(f_x, f_y), G_{n1}(f_x, f_y)$ 和 $G_{-n1}(f_x, f_y)$ 分别为第 $n$ 帧变形条纹图的0级和 $\pm 1$ 级频谱。

采用空间滤波方法,对(2)式进行滤波,滤出 $+1$ 频谱 $G_{n1}(f_x, f_y)$ 并对其做逆傅里叶变换可得

$$P_n(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} G_{n1}(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y = \frac{1}{2} R(x, y) B(x, y) \exp[i2\pi f_x x + \phi + \phi_0]. \quad (3)$$

对(3)式乘以2,消去1/2这个因子,对 $P_n(x,y)$ 取模可以得到第 $n$ 帧变形条纹图所对应的调制度分布图

$$M_n(x,y) = \text{abs}[P_n(x,y)] = R(x,y)B(x,y), \quad (4)$$

式中 $\text{abs}(\cdot)$ 为求模运算。如(4)式所示,在变形条纹图的调制度信息中, $R(x,y)$ 表征物体表面反射率, $B(x,y)$ 表征投影光栅对比度,当投影光栅条纹具有很好的均匀性时, $B(x,y)$ 可视为常数,这样调制度信息可很好地将物体的灰度信息表示出来,同时,物体的调制度能反映出物体相位展开可靠性的 高低,调制度越高,相位展开的可靠性就越高,因此一般用来作为相位展开的依据。当物体在传送带上匀速运动时,物体的调制度信息也会随着物体的运动而整体相应移动,因此可以以此为特征来实现像素匹配。五帧变形条纹图 $I_n(x,y)$ 在像素匹配后所对应截取的变形条纹图为 $I'_n(x,y)$ 。

根据 Stoilov 算法,可以根据 $I'_n(x,y)$ 来计算出相位函数:

$$\phi = \arctan \left\{ \frac{2[I'_2(x,y) - I'_4(x,y)]}{2I'_3(x,y) - I'_1(x,y) - I'_5(x,y)} \sin \phi_0 \right\}, \quad (5)$$

式中

$$\sin \phi_0 = \sqrt{1 - \left\{ \frac{I'_1(x,y) - I'_5(x,y)}{2[I'_2(x,y) - I'_4(x,y)]} \right\}^2}. \quad (6)$$

由(5)式可知,对相位 $\phi$ 的计算使用了反正切函数,则相位值会被限制在 $-\pi$ 到 $\pi$ 之间,为离散相位。由于物体的表面轮廓是连续的,因此受到物面高度所调制的相位信息应该也是连续的,有必要对相位 $\phi$ 进行相位展开。本文选用菱形展开算法。以一个点为起始点,将起始点与其在横纵坐标上的相邻点进行相位比较,如果差值小于 $-\pi$ ,则后一点的相位值需要加上 $2\pi$ ,如果差值大于 $\pi$ ,则后面一点的相位值需要减去 $2\pi$ ,待原始点周围各点的相位被恢复后,再以这些原始点为原点,恢复出其周围点的相位信息,直到正确地将物体的相位信息恢复出来。

根据光线追踪原理的隐式校准方法,通过测量系统空间三角形间的相似性可以得出相位和高度的对应关系为<sup>[7-8]</sup>

$$\frac{1}{h(x,y)} = a(x,y) + b(x,y) \frac{1}{\phi(x,y)} + c(x,y) \frac{1}{\phi^2(x,y)}, \quad (7)$$

式中 $\phi'(x,y)$ 为相位展开后所得的相位, $a(x,y)$ , $b(x,y)$ 和 $c(x,y)$ 是在校准过程中确定的,对不同的像素点位置,其值是不同的。

### 3 基于低调制度特征的像素匹配方法

提出了一种基于低调制度特征进行像素匹配的方法。在调制度图像中,调制度相对越大,此区域相位展开则相对越可靠,因此调制度通常会作为相位展开的依据。但由于低调制度区域具有明显的灰度特征并且会随着待测物体一起运动,因此可以将其作为特征模板来实现像素匹配,恢复出物体的三维面型信息。

