

文章编号: 0253-2239(2006)11-1641-6

采用多投影器的反向条纹投影技术*

蔡元元 苏显渝

(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

摘要: 提出运用多投影器同时投影的反向条纹投影技术。通过测量标准样品的绝对相位, 为不同角度放置的投影器产生不同的反向条纹。检测时, 投影器同时投影各自的反向条纹, 若物体和样品一致, 在摄像机上就得到一幅消除了阴影和截断的标准正弦条纹图, 若物体有变形, 仅用肉眼就能判断, 用简单的傅里叶变换和相位展开就能定量地描述变形。对于复杂的不连续物体也只需获取一幅条纹图就能完成检测, 在很大程度上解决了阴影及相位展开的问题, 实现了该类物体的在线快速检测。阐述了该技术的原理, 以双投影器的反向条纹投影为例, 实验验证了提出方法的有效性, 并进行了相应的误差分析和应用条件讨论。

关键词: 信息光学; 快速三维面形检测; 多投影器反向条纹投影; 结构光投影; 不连续物体

中图分类号: O438 文献标识码: A

Inverse Fringe Projection Technique Using Multi-Projectors Simultaneously

Cai Yuanyuan Su Xianyu

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract: The inverse fringe projection technique using multi-projectors simultaneously is proposed. Through the absolute phase measurement of the master object, different inverse fringes are generated for the different projectors placed in different directions. During the detection, the projectors project their inverse fringes simultaneously. If the object and master are identical, a standard sine fringe without shadow and break is got on the camera. If the object is deformed, the deformation becomes obvious, and can be evaluated quantitatively by simple Fourier transformation and phase unwrapping. Therefore, the detection of complex and discontinuous objects can be completed with only one fringe image, the problems of shadow and break are solved to a large extent, and consequently the fast online detection of this kind of objects is realized. The principle of this technique is expatiated, and the validity is proved by taking the system of two projectors for example. The analysis of error and requirement of application are also presented.

Key words: information optics; fast detection of three-dimensional (3-D) profile; inverse fringe projection with multi-projectors; structured light projection; discontinuous objects

1 引 言

结构光投影三维传感技术^[1], 如叠栅轮廓术^[2]、相位测量轮廓术^[3]以及傅里叶变换轮廓术^[4], 由于具有非接触, 高精度等优点, 广泛应用于工业产品的面形检测中^[5]。但要检测复杂的不连续物体, 阴影和相位展开一直是该类技术不可避免的两大难题。同时由于流水线速度的限制或需要检测的产品数量巨大, 要求采用的检测技术必须快速而稳定。虽然傅里叶变换轮廓术只需一幅变形条纹图就可完成检测, 但对于复杂的不连续物体, 不能进行相位的正确

解调。时间相位展开^[6]可以很好地测量该类物体, 但所需条纹图数量巨大, 无法进行快速检测。反向条纹投影技术是针对在线快速检测提出的一种新技术^[7~10], 但由于存在阴影的问题, 影响了检测的效果。

本文所提出的多投影器同时投影的反向条纹投影技术克服了上述技术缺点, 具有快速、稳定、无须复杂相位展开和消除阴影等优点。该技术根据物体特征安排投影器的角度和个数, 使其相互消除投影阴影, 然后运用时间相位展开法对标准样品进行测量, 为每个投影器产生一幅不同的反向条纹, 然后在

* 国家自然科学基金(60527001)资助课题。

作者简介: 蔡元元(1981~), 男, 四川人, 四川大学硕士研究生, 主要从事光学三维传感研究工作。

E-mail: dustyaircy@sina.com

导师简介: 苏显渝(1944~), 男, 重庆人, 四川大学教授、博士生导师, 主要从事信息光学和光学三维传感的教学与研究工
作。E-mail: xysu@email.scu.edu.cn

收稿日期: 2006-03-10; 收到修改稿日期: 2006-08-22

检测产品时,投影器同时投影各自的反向条纹。若产品和样品一致,在摄像机上就得到一幅消除了阴影和截断的标准正弦条纹图。若产品有变形,仅用肉眼就能观察到,用简单的傅里叶变换和相位展开就能定量地描述变形。

