

分段非均匀条纹生成方法及其在双频解相位中的应用

戴士杰^{1,2}, 易丹¹, 李伟超¹, 常淑英³, 王志平²

- (1. 河北工业大学 机器人及自动化研究所, 天津 300130;
2. 中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300;
3. 天津电子信息职业技术学院 机电技术系, 天津 300350)

摘要: 提出了一种描述图像像素和相位关系的分段函数, 可以生成分段非均匀条纹, 解决光栅测量系统倾斜投影时参考平面上条纹周期不均匀的问题。在利用双频解相位方法进行相位展开时, 提出了一种条纹移动法, 即将一种频率的条纹向右或向左移动 π 的整数倍, 消除了投影双频分段非均匀条纹时得到相位展开结果的不连续性。对比其他非均匀条纹生成方法, 分段非均匀条纹生成方法简单易行; 双频分段非均匀条纹经过条纹移动后能够适用于双频解相位。对拱桥投影均匀条纹和分段非均匀条纹进行对比实验证明, 投影分段非均匀条纹时测量精度得到了明显提高。

关键词: 光学测量; 光栅投影; 分段非均匀条纹; 双频解相位

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2849-05

Generation method of piecewise-uneven fringes and its applications in two-frequency phase unwrapping

Dai Shijie^{1,2}, Yi Dan¹, Li Weichao¹, Chang Shuying³, Wang Zhiping²

- (1. Research Institute of Robotics and Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
2. Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3. Department of Mechatronics, Tianjin Electronic Information College, Tianjin 300350, China)

Abstract: A novel method of generating piecewise-uneven fringes was proposed in order to get even fringes on the reference plane in oblique projection grating measuring system. The relationship between image pixels and phase was described by a piecewise function. To apply the fringes in double-frequency unwrapping, the method was further improved. Continuous unwrapping image series were obtained by left/right phase shifting which is a multiple of π . Double-frequency piecewise-uneven fringes method can be used for double-frequency unwrapping. The applications in piecewise-uneven fringes generation shows simplicity and good performance than conventional solutions. Contrast tests on arch profilometry were taken herein. The results indicate that the measurement precision of piecewise-uneven fringes can get effectively improved compared with the method of even fringes.

Key words: optical measurement; grating projection; piecewise-uneven fringes; two-frequency unwrapping

收稿日期: 2015-01-11; 修订日期: 2015-02-20

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(U1433117); 河北省自然科学基金(F2012202041);
中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室开放基金

作者简介: 戴士杰(1970-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事机器人学和视觉等方面的研究。Email: dshj70@163.com

通讯作者: 易丹(1990-), 女, 硕士生, 主要从事三维测量方面的研究。Email: yidanninhao@163.com

0 引言

激光三角法是光电检测技术的一种。光栅投影测量法以激光三角法为基础,因其具有全场获取性、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的应用^[1-8]。在传统的光栅投影三维测量技术中,通常采用倾斜投影、垂直摄像的系统模型。现有的光栅投影系统由于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^[5]。张宗华等人^[6-7]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的关系与像素位置无关,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移动的平板求取一个必须的参数,操作过程复杂。郝煜栋等^[9]分析了光栅投影三维测量中的投影条纹误差,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^[10]分析了投影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向 CCD 相机一侧条纹进行了分析,并将结论应用到了所有的条纹生成中,使得另外一侧条纹的周期误差更大。

为了提高解相位的速度和精度,有学者^[4,11-12]提出了时域相位展开方法,如双频、多频条纹投影法和复合条纹投影法。通过投影多幅不同周期的条纹图,使得解相位过程所需的时间减少,但是在使用投影仪倾斜投影系统时不可避免地会引入由于周期渐变现象而带来的误差。

文中基于以上研究,提出了分段非均匀条纹生成方法,提高了三维测量的精度,并推广到了双频解相位中,缩短了三维测量解相位过程所需的时间。

1 均匀条纹投影的误差分析

相交轴测量系统模型如图 1 所示,要求投影仪光轴和相机光轴共面,夹角为 θ ,并相交于参考平面上的 O 点,相机光轴垂直于参考平面 X 。图中 X' 为虚拟参考平面,经过 O 点并且与投影仪光轴垂直,

X'' 为投影仪投影图像平面。当投影仪投影均匀条纹时,在参考平面上会得到如图 2 所示的周期逐渐变大的非均匀条纹 ($L=0.6\text{ m}, d=0.2\text{ m}, \lambda=40\text{ pixel}$),这种周期渐变现象会对测量精度造成影响。此时,参考平面实际相位分布可以通过如下分析得到。