大津法<sup>[9]</sup>是一种运用于图像处理中确定动态阈值的方法,本文通过大津法来对所采集到的五帧变形条纹调制度图 $M_n(x,y)$ 进行处理,可以找出一个阈值,设定为 $K$ 。由于在变形条纹调制度图 $M_n(x,y)$ 中,图像阴影区域的调制度是相对较低的,因此低调制度区域指的就是阴影区域。由于阴影区域与物体表面调制度值有较大的反差,因此通过大津法处理的图像的阈值将处于物体表面和阴影部分的调制度值之间。以此阈值对变形条纹图进行二值化处理,则可以从 $M_n(x,y)$ 中提取物体阴影区域的调制度信息 $M'_n(x,y)$ 。由于物体是在线运动的,因此由DLP投影到被测物体的光线角度会有一定程度的变化,进而会对物体的阴影区域造成一定影响,阴影区域发生一定程度的改变。但大量模拟及计算表明,CCD采集五帧变形条纹图的速度是非常快的,因此其角度变化较小,且阴影区域的微小变化不会对在线三维测量的精度造成影响。

图像经过二值化处理以后,变形条纹调制度图 $M'_n(x,y)$ 中各像素点的灰度信息将会由有多个灰阶变成只有0和1二个数值,高于 $K$ 灰阶的像素点将被置为0,小于 $K$ 灰阶的像素点会被置为1:

$$M'_n(x,y) = \begin{cases} 1, & M_n(x,y) < K \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (8)$$

在图 $M'_1(x,y)$ 中将非0部分信息截取出来,即可得到物体阴影区域二值化后的图像 $T_1(x,y)$ ,再以此作为特征模板,分别与 $M'_n(x,y)$ ( $n=2,3,4,5$ )进行相关度运算,相关度( $RL, v_{RL}$ )值如(9)式所示,当 $RL$ 值最大时, $T_1(x,y)$ 与 $M'_n(x,y)$ ( $n=2,3,4,5$ )中特定区域的像素坐标是一一对应的,即可得出物体在相邻两帧图像拍摄时物体位置所间隔的距离 $X$ 。将 $I_n(x,y)$ ( $n=1,2,3,4,5$ )分别向物体运动的反方向移动 $nX$ pixel( $n=0,1,2,3,4$ )得到 $I_{np}(x,y)$ ( $n=1,2,3,4,5$ ),截取同一区域带有物体高度信息的部分,即可得到像素一一对应的变形条纹图 $I'_n(x,y)$ ( $n=1,2,3,4,5$ ),完成像素匹配:

$$v_{RL} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N T_1(x,y)M'_n(x,y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N T_1^2(x,y)M_n'^2(x,y)}}, n = 2,3,4,5, \quad (9)$$

式中  $x, y$  为横纵坐标,  $M, N$  为所取模板的大小。

在物体调制度图像被二值化前, 图像中像素各点具有不同的像素值, 而在进行二值化以后, 像素值为 0 或 1。由于在相关运算中有大量像素点间的乘积运算, 相比于二个非 0 像素点的乘积, 0 与任何数的乘积都为 0, 因此对图像进行二值化, 可以在不影响精度的前提下, 对相关运算的速度有一定程度的提高。

为了验证所提原理的有效性, 进行了大量的仿

真。图 2(a)、(b) 所示为在仿真过程中第一帧和第二帧变形条纹图  $I_n(x, y) (n = 1, 2)$ 。通过大津法找出阈值, 再经过二值化处理后所得到的对应图像  $M'_n(x, y) (n = 1, 2)$  如图 2(c)、(d) 所示, 其与调制度图像中  $M_n(x, y) (n = 1, 2)$  调制度较低的区域是对应的。

将各帧变形条纹图按物体运动的反方向移动  $nX$  pixel ( $n = 0, 1, 2, 3, 4$ ) 距离, 得到  $I_{np}(x, y) (n = 1, 2, 3, 4, 5)$ , 前二帧像素匹配后的图像如图 2(e)、(f) 所示, 可以看出图 2(f) 在原先的变形条纹图 [图 2(b)] 的基础上向被测物体运动的反方向移动了一定的位移, 这样会丢失一定的范围的侧面信息, 在图 2(f) 中用黑色表示。

