

互补条纹投射技术实现变形检测方法研究

周文静 彭军政 陈明仪 于瀛洁

(上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

摘要 提出了一种利用互补条纹实现位置变形检测及补偿的新方法。该方法可以用于校正物体在线检测中因定位不精确而带来的测量误差。首先利用参考物体并根据散乱点相位插值算法生成互补条纹;然后投射到被测物体表面,计算未发生形状变形处的相位,即为由产品定位不精确引起的相位变化量。利用此相位差与深度映射关系可将待测物体绝对相位转化为其三维信息,同时根据基于重叠区最小二乘迭代原理计算出待测物体定位误差量,最后利用刚体变换方法补偿待测物体的位置变形。计算机模拟及实验结果验证了该方法的正确性、有效性和可行性。

关键词 光学三维测量;变形检测;重叠迭代;互补条纹投射技术

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100509

Deformation Detection Method by Complemented Fringe Projection Measurement

Zhou Wenjing Peng Junzheng Chen Mingyi Yu Yingjie

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract An approach is presented to detect and compensate position variation, which adopts complemented fringe projection technique. It can effectively solve the problem of measurement error aroused by inexact positioning in the in-line inspection. Firstly, complemented fringe relative to referenced sample are generated and projected onto its surface. Then the fringe pattern images are captured. Secondly, fringe analysis techniques are adopted to acquire the phase when referenced sample is perfect positioned; the same way is employed onto the product which is inaccurate positioning. The phase of non-distortion and overlap area are chosen to compute difference caused by the inexactly positioning. This phase differences are added to the absolute phase for referenced sample to obtain a new absolute phase after positioning error, 3D coordinate of actual product are acquired using phase and depth mapping relation. At last, position variations are computed by least squares overlap iteration, and the rigid transform is employed to compensate error. Simulation analysis and experimental results prove the validity and feasibility of the approach.

Key words optical 3D measurement; deformation measurement; overlap iteration; complemented fringe projection technique

OCIS codes 120.2650; 120.4630; 120.5050

1 引 言

物体检测已成为工业生产中必不可少的重要环节。光学测量方法因具有非接触,精度高,速度快和自动化程度高等特点已经成为检测发展的趋势^[1]。互补条纹投射测量技术不但继承了传统数字条纹投

射技术的优点,而且非常适合变形检测,近年来已得到广泛的关注以便满足各种应用要求^[2~4]。数字条纹投射测量技术是将周期正弦条纹投射到被测物体上,该条纹被物体表面的深度调制而发生变形^[5],通过分析求解变形条纹获取物体三维信息;而互补条

收稿日期: 2010-06-09; **收到修改稿日期**: 2010-10-25

基金项目: 上海市博士后科研资助项目(09R21412900)、上海市科委国际合作项目(09530708700)、上海市教委创新项目(A10010909014)和上海大学研究生创新基金(SHUCX10 2196)资助课题。

作者简介: 周文静(1975—),女,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事工程中的光学检测技术、数字全息层析技术等方面的研究。E-mail: lazybee@shu.edu.cn

纹投射测量技术的过程恰恰相反:首先,投射周期正弦条纹到参考物体表面获得变形条纹,根据相位相等关系及相关算法获取投影器坐标系和摄像机坐标系的几何映射关系^[6~9];其次,定义参考物体上期望分布的条纹,根据已获取的几何映射关系,计算生成投影器应投影的互补条纹;最后,将所生成的互补条纹投射至待测物体表面,采集被调制的条纹,根据所获取的条纹相位与预定义的条纹相位差别判定物体表面是否变形。

目前相关研究主要集中在如何生成可靠的互补条纹来获取被测物体形状变化信息^[6~9],而不考虑被测物体的位置变形,即实际位置与理想位置不一致情况。但在实际的在线检测中,位置变形检测则是不可或缺的环节,即便依靠一般的机械机构来定位,也会存在一定的定位误差,从而导致物体表面条纹相位发生变化,影响面形变化量的求解精度。如果采用高精度定位平台或者图像处理方法进行位置变化检测则势必会增加额外成本并且不一定能达到期望的效果,上述因素使得互补条纹投射测量技术应用于在线检测存在一定的限制。

