

## 用于非均匀条纹的二值时空编码相位展开方法

冀红彬<sup>1</sup>, 张慧博<sup>1</sup>, 戴士杰<sup>1,2</sup>, 王志平<sup>2</sup>

- (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)

**摘要:**为解除现有非均匀条纹解相位方法对系统测量精度的限制,提出一种非均匀条纹的二值时空编码解相位方法。由标准非均匀条纹的截断相位反求截断相位分界线,对分界线进行二值编码与解码。采用四步相移法,只需三幅辅助编码图像即可准确获得非均匀条纹的绝对连续相位。建立非完全约束系统,利用二次多项式拟合绝对相位与物体深度关系,通过仿真实验与现有方法比较,拱桥形物体各对称点高度差值的均值和均方差分别降低了 65% 和 51%;长方体测量误差的均值和均方差分别降低了 95% 和 90%;同时,利用该方法对实际长方形物体表面进行测量,与三坐标测量仪的测量结果比较,平均误差仅为 0.64%。实验结果表明:所述方法可提高非均匀条纹相位展开质量,在减少投影图像幅数的情况下,提高测量精度。

**关键词:** 光学三维测量; 非均匀条纹相位展开; 二值时空编码; 非完全约束系统

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0417004

## Binary spatiotemporal encoded method used for uneven fringes phase unwrapping

Ji Hongbin<sup>1</sup>, Zhang Huibo<sup>1</sup>, Dai Shijie<sup>1,2</sup>, Wang Zhiping<sup>2</sup>

- (1. Research Institute of Robotics and Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;  
2. Tianjin Key Laboratory for Civil Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** A binary spatiotemporal encoded method for uneven fringes phase unwrapping was proposed to remove the limitation of the existing non-uniform striped phase unwrapping method. From the standard non-uniform stripes cut off the phase reverse to cut off the phase line, the boundary line for binary coding and decoding. By using four step phase shifting method, the absolute phase of deformed uneven fringes can be obtained with three pieces of aided coding patterns. The nonholonomic system was established, and the relationship between the absolute phase and the depth of the object was fitted by quadratic polynomial. Compared with existing methods in simulation environment, the improved amount of average and standard deviation of all symmetric points height difference of arch object are 65% and 51% respectively. The improved amount of average and standard deviation for arch cuboid are 95% and

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-10

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); 中国民航科技重大专项(MHRD20130104); 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: 冀红彬(1992-), 男, 硕士生, 主要从事三维测量方面的研究。Email: jihongbin92@163.com

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

90% respectively. At the same time, the method is used to measure the surface of the rectangular object, which average error is only 0.64%, compared with the measurement results of the Coordinate Measuring Machine(CMM). The experimental results show that the method can improve the quality of uneven fringes phase unwrapping, and improve the measurement accuracy under the condition that the number of aided coding pattern is not increase.

**Key words:** optical 3D measurement; phase unwrapping of uneven fringes; binary spatiotemporal encoded; nonholonomic constraint system

## 0 引言

相移法面结构光三维测量技术具有非接触性测量、速度快、精度高等优点,在逆向工程、文物保护、医学等领域得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。在传统的结构光三维测量系统中,通常采用倾斜投影、垂直拍摄的系统模型。由于投影仪的倾斜投影,使得投影的均匀条纹在参考平面上发生变形,变成非均匀条纹,给测量结果引入非线性误差,在测量过程中需要将得到的截断相位展开成连续相位,并且,相位展开精度将直接影响最终的测量精度。在均匀条纹相位展开方法方面,有许多学者做了深入的研究,达飞鹏等人<sup>[6]</sup>将一幅辅助编码余弦条纹图像与四幅相移余弦条纹图像相减,综合相减结果,得到一幅错位编码条纹图像,利用错位编码条纹图像进行解码,可以得到条纹的绝对相位,但是该方法的解码算法复杂,并且,需要利用错位条纹的灰度进行解码,相位展开精度很难保证。林海新等人<sup>[7]</sup>对均匀条纹的条纹截断相位分界线进行二进制编码,解码得到各条纹的级次,进而得到条纹的绝对相位。由于二进制编码黑白条纹对各种噪声具有很强的抗干扰性,所以获得解包裹相位精度较高,另外该方法只需三幅辅助条纹图像,即可获得均匀条纹的连续绝对相位,与格雷编码方法相比,获得相同编码组合数所需的辅助条纹图像数目减少了一半。在保证测量精度的情况下,缩短了测量时间,但是二值编码方法在解码时普遍存在辅助条纹二值化阈值选取可靠性差的问题。目前针对非均匀条纹相位展开算法的研究较少,易丹等人<sup>[8]</sup>在深入分析由于投影均匀条纹导致的条纹变形误差后,得到一种分段非均匀生成方法,在均匀条纹双频解相位<sup>[9]</sup>的基础上,研究了非均匀条纹的双频相位展开方法,有效的减小了由于倾斜投影均匀条纹引入