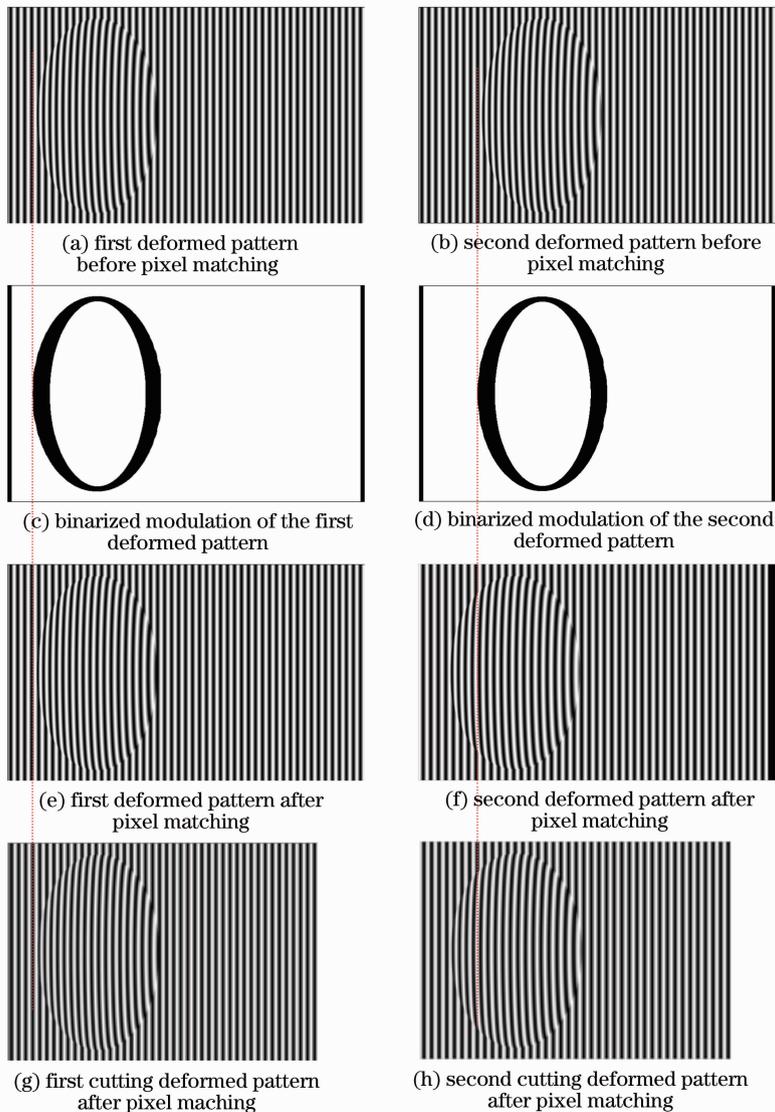


图 2 像素匹配过程

Fig. 2 Pixel matching process

在  $I_{np}(x,y)(n = 1,2,3,4,5)$  中截取同一区域的图像, 可得到像素点一一对应的变形条纹图  $I'_n(x,y)(n = 1,2,3,4,5)$ , 其中  $I'_1(x,y)$  和  $I'_2(x,y)$  如图 2(g)、(h) 所示。

#### 4 实验及结果分析

本实验所选用的是一个兔子形状的被测物体, 如图 3(a)所示, 将其放置在如图 1 所示的在线三维测量装置下进行测量。

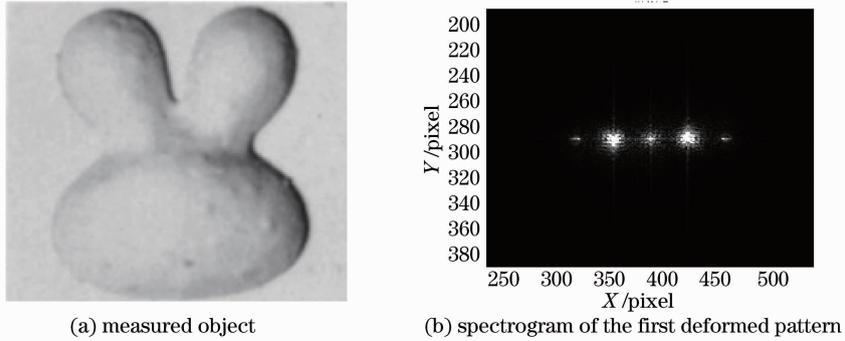


图 3 实验物体及变形条纹频谱图

Fig. 3 Measured object and the spectrogram of the deformed fringe pattern

在一束固定的正弦光栅条纹被投影到被测平面后, 条纹通过物体高度的调制, 被 CCD 采集到的变形条纹如图 4 所示。其中图 4(a)、(b)分别为采集到的第一帧和第二帧变形条纹图。第一帧图像经上述方法处理后可得到其频谱分布, 如图 3(b)所示。由空