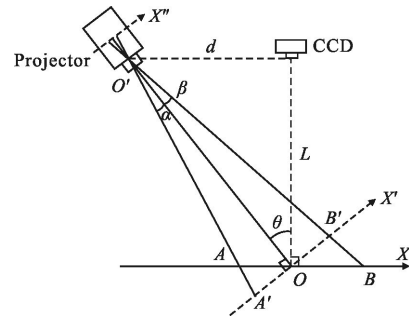


图 1 相交轴投影测量系统模型

Fig.1 Model of axis intersecting projecting measurement system



图 2 投影均匀条纹时参考平面上条纹分布

Fig.2 Result of projecting even fringes on reference plat

假设 $OA=x_1, OA'=x_1'$, 在 $\triangle AOO'$ 中由正弦定理可得:

$$\frac{AO'}{\sin(90^\circ-\theta)} = \frac{x_1}{\sin\alpha} \quad (1)$$

所以

$$AA' = A'O' - AO' = \frac{x_1' - x_1 \cos\theta}{\sin\alpha} \quad (2)$$

在 $\triangle AOA'$ 中,根据正弦定理可得:

$$\frac{AA'}{\sin\angle AOA'} = \frac{x_1'}{\sin\angle OAA'} \quad (3)$$

式中: $\angle AOA' = \theta, \angle OAA' = 90^\circ - \theta + \alpha$ 。因此公式(3)可以写为:

$$x_1' = x_1 \cos\theta + x_1 \tan\alpha \cdot \sin\theta \quad (4)$$

式中: $\tan\theta = d/L, \tan\alpha = x_1'/OO'$ 。因此公式(4)可以写为:

$$x_1' = \frac{Lx_1 \cdot OO'}{OO'^2 - d \cdot x_1} \quad (5)$$

对于 OB 区间可以假设 $OB=x_2, OB'=x_2'$, 同理可得:

$$x_2' = \frac{Lx_2 \cdot OO'}{OO'^2 + d \cdot x_2} \quad (6)$$

由于 X' 和 X'' 平面平行,所以当投影均匀条纹时,在 X' 平面上得到的是均匀条纹。已知 $\phi(x_1') = 2\pi f x_1', \phi(x_2') = 2\pi f x_2', f$ 为 X' 平面上条纹的频率, A 和 B 点分

别与 A' 和 B' 点有相同的相位, 所以:

$$\phi(x_1) = \phi(x_1') = \frac{2\pi f \cdot Lx_1 \cdot OO'}{OO'^2 - d \cdot x_1} \quad (7)$$

$$\phi(x_2) = \phi(x_2') = \frac{2\pi f \cdot Lx_2 \cdot OO'}{OO'^2 + d \cdot x_2} \quad (8)$$

D 为参考平面上投影图案横向宽度, x 表示 X 平面上任意一点距离参考平面上投影图案最左侧的水平距离。在 OA 方向一侧 $x_1 = D/2 - x$, 在 OB 方向一侧, $x_2 = x - D/2$ 。投影均匀条纹时, 参考平面上实际相位分布可以表示为:

$$\Phi(x) = \begin{cases} \frac{2\pi f \cdot L \left(\frac{D}{2} - x\right) \cdot OO'}{OO'^2 - d \left(\frac{D}{2} - x\right)} & x \in \left[0, \frac{D}{2}\right] \\ \frac{2\pi f \cdot L \left(x - \frac{D}{2}\right) \cdot OO'}{OO'^2 + d \left(x - \frac{D}{2}\right)} & x \in \left[\frac{D}{2}, D\right] \end{cases} \quad (9)$$

由公式(9)可以看出, 当投影均匀条纹时, 实际条纹周期呈现出在 D/2 处没有误差, 在 OA 方向比理想周期小, 在 OB 方向上比理想周期大的规律。针对这一规律, 提出了下述分段非均匀条纹生成方法。

2 分段非均匀条纹生成原理

假设 $OA = x_1, OA' = x_1'$, 在 $\Delta OAA'$ 中, 由正弦定理得:

$$\frac{x_1'}{x_1} = \frac{\sin(90^\circ - \theta + \alpha)}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\cos\alpha\cos\theta + \sin\alpha\sin\theta}{\cos\alpha} \quad (10)$$

$$x_1' = \cos\theta \cdot x_1 + \tan\alpha\sin\theta \cdot x_1 = \frac{Lx_1}{OO'} + \frac{dx_1'}{OO'^2} \quad (11)$$