的非线性误差,但是,为简化展开算法,双频相位展开方法要求两种频率条纹的一个叠栅周期能够包括整个投影图像的像素,这使得条纹的周期不能太小,降低了测量系统对细节的测量精度。有许多学者在双频相位展开法中频率的选择方面、新的展开原理方面做了大量的研究<sup>[10-11]</sup>。另外非均匀条纹截断相位分界线的分布没有规律,使得针对非均匀条纹截断相位分界线的二值编码变得非常困难。

根据上述研究及存在的问题,提出一种非均匀条纹分界线的提取方法,将均匀条纹截断相位分界线二值时空编码相位展开方法引入到非均匀条纹相位展开中,可提高非均匀条纹相位展开的质量,采用局部亮度增强的方法,使捕获编码图像的整体亮度对比度增强,在非完全约束的测量系统中,利用多项式拟合法得到绝对相位与物体深度的映射关系,缩短测量时间的同时,提高了测量精度。

## 1 相移测量法原理

传统相移测量方法通过向参考平面和待测物投影具有一定相移量的均匀余弦条纹,利用相机、投影仪与待测物三者对应点之间的三角关系,以及携带高度信息的条纹变形量求取物体的三维数据。测量系统模型如图 1 所示,该模型对系统各部件的安装位置有严格

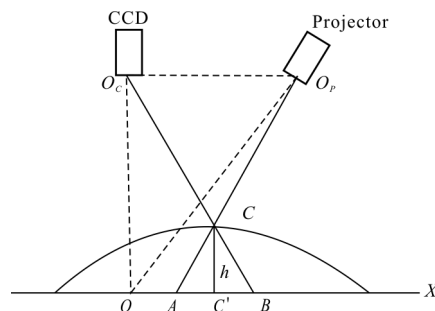


图 1 传统相移法测量系统模型

Fig.1 Model of traditional phase-shifting method measurement system

的约束,要求相机光心  $O_C$  和投影仪光心  $O_P$  的连线平行于参考平面  $X$ ,  $O_C$  与  $O_P$  的连线在参考平面  $X$  上相交于一点  $O$ ,这增加了系统安装的难度,并且系统的测量精度依赖于系统的安装精度,使得系统的安装误差被扩散,测量精度难以保证。

实际测量中,变形量  $\overline{AB}$  通常由  $A$ 、 $B$  两点处连续相位的差值  $\Delta\Phi$  表示。利用三角形相似原理及余弦定理可以推导出待测物高度  $h$  与相位差  $\Delta\Phi$  具有如下关系:

$$h = \frac{\overline{O_C O} * \Delta\Phi}{\Delta\Phi + \frac{2\pi * O_C O_P}{P}} \quad (1)$$