间滤波器进行滤波, 得到包含有物体高度信息的第一级频谱, 并由此求出调制度分布。通过大津法找出阈值并对调制度图像进行二值化处理, 第一帧和第二帧调制度图像对应的二值化图分别如图 4(c)、(d)所示, 图中像素值为 0 的部分为物体的阴影所在区域。

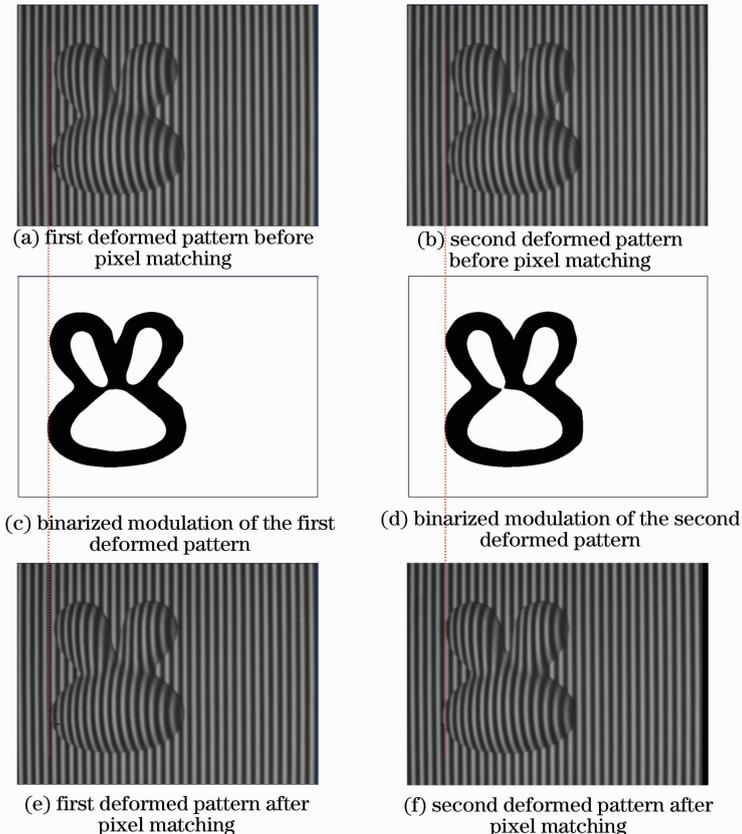


图 4 被测物体像素匹配过程

Fig. 4 Pixel matching process of the measured object

由图 4(c)中所截取的特征模板如图 5(a)所示,以此模板进行相关运算,可以计算出相邻变形条纹之间物体的位移。再将各帧变形条纹移动此位移相应的整数倍,即可完成像素匹配。图 4(e)、(f)为

第一帧和第二帧的变形条纹图像素匹配后的图像,可以看出第二帧变形条纹图向物体运动反方向移动了一定的位移,此时这二幅图像的像素点是一一对应的。

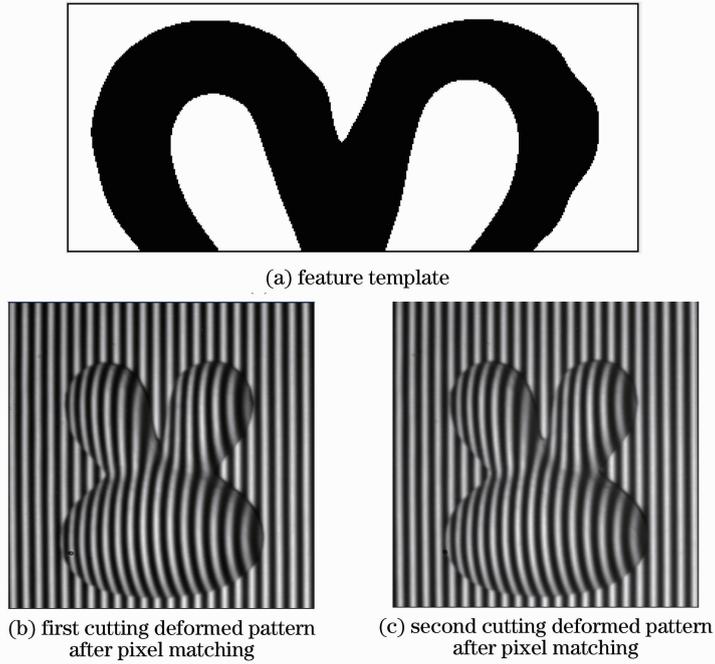


图 5 特征模板及对应像素图

Fig. 5 Feature template and the corresponding pixel patterns

由像素匹配后的各帧变形条纹图中截取带有物体高度信息的图像。其中从第一帧和第二帧变形条纹图中的相同位置截取的图像分别如 5(b)、(c)所示,其像素点是一一对应的。