针对上述问题,本文提出了一种基于互补条纹投射测量技术实现位置变形检测方法。在互补条纹投射测量过程中,直接比较摄像机记录的待测物体与理想物体未变形重叠区的互补条纹相位,将相位差叠加到理想物体对应位置处的绝对相位,并通过相位深度映射关系转换成为待测物体处于实际位置处的绝对面形分布,进行最小二乘迭代求解待测物体的位置变形。本文所提方法能有效地对位置变形进行检测和补偿,从而消除了互补条纹投射测量技术中因位置变形所产生的测量误差。

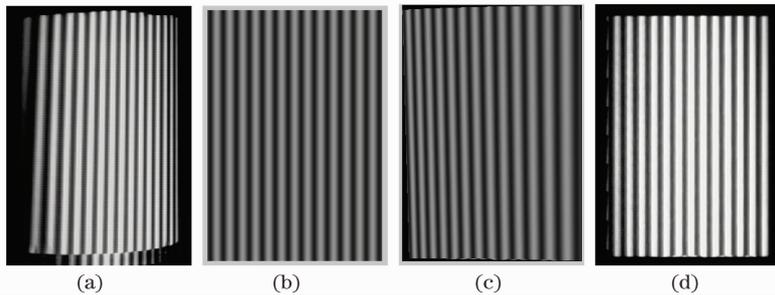


图1 互补条纹投射测量技术过程。(a)标准正弦条纹被物体所调制的变形条纹图,(b)期望在CCD上得到的直条纹,(c)生成的互补条纹图,(d)互补条纹被待测物体所调制的条纹图

Fig.1 Process of complemented fringe projection technique. (a) Distortion pattern of sinusoidal fringe, (b) straight fringe expecting recorded by CCD, (c) complemented fringe pattern, (d) fringe pattern recorded by CCD after projecting complemented fringe

2 原 理

2.1 互补条纹投射测量技术的基本原理

互补条纹投射测量技术采用与数字光栅投射测量技术相逆的方法,其测量过程具体如下^[9]:

1) 由计算机根据

$$I_{\text{Pro,V}}(l,m) = a + b\cos[\varphi_V(l,m)], \quad (1)$$

$$I_{\text{Pro,P}}(l,m) = a + b\cos[\varphi_P(l,m)], \quad (2)$$

分别生成一套竖直条纹和一套水平条纹,其包含的相位分别为

$$\varphi_V(l,m) = 2\pi m/p, \quad (3)$$

$$\varphi_P(l,m) = 2\pi l/p, \quad (4)$$

并投射到物体表面。式中 (l,m) 表示投射器的像素坐标, p 为条纹节距, a,b 分别表示背景和调制度。通过摄像机采集变形条纹[图1(a)]有

$$I_{\text{Cam,V}}(i,j) = I_0(i,j) \times \{1 + \gamma(i,j)\cos[\varphi'_V(i,j)]\}, \quad (5)$$

$$I_{\text{Cam,P}}(i,j) = I_0(i,j) \times \{1 + \gamma(i,j)\cos[\varphi'_P(i,j)]\}. \quad (6)$$

最后运用条纹分析技术分别求解出物体在水平和竖直条纹下发生变形时的相位 $\varphi'_V(i,j),\varphi'_P(i,j)$ 。

2) 由光线追踪的方法可知,投影器和摄像机对应点具有相同的相位,利用步骤1)所求解的水平条纹和竖直条纹的相位,则就可根据

$$l(i,j) = p\varphi'_P(i,j)/(2\pi), \quad (7)$$

$$m(i,j) = p\varphi'_V(i,j)/(2\pi), \quad (8)$$

求解出摄像机像素点在投影器坐标系下的映射点的坐标,这些点通常散乱分布在投影器坐标系下。

3) 定义希望在检测中摄像机观测到的条纹 $I_w(i,j)$ [图1(b)],根据步骤2)已求解出的摄像机

像素点在投影坐标系的映射点坐标 (l, m) , 散乱映射点的相位为基础的插值求解出投影器整数像素点的相位 $\phi(l', m')$, 生成相应的互补条纹[图 1(c)]. 最后将所生成的互补条投射到处于理想位置的参考物体表面, 摄像机记录得到等间距的直条纹[图 1(d)], 运用条纹分析技术求解此相位作为参考相位。