式中:  $P$  为条纹节距。

传统四步相移法通过向被测物投影四幅具有  $\pi/2$  初始相移量的均匀余弦条纹进行测量,条纹表达式为:

$$\begin{cases} I_0 = A(m,n) + B(m,n)\cos[\varphi(m,n)] \\ I_1 = A(m,n) + B(m,n)\cos[\varphi(m,n) + \pi/2] \\ I_2 = A(m,n) + B(m,n)\cos[\varphi(m,n) + \pi] \\ I_3 = A(m,n) + B(m,n)\cos[\varphi(m,n) + 3\pi/2] \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $A(m,n)$ 、 $B(m,n)$  均为预先设定的值,  $A(m,n)$  为背景光强,  $B(m,n)$  为条纹的调制幅度;  $\varphi(m,n)$  为像素坐标为  $(m,n)$  处均匀条纹图像的初始相位。

$$\varphi(m,n) = 2\pi m/P \quad (3)$$

式中:  $m$  表示条纹图像的横向像素坐标;  $P$  表示投影平面内的条纹节距。

假设投影后被捕获到的条纹图像可用下式表示:

$$\begin{cases} I_0' = A'(m,n) + B'(m,n)\cos[\varphi(m,n)] \\ I_1' = A'(m,n) + B'(m,n)\cos[\varphi(m,n) + \pi/2] \\ I_2' = A'(m,n) + B'(m,n)\cos[\varphi(m,n) + \pi] \\ I_3' = A'(m,n) + B'(m,n)\cos[\varphi(m,n) + 3\pi/2] \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $A'(m,n)$  为捕获条纹图像背景光强;  $B'(m,n)$  为捕获条纹图像调制度;  $\varphi(m,n)$  为被待测物高度调制过得相位值。将公式(4)代入公式(5)中,即可得到均匀条纹的包裹相位  $\phi(m,n)$ 。

$$\phi(m,n) = \arctan[(I_3' - I_1') / (I_0' - I_2')] \quad (5)$$

$\phi(m,n)$  被截断在  $[-\pi, \pi]$  之间,故又称为截断相位,将同一列像素  $-\pi$  与  $\pi$  过度点的连线定义为截断

相位的分界线。为得到连续相位,需对截断相位进行解包裹运算,参考文献[10]利用三幅对截断相位分界线编码的辅助二值编码图像准确得到连续的绝对相位值,与格雷编码解相位方法相比,所需的辅助图像数减少一半,有效提高了解相位的效率。

采用图 1 所示的系统模型进行测量时,会由于投影仪倾斜投影均匀条纹,给最终的测量结果引入非线性误差。为改善这种现象,参考文献[7]提出一种分段非均匀条纹的生成方法,通过分析均匀条纹在参考平面上的误差分布,得到非均匀条纹图像的初始相  $\varphi'(m,n)$ 。

$$\varphi'(m,n) = \begin{cases} \frac{2\pi f * (L^2 + d^2) * (\frac{M}{2} - m)}{L * \sqrt{L^2 + d^2} + d * (\frac{M}{2} - m)} & m \in (1, \frac{M}{2}) \\ \frac{2\pi f * (L^2 + d^2) * (m - \frac{M}{2})}{L * \sqrt{L^2 + d^2} + d * (m - \frac{M}{2})} & m \in (\frac{M}{2}, M) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $f$  为参考平面上条纹的频率;  $L$  为投影仪光心与参考平面之间的垂直距离;  $d$  为投影仪光心与摄像机光心的水平距离。将公式(2)中的  $\varphi(m,n)$  换成  $\varphi'(m,n)$  即为非均匀条纹的表达式。由公式(2)、(6)可得非均匀条纹周期的变化没有特定规律,使得非均匀条纹截断相位分界线的二值编码变得非常困难,而利用截断相位分界线的编码进行相位展开,必须先准确提取出非均匀条纹截断相位的分界线。

## 2 非均匀条纹截断相位分界线提取

由于非均匀条纹初始相位周期的变化没有规律,所以无法根据非均匀条纹的初始相位得到非均匀条纹截断相位的分界线,文中利用反求法,先生成标准非均匀条纹,再根据分界线处相邻像素点的相位差得到非均匀条纹截断相位的分界线。结合公式(2)、(5)、(6)可以得到标准非均匀条纹的截断相位,如图 2(a)所示。理论上非均条纹截断相位分界线左右两侧像素点处相位值的差值为  $2\pi$ ,所以在已知标准非均匀条纹截断相位的前提下,只要截断相位中某一行相邻像素点相位的差值为  $2\pi$ ,即认为被减相位值处的像素点位于分界线上,逐行对标准非均匀条纹截断相位的相邻像素点处相位值做相减运算,保存各行位于分界线上的像素点。最后,