图 6 为恢复出的物体物面信息实验结果。根据实验可得,相比于直接使用调制度图像提取特征模板进行像素匹配,应用大津法和二值化处理以后,速度提升了约 35%,实验结果如表 1 所示。这很好地证明了本方法在保证精度的情况下,可以提升在线三维测量的速度,具有很好的实用性。

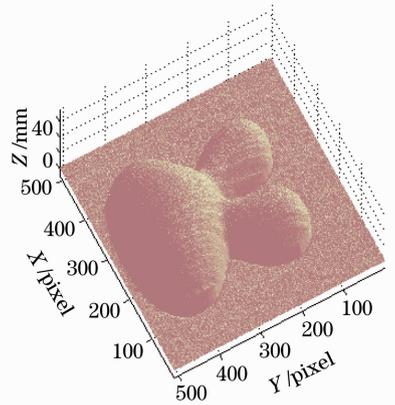


图 6 物体重构结果

Fig. 6 Reconstructed object

表 1 有无二值化过程像素匹配所耗时间

Table 1 Spent time in the pixel matching with and without the binarization process

Test number	1	2	3	Average
With binarization /s	1.3276	1.3382	1.3637	1.3432
Without binarization /s	1.8374	1.7634	1.8265	1.8091

## 5 结 论

提出了一种基于低调制度特征的在线三维测量方法。在提取物体调制度信息的基础上,使用大津

法找出一个阈值,并进行二值化,这样可以提取出低调制度区域的调制度信息,再在截取特征模板的基础上进行像素匹配,即可正确恢复出待测物体的三

维立体图像。本方法可以在保证测量精度的情况下,有效提升测量速度。仿真和实验结果证明了本方法的有效性和实用性,为在线三维测量提供了一种有效的检测方法。

### 参 考 文 献

- 1 M Takeda, K Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes[J]. Appl Opt, 1983, 22(24): 3977—3982.
- 2 Jian Li, Xianyu Su. Improved Fourier transform profilometry of the automatic measurement of three dimensional object shapes [J]. Opt Eng, 1990, 29(12): 1439—1444.
- 3 Chen Wenjing, Su Xianyu. New method to eliminate extension of zero component in FTP[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(6): 740—744.  
陈文静, 苏显渝. 傅里叶变换轮廓术中抑制零频的新方法[J]. 中国激光, 2004, 31(6): 740—744.
- 4 Yang Xin, Cao Yiping. Three dimensional online inspecting method for workpiece on the circular pipeline by PMP[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(2): 78—80.  
杨 鑫, 曹益平. 一种基于PMP的圆型流水线上工件的三维在线检测方法[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(2): 78—80.
- 5 Zhong Lijun, Cao Yiping. Online phase measuring profilometry with phase shifting perpendicular to moving direction of measured object[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 417—420.  
钟立俊, 曹益平. 相移正交物体运动方向的在线相位测量轮廓术[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 417—420.
- 6 Li Kun, Cao Yiping. A new method for on-line three dimensional inspection without marked [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2009, 7(2): 57—61.  
李 坤, 曹益平. 一种无需标记的在线三维测量[J]. 光学与光电技术, 2009, 7(2): 57—61.
- 7 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase measuring profilometry in big scale measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 792—796.  
李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. 光学学报, 2000, 20(6): 792—796.
- 8 A Asundi, W S Zhou. Unified calibration technique and its applications in optical triangulation profilometry[J]. Appl Opt, 1999, 38(16): 3556—3561.
- 9 Li Liaoliao, Deng Shanxi, Ding Xinghao. Binarization algorithm based on image partition derived from Da-Jing method[J]. Micro Computer Information (Control and Automation Publication Group), 2005, 21(24): 76—77.  
李了了, 邓善熙, 丁兴号. 基于大津法的图像分块二值化算法[J]. 微计算机信息(管控一体化), 2005, 21(24): 76—77.

栏目编辑:何卓铭