4) 将互补条纹投射到待测物体表面, 比较摄像机记录条纹的相位与参考相位来判断物体表面是否发生形状变化。

2.2 互补条纹投射技术进行位置变形检测的算法

利用 2.1 节所述方法生成互补条纹, 本文提出了一种位置变形检测的新方法, 其基本步骤如下:

1) 采用相移法由计算机生成 N 幅互补条纹图, 则第 n 幅条纹图表示为

$$g_n(i, j) = g_0(i, j) \{1 + \gamma(i, j) \cos[\varphi(i, j) + \alpha_n]\}, \quad (9)$$

式中 $g_n(i, j)$ 表示条纹图上图像点 (i, j) 的灰度值, g_0 表示偏移量; γ 表示调制度, $\varphi(x, y)$ 表示物体表面任意点对应的互补相位, $\alpha_n = 2\pi n/p$ (p 为条纹节距) 表示条纹图像相移量。依次将 N 幅互补条纹图通过投影机投射到物体表面, 摄像机记录到被测物体表面的条纹图表示为

$$I_n(i, j) = I_0(i, j) \{1 + \gamma(i, j) \cos[\phi(i, j) + \alpha_n]\}, \quad (10)$$

式中 $\phi(i, j)$ 表示被物面深度调制后的互补条纹相位。采用最小二乘法^[10] 可以求解出被测物体调制后的互补条纹相位

$$\phi(i, j) = -\arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin \alpha_n}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos \alpha_n} \right]. \quad (11)$$

2) 在实际互补条纹投射测量中, 令参考物体处于理想位置时的相位作为参考相位 ϕ_{ref} , 实际位置处待测物体的相位为 ϕ_{obj} , 选取待测物体与参考物体重叠区未发生形状变化的区域, 其相位差可表示为

$$\Delta\phi(i, j) = \phi_{\text{obj}}(i, j) - \phi_{\text{ref}}(i, j), \quad (12)$$

根据此相位差即可判断待测物体实际位置是否与理想位置一致。将此相位差与参考样品处于理想位置时的绝对相位叠加, 即可得到待测物体处于实际位置的绝对相位分布

$$\phi'_{\text{obj}}(i, j) = \phi'_{\text{ref}}(i, j) + \Delta\phi(i, j), \quad (13)$$

式中 $\phi'_{\text{obj}}(i, j)$ 和 $\phi'_{\text{ref}}(i, j)$ 分别表示待测物体处于实际位置的绝对相位和参考物体处于理想位置时的绝对相位。

3) 通过条纹投射测量技术中的系统标定可得到待测物体处于实际位置的深度信息 $h(i, j)$ 和相位 $\phi'_{\text{obj}}(i, j)$ 的映射关系^[11]

$$\phi'_{\text{obj}}(i, j) = \frac{a(i, j)h(i, j)}{1 + b(i, j)h(i, j)}, \quad (14)$$

式中 $a(i, j), b(i, j)$ 为与系统几何设置有关的参数。确定了待测物体处于实际位置处的深度信息 $z = h(\Delta\phi, i, j)$ 后, 根据空间直线方程可以 CCD 面阵上每一个像素点 (i, j) 确定了一条入射到成像面的光线, 由深度坐标 z 可以唯一确定该点的横向坐标

$$x = X(Z, i, j) = a_1(i, j)z + a_0, \quad (15)$$

$$y = Y(Z, i, j) = b_1(i, j)z + b_0, \quad (16)$$

式中 $a_0(i, j), a_1(i, j), b_0(i, j), b_1(i, j)$ 为图像点 (i, j) 的函数。通过(14), (15), (16)式就可完成相位到空间三维坐标值的转换关系。