连接位于同一列的分界点,即可得到标准非均匀条纹截断相位的分界线。然而非均匀条纹的初始相位与投影图像的像素为非线性对应关系,使得一些分界线处相邻像素点对应相位的差值小于  $2\pi$ 。但是,分界线处相邻像素点对应相位的差值一定大于  $\pi$ ,所以在提取分界线时,只要截断相位中某行的相邻像素点对应的相位差值大于  $\pi$ ,则认为被减相位值处的像素点位于截断相位分界线上。利用上述方法即可提取出标准非均匀条纹截断相位的分界线,如图 2(b)所示。



(a) 非均匀条纹截断相位图

(a) Wrapped phase map of uneven fringes pattern



(b) 截断相位分界线图

(b) Boundary of wrapped phase map

图 2 非均匀条纹截断相位与截断相位分界线对比图

Fig.2 Comparison of non-uniform fringe wrapped phase and wrapped phase boundary

### 3 非均匀条纹截断相位分界线编码与解码

#### 3.1 非均匀条纹截断相位分界线编码

提取出标准非均匀条纹的截断相位分界线之后,即可对截断相位分界线逐一进行编码,每条分界线的编码值由偶数位二进制码值组成,码值具体位数由非均匀余弦条纹截断相位分界线的数目确定,若  $r$  为非均匀余弦条纹截断相位分界线数目,  $s$  为二进制码值位数,则  $r$  和  $s$  应满足关系:  $2^s \geq r$ 。一组  $s$  位二进制码值唯一对应一个十进制数值,该十进制数值即为该条分界线的绝对级次。  $s$  位二进制码值有  $2^s$  种组合,为了保证编码值的唯一性,应满足前一个二进制编码值的后三位是后一个二进制编码值的前三位,已使用的编码组合不能再次使用。另外,为保证解码准确度,应使每幅编码图像中的 0、1 编码值的分界点与非均匀条纹截断相位的分界线对齐,编码图像如图 3 所示,该图所示编码图像的二进制码值位数为 6 位。该方法只需  $s/2$  幅辅助图像就可以确

定  $2^s$  种编码组合,但是同样的编码组合数,格雷编码需要  $s$  幅辅助图像,所以需要的辅助图像幅数减少了一半,有效地提高了测量效率。

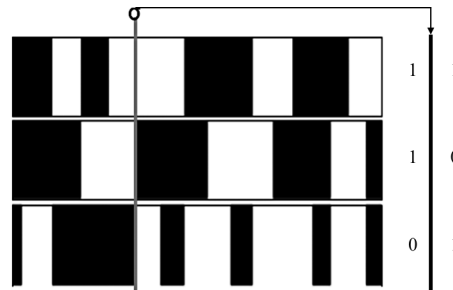


图 3 编码图像

Fig.3 Coded pattern

#### 3.2 解码原理

实际测量时,由于环境光、待测物表面反光率等因素的影响,使相机捕获的二值编码图像灰度值发生变化,不再只包含 0、1 值。而且,值为 1 的图像区域会向值为 0 的区域扩散。所以,解码前需将捕获编码图像进行二值化处理。由于捕获图像中变形区域黑白编码条纹的亮度对比度较低,使二值化阈值选取的可靠性降低,解码误差率随之增加。针对此问题,在对捕获编码图像二值化前,先增强捕获图像中较暗区域的亮度,使捕获图像的整体亮度对比度增强,再对亮度对比度增强后的图像进行二值化,二值化阈值选取的可靠性明显增强。利用二值化后的辅助图像与变形相移条纹的截断相位分界线进行解码,将分界线左右两侧编码图像的编码值按时间顺序提取,按空间顺序组合,利用码值对照表进行配对,即可得到每个分界线的绝对级次,表 1 为部分二进制编码值与截断相位绝对级次的对照表。绝对连续相位与截断相位和条纹级次的关系为:

$$\Phi(m,n) = \phi(m,n) + 2k\pi \quad (7)$$

式中:  $\Phi(m,n)$  为变形条纹的连续绝对相位;  $\phi(m,n)$  为变形条纹的截断相位;  $k$  为截断相位的绝对级次。结合公式(7)和表 1 即可得到非均匀条纹的连续绝对相位值。

