

文章编号 1004-924X(2015)增-0769-08

横向分区非均匀条纹生成算法

易 丹, 邵 猛, 范京京, 戴士杰*

(河北工业大学 机器人及自动化研究所, 天津 300130)

摘要: 由于三维测量系统中投影仪倾斜投影横向均匀条纹时会在参考平面上产生双向畸变非均匀条纹, 故本文提出了一种横向分区非均匀条纹生成方法以降低投影横向条纹测量误差。这种方法使用分区函数描述非均匀条纹像素-相位之间的关系。投影横向分区非均匀条纹时, 能够在参考平面上得到周期分布均匀的条纹, 从而改善相位展开结果中像素-相位之间的非线性关系, 提高测量精度。对高度为 50 mm 的平面进行的仿真实验表明, 投影该种非均匀条纹测量误差均值为 0.4099 mm, 均匀条纹测量误差均值为 2.5235 mm。对高度为 50 mm 的球体进行的仿真实验表明, 投影均匀条纹的测量结果对称度误差为 3.1%~9.3%, 而投影分区非均匀条纹时, 对称度误差为 0.03%~1.6%。得到的结果显示, 提出的横向分区非均匀正弦条纹能够明显提高投影横向正弦条纹的测量精度。

关键词: 三维测量; 光栅投影; 横向分区非均匀条纹; 像素-相位关系

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0769

Generation method of partitional horizontal uneven fringes

YI Dan, SHAO Meng, FAN Jing-jing, DAI Shi-jie*

(Research Institute of Robotics and Automation, Hebei University of
Technology, Tianjin 300130, China)

* Corresponding author, E-mail: dshj70@163.com

Abstract: As the oblique angle projection of horizontal even fringes on a reference plane will generate uneven fringes with bidirectional distortion, this paper proposes a method to generate horizontal partitional uneven sine fringes to reduce the measuring errors of horizontal even fringes. With the proposed method, this kind of uneven fringes' pixel-phase relationship was described by partitional function. When this kinds of fringes were projected, the even fringes with uniform distribution could be obtained on the reference plane. So the nonlinear relation between the pixel and the phase could be improved in phase unwrapping results and the measuring accuracy would be optimized. A simulation experiment on a plane with a height of 50 mm shows that the mean value of uneven fringe projection measurement error is 0.409 9 mm, and the mean value of even fringes is 2.523 5 mm. Moreover, that for a globe with a height of 50 mm shows that the symmetry error ranges from 3.1% to 9.3% for projecting even fringes, whereas that ranges from 0.03% to 1.6% for projecting uneven fringes. The measurement accuracy has be increased by horizontal partitional uneven fringes projection.

Key words: Three dimensional measurement; grating projection; partitional horizontal uneven fringe; pixel-phase relationship

收稿日期: 2015-06-02; 修订日期: 2015-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(No. U1433117); 天津市民用航空器适航与维修重点实验室开放基金资助项目

1 引 言

光栅投影三维测量技术因具有全场获取性、快速性、准确性、易实现自动测量等优点,在逆向工程、快速原型模具、医学、文物保护等方面得到了广泛应用^[1-3]。

传统的光栅投影三维测量技术通常采用倾斜投影、垂直摄像的系统模型。然而现有光栅投影系统的相机和投影仪的光轴不平行,因此在与成像光轴垂直的平面上投影均匀条纹时,得到的是非均匀条纹。针对这一问题,张宗华^[4-6]等人以虚拟平面作为桥梁,建立虚拟平面和投影仪投影面之间条纹周期的对应关系,使得被测物体深度和相位之间与像素位置无关,并将非均匀条纹应用到摄像机标定以及三维测量的四步相移法中,但这种非均匀条纹生成方法需要借助精确的移动平板求取一个必须的参数,操作过程复杂。郝煜栋^[7]等分析光栅投影三维测量中的投影条纹误差后,对投影条纹的相位采用二次方程进行近似,从而减小误差。伏燕军^[8]分析了投影纵向均匀条纹时实际相位和理想相位间的误差,并提出了一种生成纵向非均匀条纹的方法,以实现条纹周期校正。但这两种方法都只对投影仪光轴与参考平面交点到 CCD 相机一侧条纹进行了分析,之后,将结论应用到所有的条纹生成中,因此,另外一侧条纹的周期误差更大。