4) 待测物体实际位置变形量可表示为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma)$, 本文假定 $\Delta z, \Delta\gamma$ 通过工作台控制, 使这两个变形量足够小以至忽略不计。为获取位置变化量, 本文采用多孔重叠拼接思想^[12,13], 考虑待测物体与参考物体重叠区内任意匹配点 i , 坐标转换关系可以表示为

$$(\rho_{i1}, \theta_{i1}, z_{i1}) = (\rho_{i2}, \theta_{i2}, z_{i2})T, \quad (17)$$

式中坐标变换算子 T 与位置变化量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta\alpha, \Delta\beta)$ 构成映射关系。坐标变换代数模型为

$$\rho_{i1} = \rho_{i2} + \Delta x \cos \theta_{i2} + \Delta y \sin \theta_{i2} - \Delta\alpha z_{i2} \sin \theta + \Delta\beta z_{i2} \cos \theta. \quad (18)$$

根据 θ, z 来确定参考物体处于理想位置和待测物体处于实际位置时的匹配点取一定数量的匹配点, 利用(18)式组成线性方程组, 确定 4 个位置变形量。4 个位置变化量的精确值可通过线性最小二乘迭代的方法得到。

5) 利用得到的位置变形量, 通过刚体变换对待测物体处于实际位置的面型进行坐标转换

$$[x_{i1} \ y_{i1} \ z_{i1} \ 1] = [x_{i2} \ y_{i2} \ z_{i2} \ 1]T_X T_Y T_Z T', \quad (19)$$

其中

$$T_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta\alpha & -\sin \Delta\alpha & 0 \\ 0 & \sin \Delta\alpha & \cos \Delta\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_Y = \begin{bmatrix} \cos \Delta\beta & 0 & \sin \Delta\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Delta\beta & 0 & \cos \Delta\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{T}_z = \begin{bmatrix} \cos \Delta\gamma & -\sin \Delta\gamma & 0 & 0 \\ \sin \Delta\gamma & \cos \Delta\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Delta x & \Delta y & \Delta z & 1 \end{bmatrix};$$

从而补偿了位置变形量,使待测物体实际位置与参考物体的理想位置一致。

3 计算机模拟分析

为验证上述方法的可行性,本文进行了计算机模拟分析,分析过程如图2所示。

首先生成圆柱曲面(半径为20 mm,高度为40 mm)作为被测对象,按照前面所述方法生成互补条纹如图2(a)所示,然后给被测对象加上4个方

向变形量, $\Delta x = -1.3$ mm, $\Delta y = 1.4$ mm, $\Delta\alpha = 0.032$ rad, $\Delta\beta = -0.024$ rad使其相对初始位置发生一定的位置变形[如图2(a)所示],利用2.2节所述方法求得位置变形前与变形后重叠区的高度差如图2(d)所示,与理论重叠区的高度差[如图2(d)所示]相比较,所得的求解误差如图2(f)所示。显然,本文所提方法求解的重叠区高度差与理论相比较,误差非常小,只有 10^{-11} mm左右。最后根据所求解的重叠区高度差,利用(18)式得到被测物体的位置变形量为 $\Delta x = -1.3$ mm, $\Delta y = 1.4$ mm, $\Delta\alpha = 0.032$ rad, $\Delta\beta = -0.024$ rad,计算求解的残差为 $\Delta x = -0.1202 \times 10^{-9}$ mm, $\Delta y = 0.741 \times 10^{-10}$ mm, $\Delta\alpha = -0.22 \times 10^{-11}$ rad, $\Delta\beta = -0.67 \times 10^{-11}$ rad。上述计算机模拟结果可以表明,本文所提方法能够比较精确地求解出物体微小位置变形量,从而减小物体定位不准确带来的测量误差。