2 原 理

2.1 反向条纹投影技术

传统的条纹投影技术一般是把直的正弦条纹投影到

物体表面,记录变形的条纹图,如图 1(a)所示。而反向条纹投影技术^[7~10]则把这个过程反了过来,投影变形的正弦条纹,在记录平面得到直的条纹,如图 1(b)所示。

当物体有变形时,得到的不再是标准的正弦条纹,在变形处条纹也发生变形,如图 1(c)所示。这样,物体变形就十分明显,要得到变形的大小和位置也十分简单。该技术特别适合对速度有很高要求的在线和批量检测。

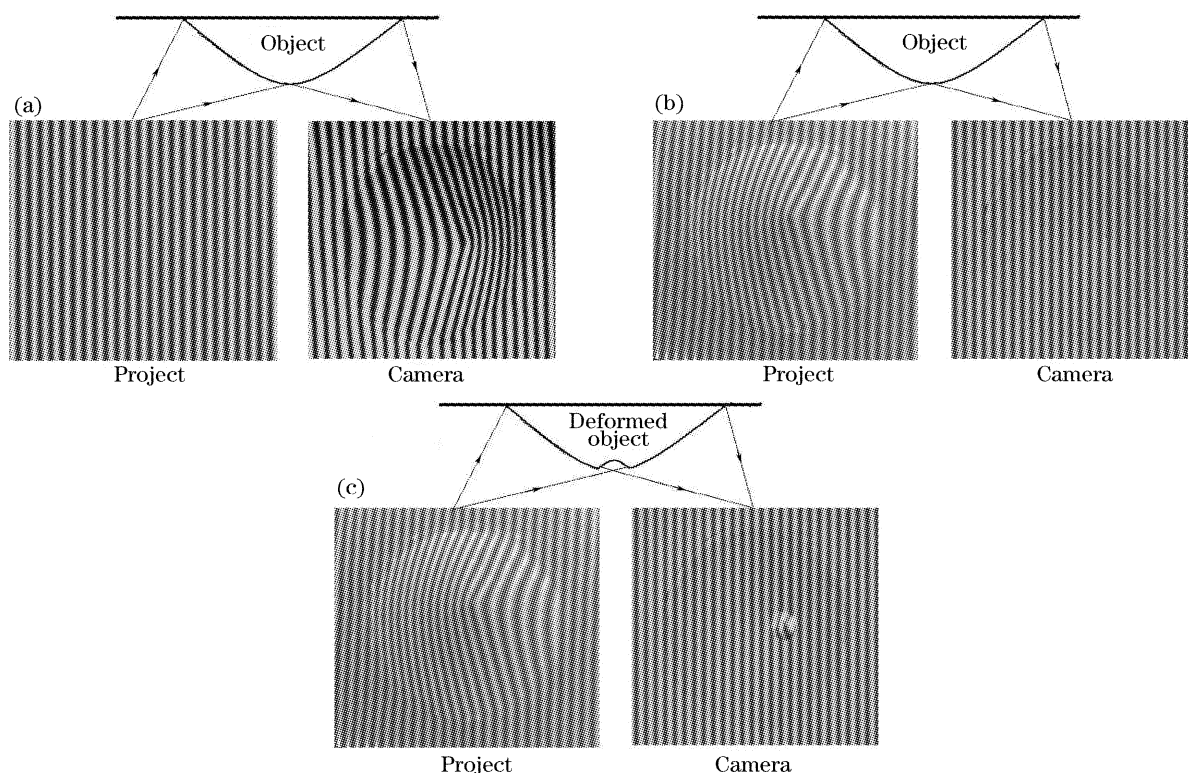


图 1 传统条纹投影和反向条纹投影的区别。(a) 传统条纹投影, (b) 反向条纹投影, (c) 反向条纹投影变形检测

Fig. 1 Differences between conventional and inverse fringe projection. (a) Conventional fringe projection, (b) inverse fringe projection, (c) deformation detection of inverse fringe projection