在现有的三维测量设备中,手持三维扫描仪可以通过手动旋转设备方向或将设备安装在机械手臂上,来改变条纹投影方向;固定式三维扫描设备通常将参考平面安装在可以精确旋转的平台上,从而改变被测物体的方向。在不具备精确旋转平台的三维测量设备中,直接投影横向均匀条纹误差分布十分明显,严重影响测量精度。此外一些投影仪标定方法也需要向标定板投影仪投影横、纵双向均匀条纹,以获得“DMD”图像^[9-10],此时对横向均匀条纹倾斜投影同样会在参考平面上得到非均匀条纹,影响标定精度。因此本文提出一种横向分区非均匀条纹生成方法,旨在降低投影横向条纹测量误差。

2 横向分区非均匀光栅条纹生成方法

三维测量系统模型如图 1 所示,投影仪倾斜投影,CCD(Charge Coupled Device)相机垂直拍摄。投影仪光心 P 和 CCD 相机光心距参考平面垂直距离均为 L ,光轴 OP 和参考平面交点 O 距投影仪光心 P 的水平距离为 d ,投影仪光轴与长为 L 的垂线间的夹角为 θ 。由经过投影仪光轴与参考平面交点并且分别平行于和垂直于投影仪光心和摄像机光心连线的两条相互垂直的直线,将参考平面划分为 4 个区域,如图 2 所示,其中 O 为投影仪光轴与参考平面交点。

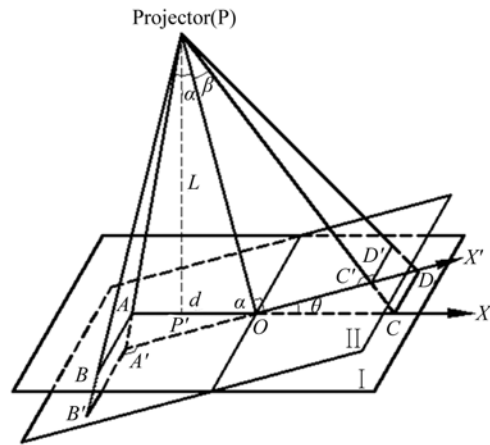


图 1 投影系统示意图
Fig. 1 Schematic of projection system

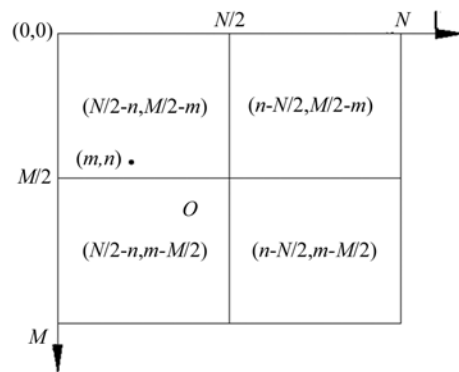


图 2 横向条纹图案像素分布划分
Fig. 2 Pixel division of horizontal fringe pattern

系统正视图如图 3 所示。X 为参考平面, X' 为过 O 点且与投影仪光轴 OP 垂直的虚拟参考平面, X'' 为投影仪投影图形平面。PA 和 PC 分别

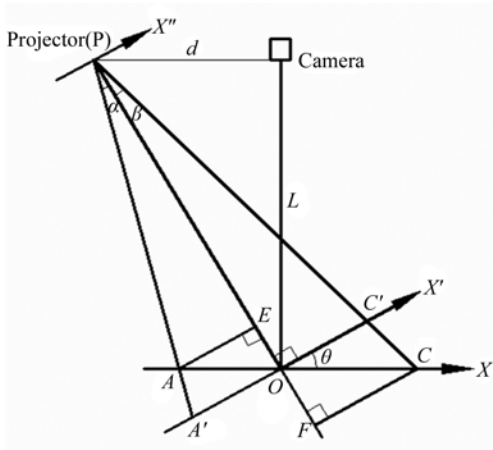


图 3 系统正视图

Fig. 3 Front elevation of projection system

为位于投影仪光轴 OP 左右两侧的任意光线, 分别交虚拟参考平面 X'' 于 A' 和 C' 点, 做 $AE \perp OP$, $CF \perp OP$. 假设 $OA = x_1$, $OA' = x'_1$, 在 $\triangle OAA'$ 中, 由正弦定理得:

$$\frac{x'_1}{x_1} = \frac{\sin(90^\circ - \theta + \alpha)}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\cos\alpha \cos\theta + \sin\alpha \sin\theta}{\cos\alpha} \quad (1)$$

$$x'_1 = \cos\theta \cdot x_1 + \tan\alpha \sin\theta \cdot x_1 = \frac{Lx_1}{OP} + \frac{dx'_1 \cdot x_1}{OP^2} \quad (2)$$

整理得:

$$x_1 = \frac{OP^2 \cdot x'_1}{L \cdot OP + d \cdot x'_1} \quad (3)$$

同理, 假设 $OB = x_2$, $OB' = x'_2$, 可以得到:

$$x_2 = \frac{OP^2 \cdot x'_2}{L \cdot OP - d \cdot x'_2} \quad (4)$$

在图 1 中, 假设某一光线 \overrightarrow{PB} 位于投影仪与参考平面交点的左下侧, 与参考平面交于点 B , 与虚拟参考平面交于点 B' , 分别做 $BA \perp OA$, $B'A' \perp OA'$.

设 $OA = x_1$, $OA' = x'_1$, $AB = y_1$, $A'B' = y'_1$. $\triangle PAB \sim \triangle PA'B'$, 因此有:

$$\frac{y_1}{y'_1} = \frac{PA}{PA'} \quad (5)$$

$\triangle PAE \sim \triangle PA'O$, 因此有:

$$\frac{y_1}{y'_1} = \frac{PA}{PA'} = \frac{AE}{A'O} = \frac{AE}{x'_1} \quad (6)$$

又因为 $\triangle AEO \sim \triangle OQP$, 因此有:

$$\frac{AE}{AO} = \frac{AE}{x_1} = \frac{L}{OP} \quad (7)$$

上述推导可得:

$$\frac{A'O}{AO} = \frac{x'_1}{x_1} = \frac{\sin(90^\circ - \theta + \alpha)}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\cos\alpha \cos\theta + \sin\alpha \sin\theta}{\cos\alpha} \quad (8)$$

由式(6)~式(8)可以推得:

$$\frac{y_1}{y'_1} = \frac{AE}{A'O} = \frac{L}{OP} \cdot \frac{x_1}{x'_1} = \frac{L \cdot OP}{L \cdot OP + dx'_1} \quad (9)$$

因此:

$$y_1 = \frac{L \cdot OP \cdot y'_1}{L \cdot OP + dx'_1} \quad (10)$$

假设在平面 I 上为横向均匀条纹, 则在平面 II 上应非均匀条纹, A 点与 A' 点有相同的相位. 那么如果 I 上相位为 $\varphi(y_1) = 2\pi y_1$, 则 II 上相位为:

$$\varphi(y_1) = \varphi(y'_1) = 2\pi f y_1 = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot y'_1}{L \cdot OP + dx'_1} \quad (11)$$

假设 G 点位于投影仪光轴与参考平面交点的左上侧, 与虚拟平面 II 的交点 G' 距 O 点的水平和垂直距离分别为 x'_2 , y'_2 , 同理, 可以得到 II 上的相位分布为:

$$\varphi(y_2) = \varphi(y'_2) = 2\pi f y_2 = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot y'_2}{L \cdot OP + dx'_2} \quad (12)$$

假设投影仪的投影图像平面为 III。平面 III 上与 B 点对应点的像素坐标为 (m, n) , 投影条纹图案大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$, M 为条纹图案纵向像素数, N 为条纹图案横向像素数. 因此可得, $x''_1 = N/2 - n$, $y''_1 = m - M/2$, 从而可以得到投影仪投影平面上相位分布与像素之间的关系为:

$$\varphi(y''_1) = \varphi(y'_1) = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot y''_1}{L \cdot OP + d \cdot x''_1} = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot (m - M/2)}{L \cdot OP + d \cdot (N/2 - n)} \quad (13)$$