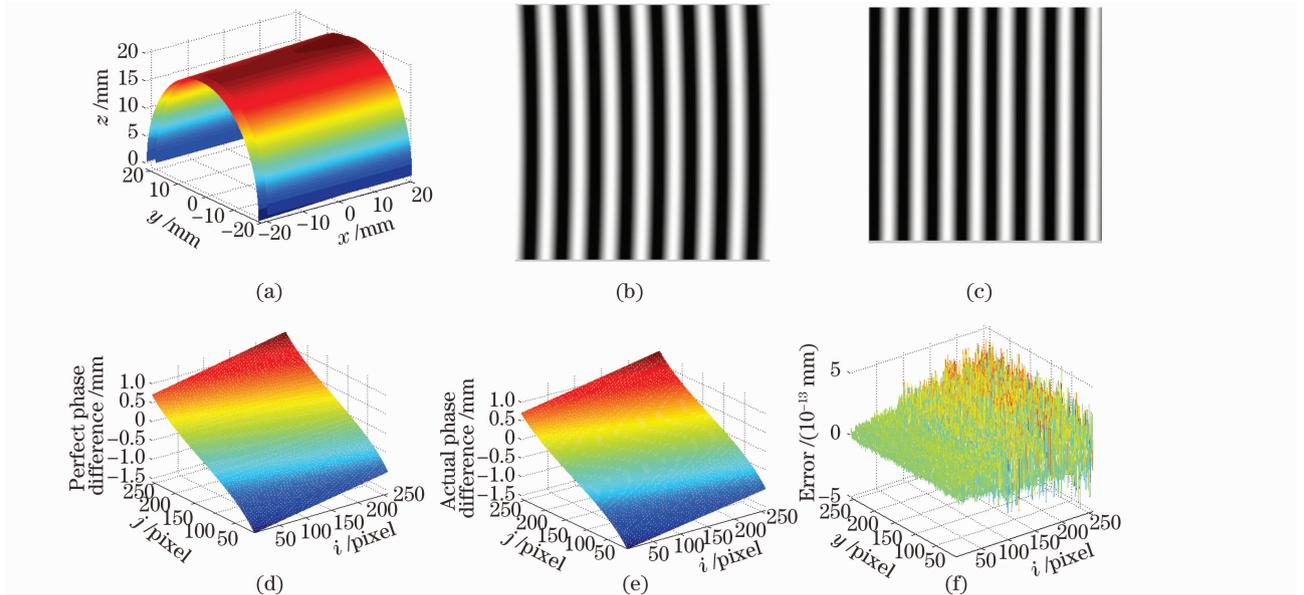


图2 计算机模拟互补条纹求解位置变形量。(a)位置变形前及变形后三维面型分布,(b)圆柱曲面的互补条纹,(c)位置变形后的物体表面所调制的互补条纹,(d)互补条纹投射求解的位置变形引起的重叠区面型差分布,(e)理论的重叠区面型差分布,(f)面型差的求解误差

Fig. 2 Computer simulation of position variation resolution using complemented fringe projection technique. (a) 3D shape distribution before and after varying position, (b) complemented fringe of cylinder surface, (c) complemented fringe pattern recorded by CCD after varying position, (d) depth difference of overlapped areal resolved by complemented fringe projection technique, (e) depth difference of overlapped areal in theory, (f) error of actual resolution

4 实验分析

为验证所提方法的有效性,开展了实验分析。直径为69.15 mm的圆柱体作为被测对象,实验测量系统结构设置如图3所示,数字投影仪DLP

(PHILIPS LC4745)作为投射光源,摄像机(DH HV1300FM)作为条纹图记录装置,PLC控制工作台旋转和移动。为了更好地研究物体位置变形带来的相位变化,实验采用同一圆柱体即默认其形状不