2.2 多投影器同时投影的反向条纹投影技术

当用单投影器的反向条纹投影技术检测高度变化较大的物体时,会不可避免地产生阴影,如图 2(a)所示,对物体全面的检测也就无法完成。考虑到在线和批量检测的速度要求,旋转物体、移动投影器或摄像机来消除阴影是不可取的。我们提出用多投影器同时投影的反向条纹投影技术兼顾了速度和消除阴影的要求。下面以双投影器的系统为例,介绍该技术的原理。

系统如图 2(a)所示,投影器、物体表面和摄像机坐标系的关系如图 2(b)所示。图中 $I_1(l_1, m_1)$, $I_2(l_2, m_2)$, $I_3(i, j)$ 和 $I(x, y, z)$ 分别是投影器 1, 投影器 2, 摄像机和物体表面的光强分布。 f_1, f_2, f 是它们之间的几何传递关系, g_1, g_2, g 表示它们之

间的光强传递关系,具体表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = f_1 \begin{bmatrix} l_1 \\ m_1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = f_2 \begin{bmatrix} l_2 \\ m_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} I(x, y, z) = g_1 [I_1(l_1, m_1)], \\ I(x, y, z) = g_2 [I_2(l_2, m_2)], \\ I_3(i, j) = g [I(x, y, z)]. \end{cases} \quad (2)$$

首先,投影器分别单独投影,用时间相位展开技术对物体进行测量,求出 f_1, f_2, f, g_1, g_2, g ; 然后就同一幅期望图像 $I_w(i, j)$, 为两投影器产生各自的反向条纹 $I_{INV1}(l_1, m_1), I_{INV2}(l_2, m_2)$:

$$I_{INV1}(l_1, m_1) = g_1^{-1} g^{-1} \{ I_w \{ \{ f [f_1(l_1, m_1)^T]^T \} \} \}, \quad (3)$$

$$I_{INV2}(l_2, m_2) = g_2^{-1} g^{-1} \{ I_w \{ \{ f [f_2(l_2, m_2)^T]^T \} \} \}, \quad (4)$$

当投影反向条纹时,在投影器投影的重叠区

域,设两投影器对应着物体表面同一点 (x,y,z) 的像素点分别为 $(l_1,m_1),(l_2,m_2)$,对应该点的摄像机像素点为 (i,j) 。由于物体表面和摄像机坐标系有一一对应的关系, $(l_1,m_1),(l_2,m_2)$ 对应的摄像机像素点即为 (i,j) 。因为

$$I_W(i,j) = g\{g_1[I_{INV1}(l_1,m_1)]\}, \quad (5)$$

$$I_W(i,j) = g\{g_2[I_{INV2}(l_2,m_2)]\}, \quad (6)$$

所以： $g_2[I_{INV2}(l_2,m_2)] = g_1[I_{INV1}(l_1,m_1)]$, (7)

这也就是说当投影器分别投影各自的反向条纹时,在物体表面投影的重叠区域,看到的图像完全相同。因此在同时投影时,在此区域的图像仅是强度叠加。为了能对重叠区域的变形进行量化,只允许其中一个投影器投影该区域,而把其他投影器对应该区域的图像设为零。因此,在反向条纹计算之前,需要通过在摄像机平面比较投影器分别投影时的调制度大小,来确定各个投影器的有效投影区域。