同理假设平面 III 上与 G 点对应点的像素坐标为 (m, n) , 则 $x''_2 = N/2 - n$, $y''_2 = M/2 - m$,

$$\varphi(y''_2) = \varphi(y'_2) = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot y''_2}{L \cdot OP + d \cdot x''_2} = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot (M/2 - m)}{L \cdot OP + d \cdot (N/2 - n)} \quad (14)$$

假设某一光线 \overrightarrow{PD} 位于投影仪与参考平面交

点的右上侧,与参考平面交于点 D ,与虚拟参考平面交于点 D' ,分别做 $DC \perp OC, D'C' \perp OC'$ 。

设 $OC = x_3, OC' = x_3', CD = y_3, C'D' = y_3'$ 。
 $\Delta PCD \sim \Delta PC'D'$, 因此有:

$$\frac{y_3}{y_3'} = \frac{PC}{PC'} \quad (15)$$

在图中做 $CF \perp PF, \Delta PCF \sim \Delta PC'O$, 因此有:

$$\frac{y_3}{y_3'} = \frac{PC}{PC'} = \frac{CF}{C'O} = \frac{CF}{x_3'} \quad (16)$$

又因为 $\Delta CFO \sim \Delta OQP$, 因此有:

$$\frac{CF}{CO} = \frac{CF}{x_3} = \frac{L}{OP} \quad (17)$$

如上述推导中所证明:

$$\frac{C'O}{CO} = \frac{x_3'}{x_3} = \frac{\sin(90^\circ - \theta - \beta)}{\sin(90^\circ - \beta)} = \frac{\cos\beta \cos\theta - \sin\beta \sin\theta}{\cos\beta} = \cos\theta - \tan\beta \cdot \sin\theta, \quad (18)$$

其中: $\cos\theta = L/OP, \tan\beta = x'/OP$

由式(16)~(18)可以推得:

$$\frac{y_3}{y_3'} = \frac{CF}{C'O} = \frac{L}{OP} \cdot \frac{x_3}{x_3'} = \frac{L \cdot OP}{L \cdot OP - d \cdot x_3'}, \quad (19)$$

因此:

$$y_3 = \frac{L \cdot OP \cdot y_3'}{L \cdot OP - d \cdot x_3'} \quad (20)$$

假设平面 I 上为横向均匀条纹, 则平面 II 上应非均匀条纹, C 点与 C' 点有相同的相位。那

么如果 I 上相位为 $\varphi(y_3) = 2\pi y_3$, 则 II 上相位为:

$$\varphi(y_3) = \varphi(y_3') = 2\pi f y_3 = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot y_3'}{L \cdot OP - d \cdot x_3'} \quad (21)$$

假设 H 点位于投影仪光轴与参考平面交点的右下侧, 与虚拟平面 II 的交点 H' 距 O 点的水平和垂直距离分别为 x_4', y_4' , 同理, 可以得到 II 上相位分布为:

$$\varphi(y_4) = \varphi(y_4') = 2\pi f y_4 = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot y_4'}{L \cdot OP - d \cdot x_4'} \quad (22)$$

假设投影仪的投影图像平面为 III 。平面 III 上与 D 点对应点的像素坐标为 (m, n) , 投影条纹图案大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 。因此可得, $x_3'' = n - N/2, y_3'' = M/2 - m$, 从而可以得到投影仪投影平面上相位分布与像素之间的关系为:

$$\varphi(y_3'') = \varphi(y_3') = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot y_3''}{L \cdot OP - d \cdot x_3''} = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot (M/2 - m)}{L \cdot OP - d \cdot (n - N/2)} \quad (23)$$

同理假设平面 III 上与 H 点对应点的像素坐标为 (m, n) , 则 $x_4'' = n - N/2, y_4'' = m - M/2$,

$$\varphi(y_4'') = \varphi(y_4') = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot y_4''}{L \cdot OP - d \cdot x_4''} = 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot (m - M/2)}{L \cdot OP - d \cdot (n - N/2)} \quad (24)$$