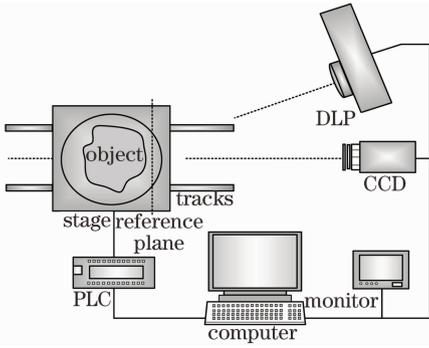


图3 测量系统结构图

Fig.3 Measurement system schematic

发生变化,但位置变动一次。

实验具体过程如下:首先,根据互补条纹投射技术由计算机生成圆柱体的8幅具有精确相移量的互

补条纹[图4(a)],相邻两幅互补条纹图的相移量为 $\pi/4$,摄像机采集移动前圆柱表面的条纹并求解出相位,图4给出了互补条纹投射测量过程,根据相位与深度转换关系获得待测物体处于实际位置时的相位。

其次,移动圆柱,再次投影互补条纹到其表面,摄像机采集并求解出此时的相位,如图4(b)所示两次相位差即为位置变形引起。将此相位差与位置变形前对应相位叠加即为位置变形后圆柱体绝对相位分布如图4(c)所示,利用(14)式将相位转换成新位置圆柱的深度分布,同时利用深度与横向坐标影射关系得到待测物体的横向坐标,位置变形后面型三维分布如图4(d)所示。参考物体与待测物体的三维形状分布如图4(e)所示。

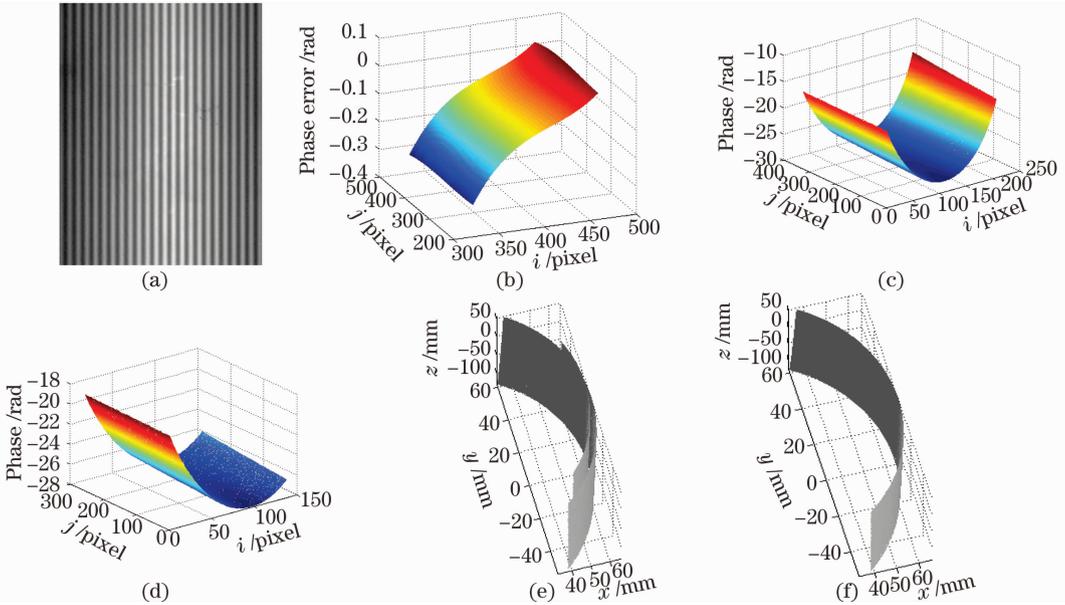


图4 互补条纹投射技术求解位置变化过程。(a) 摄像机记录的物体位置发生变化投影的互补条纹,(b) 位置变形引起的相位差分布,(c) 位置变形前物体的相位分布,(d) 加入位置变形量后的物体相位分布,(e) 面型分布(未补偿位置变形量),(f) 面型分布(补偿位置变形量)