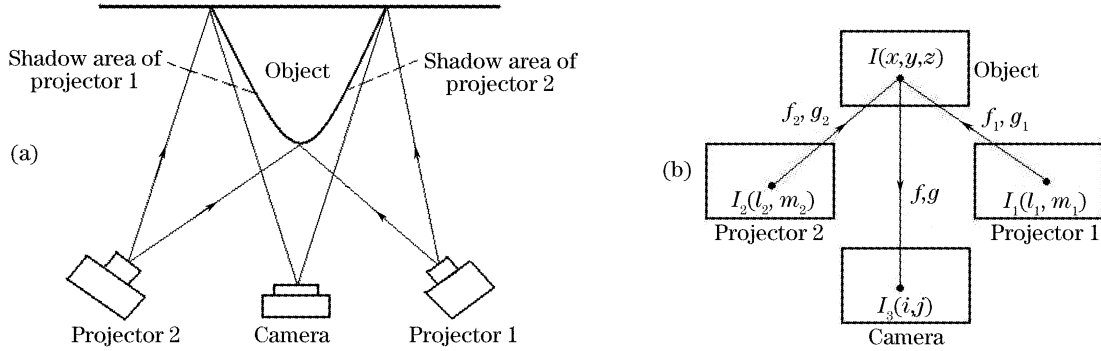


图 2 多投影器反向条纹投影系统。(a) 实验系统示意图, (b) 坐标系之间的关系

Fig. 2 System of inverse fringe projection using multi-projectors simultaneously. (a) Schematic diagram of experimental system, (b) relationship between coordinates

对于量化变形,重要的是条纹相位,所以在计算反向条纹时可以只考虑几何反转,而不用进行光强的反转,这样产生的反向条纹称为满调制度的反向条纹 $I_{INV,FM}$ ^[8],表示为

$$I_{INV1,FM}(l_1,m_1) = I_W\{f[f_1(l_1,m_1)^T]^T\}, \quad (8)$$

$$I_{INV2,FM}(l_2,m_2) = I_W\{f[f_2(l_2,m_2)^T]^T\}. \quad (9)$$

同时投影此条纹在待测物体上的结果为 $I_{Cam,Inv,FM}(i,j)$ 。从中提取出纯余弦部分 $I_{cos}(i,j)$,即可观察到待测物体有无变形,与在标准样品上的投影结果 $I_{Cam,Inv,FM,Sta}(i,j)$ 进行相位差的计算,即可准确地确定变形的大小和位置,再通过相位差和高度差的映射关系,即可定量地描述待测物体的变形。

2.3 相位差和高度差的映射关系

设摄像机像素点 k 在变形前后分别对应物体表面上的 E, F 两点,相位差表示为

$$\Delta\phi(i_k, j_k) = \phi_{Cam,Inv,FM,Sta}(i_k, j_k) - \phi_{Cam,Inv,FM}(i_k, j_k), \quad (10)$$

$\phi_{Cam,Inv,FM}, \phi_{Cam,Inv,FM,Sta}$ 分别是 $I_{Cam,Inv,FM}$ 和 $I_{Cam,Inv,FM,Sta}$ 的相位。高度差表示为^[11]

$$\begin{aligned} \Delta h(i_k, j_k) &= DF - BE = \\ &= \frac{AG(l/d)}{1 + AG/d} - \frac{AC(l/d)}{1 + AC/d} = \\ &= \frac{(AC + CG)(l/d)}{1 + (AC + CG)/d} - \frac{AC(l/d)}{1 + AC/d}, \end{aligned} \quad (11)$$

其中 l 和 d 是图 3 所示的系统结构参量,参考平面上

相位和距离的映射关系可以在检测前建立^[11],这里用 R 表示:

$$AC = R(\Delta\phi_{AC}), \quad (12)$$

$$CG = R(\Delta\phi_{CG}), \quad (13)$$

其中 $\Delta\phi_{AC}, \Delta\phi_{CG}$ 分别为点 A 和 C ,点 C 和 G 的相位差:

$$\Delta\phi_{CG} = \Delta\phi(i_k, j_k), \quad (14)$$

$$\Delta\phi_{AC} = \phi_{Cam,Inv,FM,Re}(i_k, j_k) - \phi_{Cam,Inv,FM,Sta}(i_k, j_k), \quad (15)$$

其中 $\phi_{Cam,Inv,FM,Re}$ 是在参考平面上反向条纹投影结果的相位。

把(12)式~(14)式代入(11)式中即可求得相位差 $\Delta\phi$ 和高度差 Δh 的映射关系:

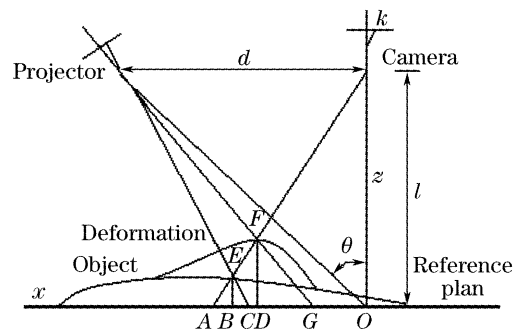


图 3 相位差和高度差的映射关系图

Fig. 3 Relationship between phase difference and height difference

$$\Delta h(i_k, j_k) = \frac{\{R(\Delta\phi_{AC}) + R[\Delta\phi(i_k, j_k)]\}(l/d)}{1 + \{R(\Delta\phi_{AC}) + R[\Delta\phi(i_k, j_k)]\}/d} - \frac{R(\Delta\phi_{AC})(l/d)}{1 + R(\Delta\phi_{AC})/d}, \quad (16)$$

在大多数应用中 $AC, CG \ll d$, (16) 式可简化为

$$\Delta h(i_k, j_k) = R[\Delta\phi(i_k, j_k)](l/d) = R[\Delta\phi(i_k, j_k)]\tan\theta. \quad (17)$$

3 实物检测实验

3.1 变形检测

实验采用双投影机系统,如图 2 所示。实验用 LCD 和数字光处理 (DLP) 投影机,分辨率都是

800×600,用一个 640×480 的 CCD 记录图像,用的物体是一个人头模型。系统参量 $l_{LCD}, d_{LCD}, l_{DLP}, d_{DLP}$ 分别为 155.6 cm, 46.7 cm, 152.8 cm, 43.2 cm。投影机单独投影时的普通条纹投影结果如图 4(a)、图 4(b)所示,反向条纹投影结果如图 4(c)、图 4(d)所示。可以看到,单个投影机无法完成模型正面的检测工作,我们可以看到明显的阴影区域。

双投影机同时投影时,首先确定各个投影机的投影区域,如图 5(a)、图 5(b)所示,然后产生满调制度反向条纹,如图 5(c)、图 5(d)所示。该反向条纹同时投影在标准样品上的结果如图 5(e)所示,提取出的纯余弦部分如图 5(f)所示。

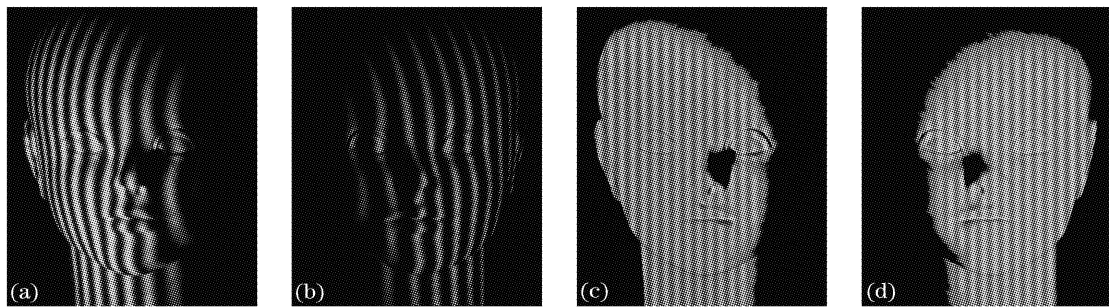


图 4 采用单 LCD (a)和数字光处理(b)投影机的传统条纹投影和采用单 LCD (c)和数字光处理(d)投影机的反向条纹投影结果

Fig. 4 Results of conventional fringe projection using single LCD (a) and DLP (b) projector and inverse fringe projection using single LCD (c) and DLP (d) projector