从而可以得到平面 III 上相位与像素之间的关系为:

$$\varphi(m, n) = \begin{cases} 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot (M/2 - m)}{L \cdot OP + d(N/2 - n)} & (m \leq M/2, n \leq N/2) \\ 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot (m - M/2)}{L \cdot OP + d(N/2 - n)} & (m > M/2, n < N/2) \\ 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot (M/2 - m)}{L \cdot OP - d(n - N/2)} & (m < M/2, n > N/2) \\ 2\pi f \cdot \frac{L \cdot OP \cdot (m - M/2)}{L \cdot OP - d(n - N/2)} & (m > M/2, n > N/2) \end{cases} \quad (25)$$

3 横向分区非均匀光栅条纹仿真实验

采用图 1 所示的系统模型, 设定 $L = 0.6 \text{ m}, d$

$= 0.2 \text{ m}, \lambda = 20 \text{ pixel}$, 图像大小为 $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$, 使用 MATLAB R2011b 软件按照式(25)编程得到周期为 20 pixel 的横向分区均匀条纹如图 4(a)(生成 4 幅横向分区非均匀条纹所需时间约

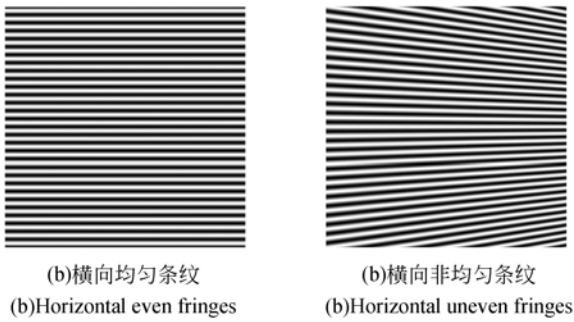


图 4 横向均匀条纹和非均匀条纹

Fig. 4 Horizontal even and uneven fringes

为 20 s), 横向非均匀条纹如图 4(b)。使用 3 ds Max2013 对测量系统进行建模仿真, 设计与参考平面距离为 50 mm 的平面及高度为 50 mm 的球体为被测物体, 分别投影横向均匀条纹和横向分区非均匀条纹进行对比实验。

3.1 平面测量对比实验

将图 4(a) 和 4(b) 分别投影到被测平面上获得的仿真结果如图 5 所示。使用 MATLAB 进行相位提取, Goldstein 法进行相位展开, 分别提取相位展开结果中像素间隔相同的某 3 行进行对比, 如图 6 所示。恢复平面三维形貌结果如图 7(a) 和 7(c) 所示, 误差值分布如图 7(b) 和 7(d) 所示。通过统计学分析分别得到了投影均匀条纹和分区非均匀条纹的平均误差和均方差如表 1 所示。

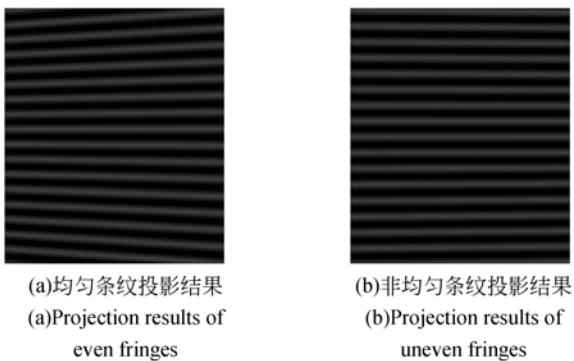
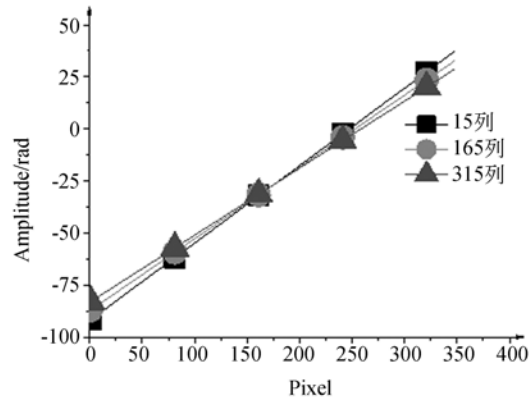