Fig.4 Process of position variation resolution in complemented fringe projection techniques. (a) Complemented fringe projection recorded by CCD after position has been varied, (b) phase variation aroused by varied position, (c) phase distribution before position varied, (d) phase distribution after position varied, (e) 3D shape distribution (before compensating position variation), (f) 3D shape distribution (after compensating position variation)

最后,插值求解出位置变形前与变换后对应的匹配点坐标,利用(18)式迭代求解出 $\Delta x=0.0271\text{ mm}$, $\Delta y=-11.5216\text{ mm}$, $\Delta\alpha=-0.0013\text{ rad}$, $\Delta\beta=-0.0003\text{ rad}$, 4个量的计算残差为 $\Delta x'=-0.0002\text{ mm}$, $\Delta y'=-0.0007\text{ mm}$, $\Delta\alpha'=-0.0001\text{ rad}$, $\Delta\beta'=0\text{ rad}$ 。将求解出的4个位置变形量代入(19)式即可补偿待测物体实际位置与理想位置不一致引起的相位变形。如图4(f)所示,通过刚体变换待测物体与参考样品的

三维面型分布重合在一起,没有明显的错位。根据以上实验结果和分析可知,应用本文所提方法求解位置变形量是可行的,可以有效补偿位置变形引起的测量误差。

5 结 论

本文针对互补条纹投射技术中的变形检测提出了一种实现位置变形检测及其补偿的方法。该方法

1)能够精确求解出位置变形引起的互补条纹相位变形量,并通过相位深度映射关系,能够获得位置变形引起的面型变形三维坐标分布;2)使得定位成本降低,只需限制两个自由度,但能够精确补偿4个自由度的变形量;3)增强了互补条纹投射测量技术的应用范围,不完全依赖定位机构,使得该测量技术在工业生产中的在线检测具有更强的适用性。

参 考 文 献

- 1 Chen F, Brown GM, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 M. K. Kalms, W. P. Jueptner, W. Osten, Automatic adaption of projected fringe patterns using a programmable LCD-projector [C]. *SPIE*, 1997, **3100**: 156~165
- 3 Yuanyuan Cai, Xianyu Su. Inverse projected-fringe technique based on multi projectors[J]. *Opt. Laser Eng.*, 2007, **45**(10): 1028~1034
- 4 Sai Siva Gorthi, Pramod Rastogi. Fringe projection techniques; whither we are? [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2010, **39**(2): 133~140
- 5 Wansong Li, Thorsten Bothe, Wolfgang Osten *et al.*. Object adapted pattern projection-Part I: generation of inverse patterns [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2004, **41**(1): 31~50
- 6 Xiao Chao, Su Xianyu, Jing Hailong. 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
- 7 Cai Yuanyuan, Su Xianyu, Li Yong *et al.*. Inverse fringe projection technique based on the coordinate transformation using cubic interpolation[J]. *Opt-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
- 8 Hyunki Lee, Hyungsuck Cho. An active vision sensor system employing adaptive digital fringe pattern generated by SLM pattern projector[C]. *SPIE*, 2006, **63750E**: 1~12
- 9 Wenjing Zhou, Junzheng Peng, Mingyi Chen *et al.*. Object-adapted fringe projection technique on scattered data interpolation [C]. *SPIE*, 2010, **7718**: 77180E
- 10 Song Zhang, ShingTung Yau. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using digital video projector[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(1): 36~43
- 11 Hongwei Guo, Haitao He, Mingyi Chen. Least-squares calibration method for fringe projection profilometry[J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(3): 1~9
- 12 Hongwei Guo, Mingyi Chen. Multi-view connection technique for 360deg three-dimensional measurement[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(4): 900~905
- 13 He Haitao, Guo Hongwei, Yu Yingjie *et al.*. Novel connection method based on virtual cylinder for three-dimensional surface measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 978~982
- 何海涛, 郭红卫, 于瀛洁 等. 基于虚拟圆柱的曲面拼接方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 978~982