表 1 码值对照

Tab.1 Code value contrast

Binary code	000	001	010	100	110	011	010
	001	010	100	110	011	010	001
$k$	1	2	3	4	5	6	7

### 4 仿真实验及结果分析

#### 4.1 解除部分约束的系统模型

为降低系统的安装难度,提高测量精度,文中采用解除部分约束的系统模型,该系统模型解除了摄像机光心  $O_C$  和投影仪光心  $O_P$  连线平行于参考平面  $X$  的约束,解除了摄像机光轴  $O_C O_C'$  和投影仪光轴  $O_P O_P'$  在参考平面  $X$  上相交于一点的约束,系统结构简图如图 4 所示。

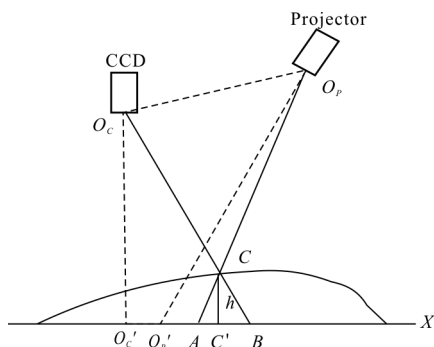


图 4 解除部分约束的系统模型

Fig.4 System model with the partly removed constraints

因为非均匀条纹截断相位分界线二值编码解相位方法得到的相位是绝对相位,故可以直接利用多项式拟合法建立绝对相位与待测物高度的关系,然而多项式的复杂程度会同时影响测量系统的标定精度和标定效率,文中综合考虑测量系统的测量精度和标定效率后,最终选取二次多项式拟合连续绝对相位与待测物高度的关系,关系表达式为:

$$h(m,n)=a_0+a_1\Phi(m,n)+a_2\Phi^2(m,n) \quad (8)$$

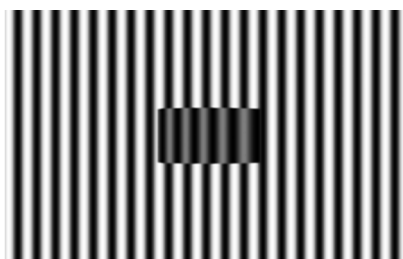
式中:  $h(m,n)$  为像素  $(m,n)$  处的待测物高度值;  $\Phi(m,n)$  为像素  $(m,n)$  处的连续绝对相位值;  $a_1, a_2, a_3$  是待标定的参数。采集多个已知距离标定板处的条纹信息,得到多组相位与距离的对应关系,采用最小二乘法即可得到高度相位映射关系式中的待标定参数。

#### 4.2 仿真实验与分析

在 3ds Max 软件中建立图 4 所示的系统模型,投影仪光心与参考平面的垂直距离为 600 mm,投影仪光心在参考平面上的投影与投影仪光轴与参考平面的交点之间的距离为 200 mm,在 MATLAB 软件中按公式(2)、(6)生成四幅标准非均匀条纹和三幅辅助编码图像,条纹周期为 15 pixel,投影图像的大小为

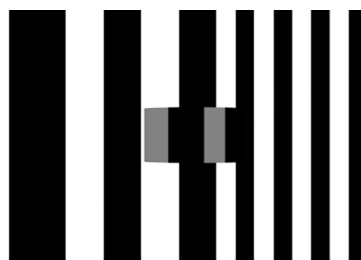
600 pixel×600 pixel。

向拱桥形物体分别投影四幅相移非均匀条纹和三幅辅助条纹,相机同步捕获投影到参考平面和拱桥形物体上的图像,图 5(a)是其中一幅非均匀条纹投影至参考平面和拱桥上的图像,可见非均匀条纹在参考平面上变得非常均匀;图 5(b)为投影至参考平面和拱桥形物体上的一幅辅助条纹;利用在 MATLAB 中编制的程序增强捕获辅助图像的亮度对比度,亮度对比度增强后的辅助图像如图 5(c)所示,与图 5(b)相比,辅助图像变形区域的亮度对比度明显增强;利用公式(5)得到条纹截断相位,如图 5(d)所示;结合截断相位分界线,得到截断相位的级次图,如图 5(e)所示;利用公式(7)得到连续绝对相位,如图 5(f)所示;绝对相位无拉线现象产生,在变形和非变形分界处过度光滑,文中所提方法可以成功地得到变形非均匀条纹的连续绝对相位。