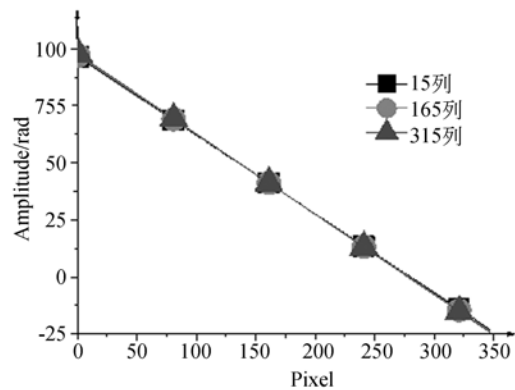
图 5 横向均匀条纹、非均匀条纹投影图

Fig. 5 Projection results of horizontal even and uneven fringes



(a) 横向均匀条纹某三列相位展开结果

(a) Unwrapping results of three columns horizontal even fringes



(b) 横向非均匀条纹某三列相位展开结果

(b) Unwrapping results of three columns horizontal uneven fringes

图 6 某三列相位展开结果对比图

Fig. 6 Comparison of unwrapping results for three columns horizontal even and uneven fringes

表 1 对比实验结果

Tab. 1 Results of opposite experiment (mm)

条纹类型	平均误差	误差均方差值
横向均匀条纹	2.523 5	1.516 0
横向分区非均匀条纹	0.409 9	0.250 7

3.2 球体测量对比实验

对高度为 50 mm 的球体进行测量, 得到测量结果如图 8 和 9 所示。取以高度最高点为中心, 距离最高点距离为 50 pixel 的 4 组点的高度如表 2 及表 3 所示, 计算其对称度误差。