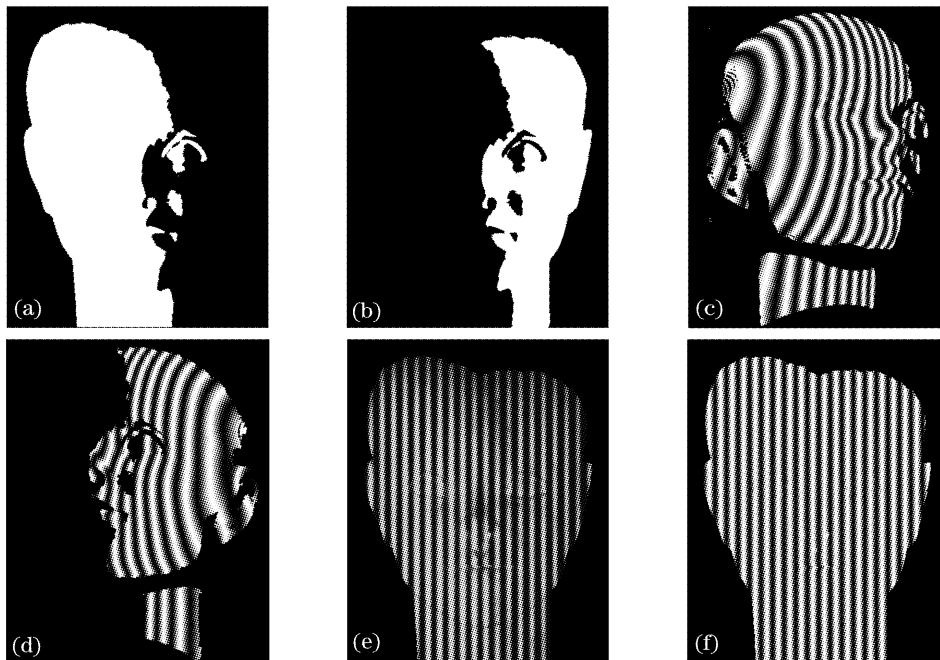


图 5 双投影机同时投影反向条纹的结果, LCD (a)和数字光处理(b)投影机的有效投影区域, LCD (c)和数字光处理(d)投影机的满调制度反向条纹, (e)两投影机在样品上同时投影反向条纹的结果, (f)图(e)的纯余弦部分

Fig. 5 Result of inverse fringe projection using two projectors simultaneously, valid projection area of LCD(a)and DLP(b) projector, full modulation inverse fringe of LCD (c) and DLP(d) projector, inverse fringes projected on master using two projectors simultaneously(e) and (f) pure cosine part of (e)

当物体的变形在单个投影器的阴影区域时,该投影器检测不到,如图 6(a)、图 6(b)所示。用多投影器可以轻松解决这个问题。图 6(c)是双投影器同时投影反向条纹的结果。图 6(d)是条纹的纯

余弦部分,变形清晰可见。图 6(e)是和标准样品的相位差,即图 5(e)和图 6(c)的相位差,变形被准确地提取出来。再运用(17)式得到用高度定量描述的变形,如图 6(f)所示。