(a) 变形非均匀条纹图

(a) Deformed uneven fringes pattern



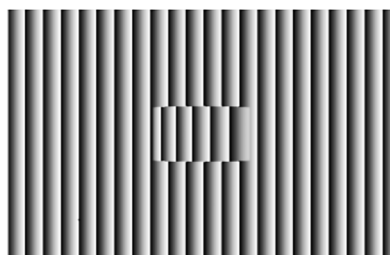
(b) 变形编码图

(b) Deformed code pattern



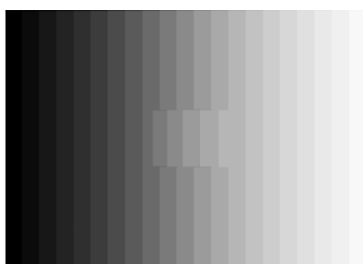
(c) 亮度对比度增强变形编码图

(c) Deformed code pattern after intensity is enhanced



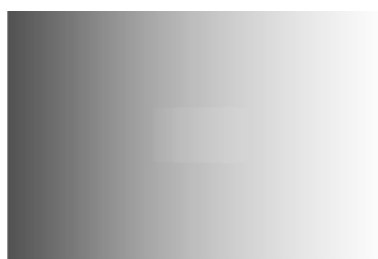
(d) 变形非均匀条纹截断相位图

(d) Wrapped phase of deformed uneven fringes



(e) 截断相位级次

(e) Order of wrapped phase pattern



(f) 连续绝对相位图

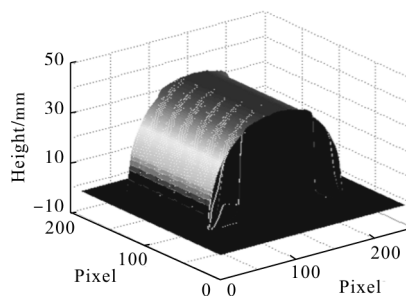
(f) Unwrapped absolute phase map

图 5 拱桥形物体非均匀条纹相位展开仿真实验

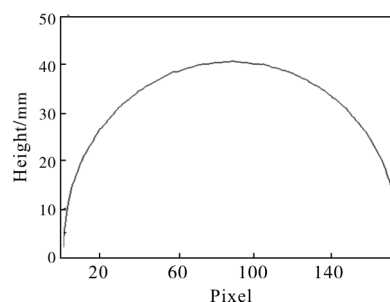
Fig.5 Simulation experiment of phase non-uniform stripe unwrapping for arch bridge

为获得拱桥形物体的高度信息,需标定公式(8)中的参数,假设参考平面位置处的距离为 0 mm,移动参考平面至距离 5、10 mm 的位置,分别向各位置处的平面投影相移非均匀条纹和辅助条纹,相机同步捕获平面上的图像,解相位后得到三组高度相位映射关系,利用最小二乘法得到拟合式中的参数。

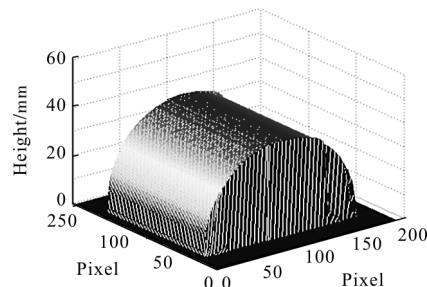
为进行比较,利用参考文献[7]中所述测量方法,即双频解相位结合完全约束系统模型测量方法,搭建完全约束测量系统,向同一拱桥形物体分别投影四幅周期为 40 pixel 和 4 幅周期为 42 pixel 的非均匀相移条纹,利用双频解相位方法及公式(1)获得拱桥形物体的高度信息。图 6(a)和图 6(c)分别为利用参考文献[5]中所述方法和按文中所提方法