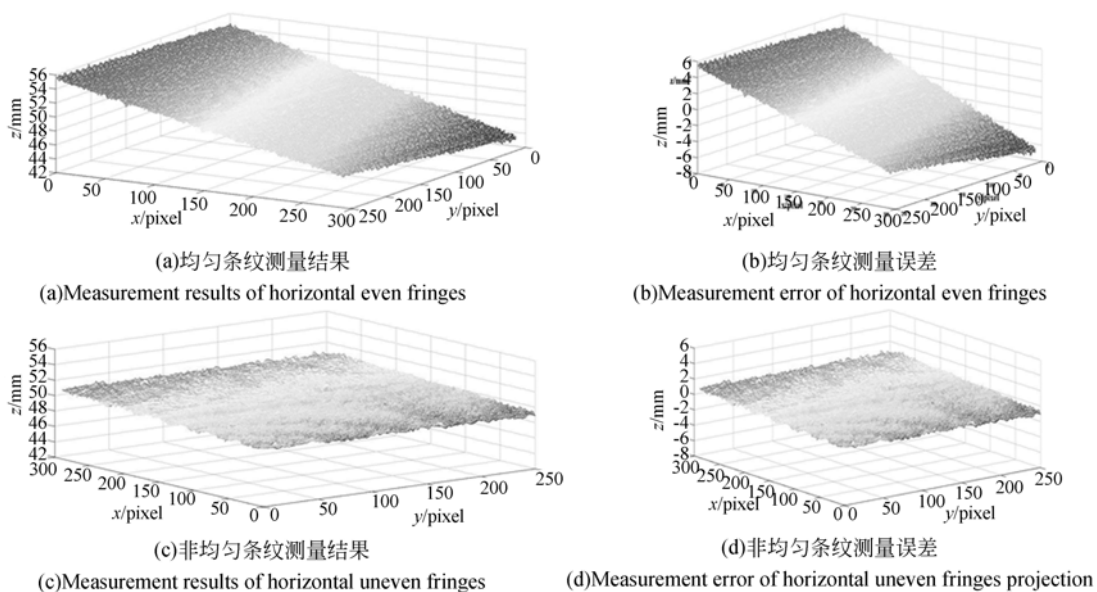


图 7 平面测量实验结果及误差

Fig. 7 Results and error of plane measurement experiment

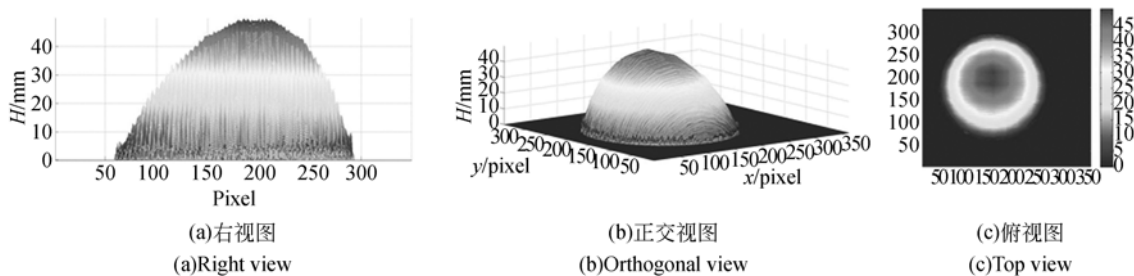


图 8 投影均匀条纹测量球体结果

Fig. 8 Measurement results of even fringes projection on sphere

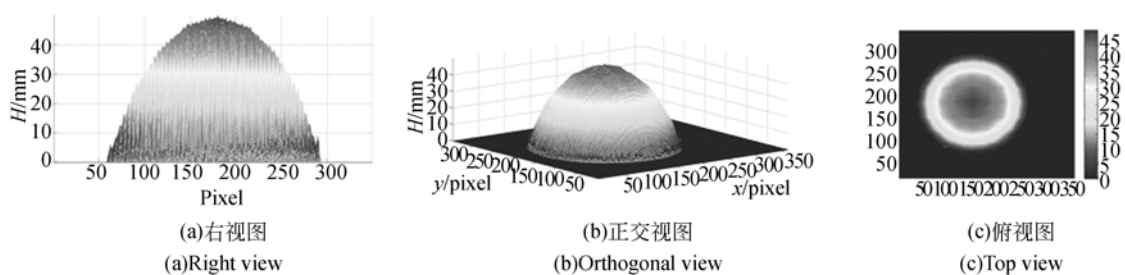


图 9 投影非均匀条纹测量球体结果

Fig. 9 Measurement results of uneven fringes projection on sphere

表 2 横向均匀条纹对称点的测量结果

Tab. 2 Results of symmetrical points of horizontal even fringes

数据	最高点	对称点 1	对称点 2	对称点 3	对称点 4
坐标值/pixel	(189,153)	(189,103)	(189,203)	(154,118)	(214,118)
高度值/mm	49.966 5	41.194 8	39.936 2	40.977 1	44.972 7
差值/mm		1.258 6	3.995 6	2.937 5	3.682 3
相对差值		3.1%	9.3%	7.1%	8.8%

表 3 横向非均匀条纹对称点的测量结果

Tab. 3 Results of symmetrical points of horizontal uneven fringes

数据	最高点	对称点 1	对称点 2	对称点 3	对称点 4				
坐标值/pixel	(180,156)	(180,106)	(180,206)	(145,121)	(215,121)	(130,156)	(230,156)	(145,191)	(215,191)
高度值/mm	49.947 4	41.468 4	41.482 8	42.029 7	41.401 7	41.906 3	41.220 6	41.798 1	41.278 4
差值/mm		0.014 4		0.628		0.685 7		0.519 7	
相对差值		0.03%		1.5%		1.6%		1.2%	

3.3 仿真实验结论

从图 5(a)可以看出,当投影横向均匀条纹时,被测平面上得到的是以水平中线为对称中心的向上下畸变的条纹图形。从图 6(a)可以看出,投影横向均匀条纹时相位展开结果中像素-相位关系呈现出以图像中间行为分界的行间差异,严重影响测量精度。从图 5(b)可以看出,投影横向非均匀条纹时,被测平面上条纹分布的非均匀性得到明显改善,从图 6(b)可以看出,投影横向非均匀条纹时,像素-相位关系的行间差异得到明显改善。从图 7(a)可以看出,投影横向均匀条纹测量平面时,得到的测量结果呈现出双向扭曲畸变的规律,从图 7(b)可以看出,测得的平面结果误差与横、纵坐标之间都呈现出非线性关系。从图 7(c)和 7(d)可以看出,投影横向分区非均匀条纹时,平面扭曲程度得到非常大的改善,误差也明显减小。