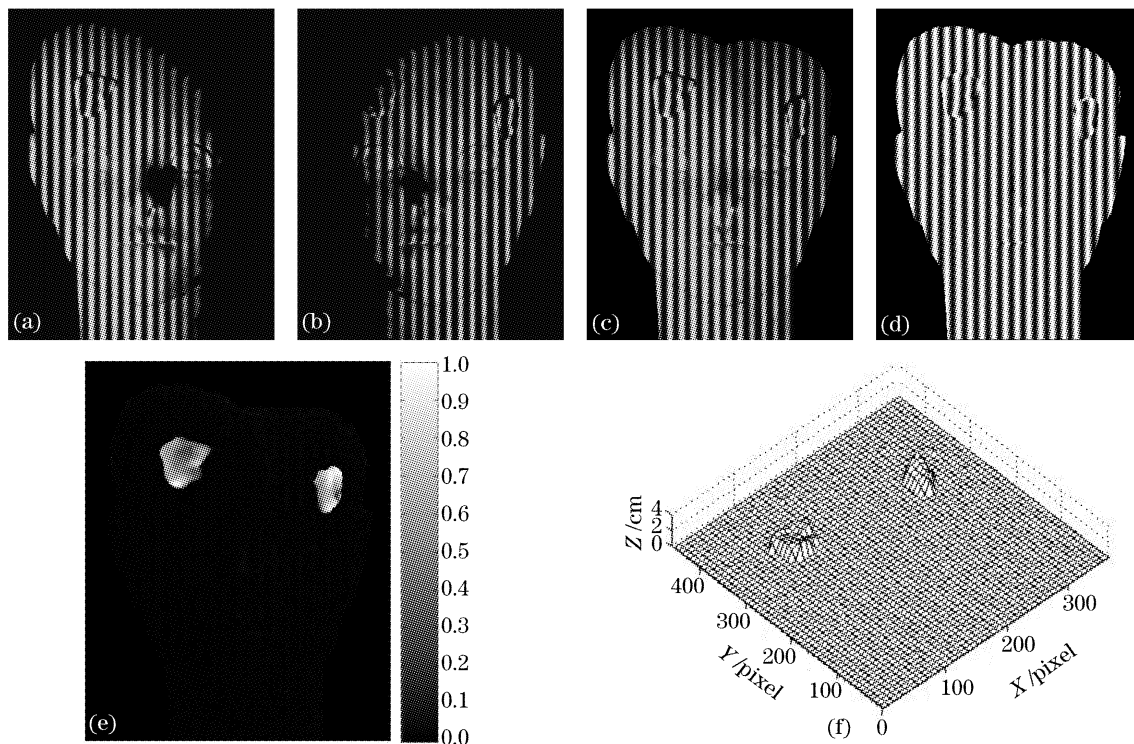


图 6 双投影器同时投影反向条纹的变形检测结果,采用 LCD (a)和数字光处理 (b)投影器的反向条纹投影变形检测,(c)两投影器同时投影反向条纹到变形物体表面上的结果,(d)图(c)的纯余弦部分,(e)检测到的用归一化相位表示的变形,(f)用高度表示的变形的三维图

Fig. 6 Result of deformation detection of inverse fringe projection using two projectors simultaneously, deformation detection of inverse fringe projection using LCD (a) and DLP (b) projector, result of inverse fringes projected on deformed object using two projectors simultaneously (c), (d) pure cosine part of (c), (e) detected distortion in the normalized phase scale, (f) three dimensional image of distortion in the height scale

3.2 误差分析

图 7(a)是反向条纹在标准样品上的投影结果 $I_{\text{Cam,Inv,FM,Sta}}$ 和期望标准正弦条纹 I_w 的相位差,即图 5(e)与标准正弦条纹的相位差。可以看到在物体面形变化梯度较大的地方,如嘴唇和鼻孔,相位差较大,这是由于计算反向条纹时使用的插值算法^[8]所致。在条纹调制度较高和较低的地方,如额头的右上部和左面颊部分,相位差也较大。这是因为实验中 LCD 和数字光处理投影器亮度相差较大,如图 4(a)、图 4(b)所示,不能保证对样品测量时均在 CCD 的线性区域,造成相位测量的不准确,计算反向条纹时产生误差。两投影器各自投影区域以及全部有效区域的相位标准差如表 1 所示。

图 7(b)是反向条纹在待测物体上的投影结果 $I_{\text{Cam,Inv,FM}}$ 和在标准样品上的投影结果 $I_{\text{Cam,Inv,FM,Sta}}$,即图 5(e)和图 6(c),除去变形区域的相位差。可见

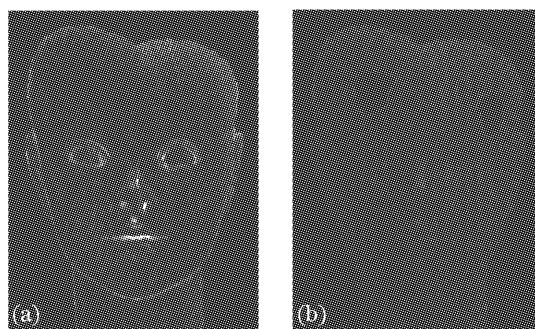


图 7 双投影器同时投影反向条纹的相位误差图,(a) $I_{\text{Cam,Inv,FM,Sta}}$ 和 I_w 之间的相位差,(b) $I_{\text{Cam,Inv,FM}}$ 和 $I_{\text{Cam,Inv,FM,Sta}}$ 之间除去变形区域的相位差

Fig. 7 Images of phase error of inverse fringe projection using two projectors simultaneously, (a) phase difference between $I_{\text{Cam,Inv,FM,Sta}}$ and I_w , (b) phase difference between $I_{\text{Cam,Inv,FM}}$ and $I_{\text{Cam,Inv,FM,Sta}}$ except the deformed area