整理得:

$$x_1 = \frac{OO'^2 \cdot x_1'}{L \cdot OO' + d \cdot x_1'} \quad (12)$$

同理, 假设 $OB = x_2, OB' = x_2'$, 可以得到:

$$x_2 = \frac{OO'^2 \cdot x_2'}{L \cdot OO' - d \cdot x_2'} \quad (13)$$

假设平面 X 上为均匀条纹, 则平面 X' 上应为非均匀条纹, A 和 B 点分别与 A' 和 B' 点有相同的相位。那么如果 X 上相位为 $\phi(x_1) = 2\pi fx_1$ 和 $\phi(x_2) = 2\pi fx_2$, 则 X' 上相位为:

$$\phi(x_1') = \phi(x_1) = 2\pi fx_1 = 2\pi f \cdot \frac{OO'^2 \cdot x_1'}{L \cdot OO' + dx_1'} \quad (14)$$

$$\phi(x_2') = \phi(x_2) = 2\pi fx_2 = 2\pi f \cdot \frac{OO'^2 \cdot x_2'}{L \cdot OO' - dx_2'} \quad (15)$$

式中: $OO'^2 = L^2 + d^2$ 。假设与 X' 平面上某点对应的 X''

上的点的水平方向像素坐标为 x'' , M 为条纹图案横向像素数, $x_1'' = M/2 - x'', x_2'' = x'' - M/2$, 可以得到投影仪投影平面 X'' 上相位分布与像素之间的关系:

$$\Phi(x'') = \begin{cases} \frac{2\pi f \cdot OO'^2 \cdot \left(\frac{M}{2} - x''\right)}{L \cdot OO' + d \left(\frac{M}{2} - x''\right)} & x'' \in \left[1, \frac{M}{2}\right] \\ \frac{2\pi f \cdot OO'^2 \cdot \left(x'' - \frac{M}{2}\right)}{L \cdot OO' - d \left(x'' - \frac{M}{2}\right)} & x'' \in \left[\frac{M}{2}, M\right] \end{cases} \quad (16)$$

将公式(16)简记为:

$$\Phi(x'') = 2\pi f \cdot F(L, d, M, x'') \quad (17)$$

式中: $F(L, d, M, x'')$ 是关于 L, d, x'' 和 M 的分段函数, 因此将该非均匀条纹生成方法称之为非均匀条纹分段生成方法。L 和 d 通过系统标定获得, M 值在测量前设定。在使用 N 步相移法投影 N 幅相位差为 $\frac{2\pi}{N}$ rad 的频率为 f 的条纹图案时, 相位分布可分别表示为:

$$\Phi(x'') = 2\pi f \cdot F(L, d, M, x'') + \frac{2\pi}{N} \cdot i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (18)$$

3 基于双频解相位的分段非均匀条纹生成方法

当图像大小为 600×600 pixel 时, 根据双频相位展开方法投影条纹的频差要求, 选定两条纹的周期分别为 $\lambda_1 = 40$ pixel, $\lambda_2 = 42$ pixel。按照公式(18)的规律先后生成两种频率各四幅非均匀条纹图案, 经过投影仪投影、CCD 相机拍摄, 使用四步相移法相位提取, 结果如图 3(a)和 3(b)所示, 使用双频解相位方法解相位后的结果如图 3(c)所示。相位展开结果不连续是由于在使用分段非均匀条纹生成方法时, 两种频率的四幅图像在 M/2 处的相位是对应相等的, 相位提取后 M/2 处的截断相位相等。双频解相位原理如图 3(e)所示, 两种频率条纹相位提取后灰度相等的位置是相位展开后灰度为零的位置, 使得相位展开结果不连续。为了避免这种现象的产生, 在编程时对其中一种频率条纹图案进行移动, 即将条纹图案向左或者向右移动, 条纹移动法像素与灰度之间的关系可以表示为公式(19)或(20)。通过对双频分段非均匀条纹进行级数移动, 可以得到连续的相位展开结果, 如图 3(d)所示。

$$\begin{cases} H_1(x'')=\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda_1}\cdot F(L,d,M,x'')+\frac{2\pi}{N}\cdot i\pm K\pi\right] \\ H_2(x'')=\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda_2}\cdot F(L,d,M,x'')+\frac{2\pi}{N}\cdot i\right] \end{cases} \quad (19)$$