从对球体的仿真实验结果图 8 和 9 可以看出,投影均匀条纹测量球体时,球体形状发生严重畸变,因此可以推断在测量复杂物体时会造成更大的误差。从表 1 和表 3 中可以得出,投影分区非均匀条纹测量平面的平均误差为 0.409 9 mm,

均方差为 0.250 7 mm,测量球体的对称度误差范围为 0.03%~1.6%;从表 1 和表 2 可以看出,投影均匀条纹测量平面的平均误差为 2.523 5 mm,均方差为 1.516 0 mm,测量球体的对称度误差范围为 3.1%~9.3%。因此,利用横向分区非均匀条纹生成算法生成的横向非均匀条纹能够明显提高投影横向正弦条纹时的测量精度。

4 结 论

本文分析了投影横向正弦条纹时,参考平面上相位分布与横纵双向像素之间呈现出的分区函数关系。提出了横向分区非均匀条纹生成算法,使得投影条纹的像素-相位间满足分区非线性关系,改善投影结果的非均匀性。对平面进行仿真实验证明,投影该种非均匀条纹测量误差均值为 0.409 9 mm,均匀条纹测量误差均值为 2.523 5 mm。对高度为 50 mm 的球体进行的仿真实验证明,投影均匀条纹的测量结果对称度误差为 3.1%~9.3%,而投影分区非均匀条纹时,对称度误差为 0.03%~1.6%。因此,横向分区非均匀正弦条纹能够明显提高投影横向正弦条纹的测量精度。

参考文献:

- [1] 叶海加,陈昱,邢渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 71-75.
YE H J, CHEN G, XING Y. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 71-75. (in Chinese)
- [2] 戴美玲,杨福俊,何小元. 基于双频彩色光栅投影测量不连续物体三维形貌[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 7-12.
- [3] 许丽,张之江. 结构光测量系统的误差传递分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 306-313.
XU L, ZHANG ZH J. Error propagation analysis of structured light system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 306-313. (in Chinese)
- [4] ZHANG Z, MA H, ZHANG S, et al.. Simple calibration of a phase-based 3D imaging system based on uneven fringe projection [J]. *Optics Letters*,

DAI M L, YANG F J, HE X Y. Three-dimensional shape measurement of objects with discontinuities by dual-frequency color fringe projection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 7-12. (in Chinese)

- 2011, 36(5): 627-629.
- [5] ZHANG Z, TOWERS C E, TOWERS D P. Uneven fringe projection for efficient calibration in high-resolution 3D shape metrology [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(24): 6113-6119.
- [6] ZHANG Z. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8): 1097-1106.
- [7] 郝煜栋, 赵洋, 李达成. 光栅投影式轮廓测量中两种误差的分析[J]. *光学学报*, 2000, 20(3): 376-379.
- HAO Y D, ZHAO Y, LI D CH. Analysis of two-error in grating projection profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(3): 376-379. (in Chinese)
- [8] FU Y, LUO Q. Fringe projection profilometry based on a novel phase shift method[J]. *Optics Express*, 2011, 22(19): 21739-21747.
- [9] HUANG S, XIE L, WANG Z, *et al.*. Accurate projector calibration method by using an optical coaxial camera[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 789-795.
- [10] 李中伟, 史玉升, 钟凯, 等. 结构光测量技术中的投影仪标定算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3061-3065.
- LI ZH W, SHI Y SH, ZHONG K, *et al.*. Projector calibration algorithm for the structured light measurement technique [J]. *Applied Optics*, 2009, 29(11): 3061-3065. (in Chinese)

作者简介:



戴士杰(1970—),男,河北保定人,博士,教授,博士生导师,1994年、1999年于河北工业大学分别获得学士、硕士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事机器人学和视觉等方面的研究。E-mail: dshj70@163.com