图 7(a)的误差在很大程度上被消除了,表 2 列出了各个区域的相位标准差。因为变形的检测是比较 $I_{\text{Cam,Inv,FM}}$ 和 $I_{\text{Cam,Inv,FM,Sta}}$ 的相位,所以该误差表征了检测时的相位误差。

表 1 在标准样品上投影结果与期望条纹的相位误差

Table 1 Phase deviation of projection result on standard object from wanted fringe

	Standard deviation /rad
Whole projection area	0.0691
Projection area of LCD	0.0673
Projection area of DLP	0.0720

表 2 检测的相位误差

Table 2 Phase error of inspection

	Standard deviation /rad
Whole projection area	0.0351
Projection area of LCD	0.0309
Projection area of DLP	0.0414

3.3 应用条件

由上述分析可知,该技术在应用于产品检测时有一定的要求和限制条件。首先必须对标准样品进行准确的相位测量;其次,检测系统必须保持不变,待测物体必须准确定位于标准样品测量时所在位置;再次,所用投影机最好相同,以消除亮度,对比度等不匹配造成的误差;最后,若要定量描述变形,变形不能太大而造成条纹的截断、重叠,导致简单的相位展开无法完成检测,使该技术丧失快速检测的优势。上述的限制条件在一般的工业产品检测中都是比较容易满足的,特别适用于流水线上的产品质量检测。

4 结 论

提出了一种运用多投影机同时投影的反向条纹投影技术,阐述了该技术的原理,以采用双投影器的反向条纹投影为例,用实验证实所提出方法的有效性,并进行了误差分析,阐述了应用条件。通过用不同角度放置的投影机同时投影各自的反向条纹的方

法,可以对复杂的不连续物体进行快速、稳定的检测,克服了对该类物体检测时的阴影、相位展开困难和速度慢的问题,在工业流水线和批量检测领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 Wang Xueli, Zhao Hong, Li Genqian *et al.*. A New 3-D measurement system based on projection moiré[J]. *Acta Optica Sinca*, 2001, **21**(10): 1239~1244 (in Chinese)
王学礼,赵宏,李根乾等.一种新的投影莫阿三维轮廓测试系统[J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1239~1244
- 3 Wang Liwu, Su Xianyu, Zhou Libing. Correction algorithm of random phase shifting errors in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinca*, 2004, **24**(5): 614~618 (in Chinese)
王立无,苏显渝,周利兵.相位测量轮廓术中随机相移误差的校正算法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 614~618
- 4 Su Xianyu, Tan Songxin, Xiang Liqun *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method[J]. *Acta Optica Sinca*, 1998, **18**(9): 1228~1233 (in Chinese)
苏显渝,谭松新,向立群等.基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1228~1233
- 5 Wolfgang Osten. Application of optical shape measurement for the nondestructive evaluation of complex objects [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 232~243
- 6 Yue Huimin, Su Xianyu. Temporal phase unwrapping progress [J]. *Laser J.*, 2004, **25**(3): 9~12 (in Chinese)
岳慧敏,苏显渝.时间相位展开方法研究进展[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(3): 9~12
- 7 Michael K. Kalms, Wolfgang Osten, Werner Jüptner. Active industrial surface inspection with the inverse projected-fringe-technique[C]. *Proc SPIE*, 2001, **4596**: 37~47
- 8 Wansong Li, Thorsten Bothe, Wolfgang Osten. Object adapted pattern projection—Part I: Generation of inverse patterns [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2004, **41**: 31~50
- 9 Thorsten Bothe, Wansong Li, Christoph von Kopylow *et al.*. Object adapted inverse pattern projection-generation, evaluation and applications[C]. *Proc SPIE*, 2003, **4933**: 291~296
- 10 Michael K. Kalms, Wolfgang Osten, Werner Jüptner. Inverse projected-fringe-technique with automatic pattern adaptation using a programmable spatial light modulator[C]. *Proc SPIE*, 1998, **3407**: 483~489
- 11 Chen Jiabi, Su Xianyu. *Optical Information Technique—Principles and Applications* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 339~350 (in Chinese)
陈家璧,苏显渝. *光学信息技术原理及应用* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 339~350