或

$$\begin{cases} H_1(x'')=\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda_1}\cdot F(L,d,M,x'')+\frac{2\pi}{N}\cdot i\right] \\ H_2(x'')=\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda_2}\cdot F(L,d,M,x'')+\frac{2\pi}{N}\cdot i\pm K\pi\right] \end{cases} \quad (20)$$

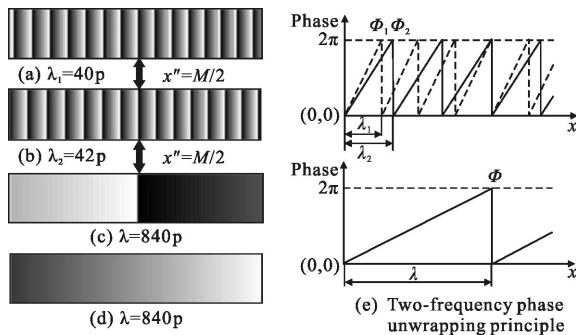


图 3 双频分段非均匀条纹相位展开结果

Fig.3 Unwrapping results of double-frequency piecewise-uneven fringes

4 仿真实验及分析

采用图1所示的系统模型,设定 $L=0.6\text{ m}$, $d=0.2\text{ m}$, $\lambda_1=40\text{ pixel}$, $\lambda_2=42\text{ pixel}$ 图像大小为 $600\times 600\text{ pixel}$ 。使用 MATLAB R2011b 软件按照公式(19)的方法得到周期为 40 pixel 分段非均匀条纹如图4(a)所示,按参考文献[10]的方法得到周期校正方法非均匀条纹如图4(b)所示,按传统方法得到均匀条纹如图4(c)所示。其中,均匀条纹图案条纹级数为15级,分段非均匀条纹约为15级,周期校正方法非均匀条纹约为20.8级。尽管倾斜投影会造成条纹周期及条纹级数的变化,但是由于投影均匀条纹时, OA 方向条纹实际周期比理想周期小, OB 方向条纹周期比理想周期大,所以条纹级数误差不会达到5.8级,进一步证明了将 OB 段条纹相位规律应用于整幅条纹这一理论的错误性。在对比试验中将不再对参考文献[10]的方法进行讨论。

使用 3ds Max2013 对测量系统进行建模仿真,将图4(a)和4(c)分别投影到参考平面上获得的仿真结果如图5(a)和5(b)所示。使用 MATLAB 进行相位提取、双频相位展开,得到参考平面相位展开结果如

图6(a)和6(b)所示,第200行相位展开结果如图6(c)所示,其中实心三角形为分段非均匀条纹相位展开结果,空心五角星为均匀条纹相位展开结果。

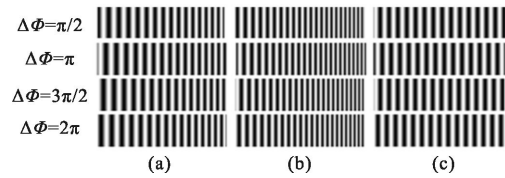


图 4 周期为 40 像素的三种条纹

Fig.4 Three kinds of fringes with cycle of 40 pixels

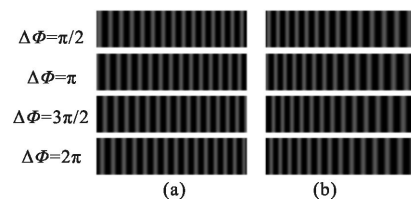


图 5 条纹投影结果

Fig.5 Results of fringes projection

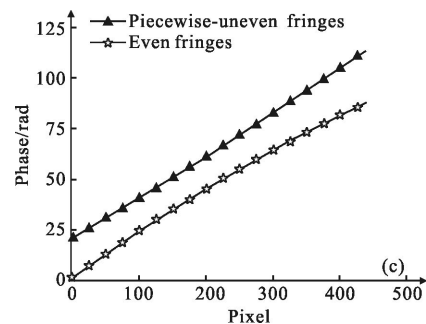
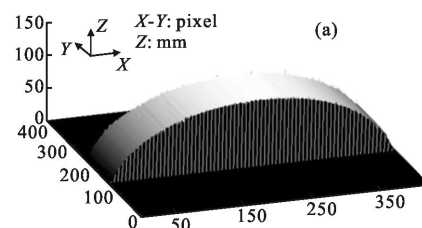


图 6 相位展开结果

Fig.6 Results of phase-unwrapping

在参考平面上放置最高高度为 100 mm 的突出拱桥,以分段非均匀条纹和均匀条纹进行投影测量,得到三维测量结果分别如图7(a)和7(b)所示,第200行像素处的高度拟合结果如图7(c)所示,其中实心三角形为投影分段非均匀条纹测量结果,空心五角星



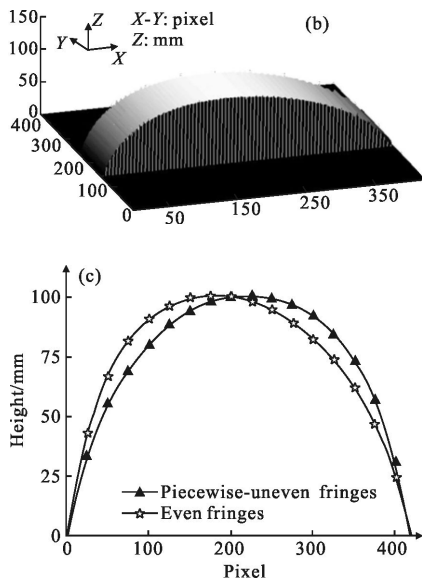


图 7 拱桥模拟测量结果

Fig.7 Simulation results of arch measurement

为投影均匀条纹测量结果。图 7(a)和 7(b)中第 200 行的高度最大值及关于最高点对称的三组点的像素坐标、高度、高度差值及相对差值的测量和计算结果分别如表 1 和表 2 所示。

由图 4 及图 5 可以看出,投影均匀条纹时,会使得参考平面上条纹周期随着远离投影仪的方向逐渐变大,而使用非均匀条纹分段生成方法生成周期逐渐变小的非均匀条纹,在参考平面上投影得到均匀条纹。由图 6(c)可以看出,投影均匀条纹时,参考平面上像素与相位之间呈现出的非线性关系在投影分段非均匀条纹时得到了非常大的改善,使得三维测量过程中相位展开误差减小。通过对拱桥的进一步仿真实验结果 7(a)和 7(b)看出,使用均匀条纹投影时,恢复出的拱桥形状向左侧倾斜,这是由于参考平面上的条纹及经过被测物体调制后的条纹在靠近投影仪一侧周期较小,靠近相机一侧周期较大。由图 7(c)看出,使用分段非均匀条纹投影时,拱桥向投影仪一侧倾斜的现象得以改善。以拱桥测量实验第 200 行像素高度值中的最大值所在像素位置为中心线,分别找到三组对称点像素位置的高度值从而分析拱桥测量结果的对称性。两组测量结果 X 方向总像素数都为 420 pixel,均匀条纹测量结果最大值出现在 179 pixel 处,分段非均匀条纹测量结果最大值出现在 219 pixel 处,分段非均匀条纹测量结果更接

近理论最大值坐标 210 pixel。通过表 1 和表 2 可以看出,分段非均匀条纹测量结果对称度更好,由于条纹周期变化而造成的相位展开和测量误差大大减小,测量精度得到显著提高。

表 1 分段非均匀条纹测量结果对称性

Tab.1 Result's symmetry of piecewise-uneven fringes

Data	Symmetrical points 1	Symmetrical points 2	Symmetrical points 3	Highest point
Coordinate /pixel	80	100	119	219
Height /mm	70.8	79.6	86.4	100.4
Difference /mm	1.6	0.5	-0.2	
Relative difference	2.31%	0.63%	-0.23%	

表 2 均匀条纹测量结果对称性

Tab.2 Result's symmetry of even fringes

Data	Symmetrical points 1	Symmetrical points 2	Symmetrical points 3	Highest point
Coordinate /pixel	40	60	79	179
Height /mm	57.6	60.6	70.3	100.4
Difference /mm	-19.1	-32	-26	
Relative difference	-24.90%	-34.56%	-27.00%	

5 结论

针对相交轴投影三维测量系统倾斜投影均匀条纹时,在参考平面上得到周期渐变条纹导致相位展开结果呈现非线性的问题,提出了一种分段非均匀条纹生成方法。实验证明,投影分段非均匀条纹能够在参考平面上得到均匀条纹,使得相位展开结果呈线性分布,测量精度得到明显提高。分段非均匀条纹生成方法具有操作简便,应用范围广,测量精度高等优点,可以普遍适用于倾斜投影的相交轴三维测量系统中。

(下转第 2857 页)