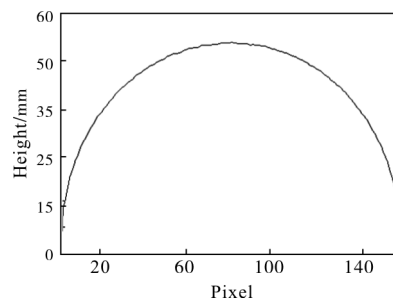
(a) 双频解相位结合完全约束系统测量结果三维图  
(a) Three dimensional map of the measurement results of the dual frequency phase unwrapping combine with the fally constrained system



(b) 图 6(a)中 100 pixel 处的截面图  
(b) Section of 100 pixel in Fig.6(a)



(c) 截断相位分界线编码解相位结合非完全约束系统测量结果  
(c) Three dimensional map of the measurement results of the wrapped phase dividing line coding phase unwrapping combined with the system which constraint is partly removed



(d) 图 6(c)中 100 pixel 处的截面图  
(d) Section of 100 pixel in Fig.6(c)

图 6 拱桥形物体测量实验结果

Fig.6 Arch shape object measurement results

测得的拱桥高度数据三维图,图 6(b)和图 6(d)分别为图 6(a)和图 6(c)所示拱桥测量结果三维图中像素坐标为 100 pixel 处的截面图。因为两种方法中相机焦距和相机、投影仪摆放位置的不同,导致无法直接比较两种测量方法的测量效果,所以分别取两种方法测得结果的最高点像素处高度值和以最高点像素为中心的其它八组对称像素处的高度值,分别求取每组对称像素处高度的差值和相对差,如表 2 和表 3 所示。最终求得两种方法各对称点处高度差值的平均值和均方差来衡量两种测量方法的测量效果。对比表 2 和表 3 中各对称点处的相对差,可见文中所提方法测量结果的非线性变形更小,根据表中各对称点处的高度差值求得双频解相位结合完全约束系统模型测量方法的高度差值的均值和均方差分别为 0.436 5 mm 和 0.233 6 mm,截断相位分界线编码解相位结合非完全约束系统模型测量方法

表 2 双频解相位结合约束系统模型测量结果对称性

Tab.2 Result's symmetry of the method which applying double frequency to unwrap combined with the completely constrained system

Data	Coordinates/pixel	Height/mm	Difference/mm	Relative difference
Highest point	89	40.400 7	-	-
Symmetrical points 1	25	28.516 8	0.778 1	2.73%
	153	27.738 7		
Symmetrical points 2	33	31.926 3	0.661 9	2.07%
	145	31.264 4		
Symmetrical points 3	41	34.434 5	0.585 8	1.7%
	137	33.848 7		
Symmetrical points 4	49	36.357 2	0.452 5	1.25%
	129	35.904 7		
Symmetrical points 5	57	38.077 1	0.521 2	1.37%
	121	37.555 9		
Symmetrical points 6	65	38.913 2	0.178 7	0.46%
	113	38.734 5		
Symmetrical points 7	73	39.911 0	0.247 4	0.62%
	105	39.663 6		
Symmetrical points 8	81	40.115 6	0.066 4	0.17%
	97	40.049 2		

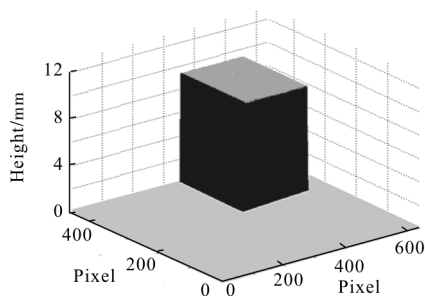
表 3 二值时空编码解相位法结合约束系统模型方法测量结果对称性

Tab.3 Result's symmetry of the method which applying the binary spationtemporal encoded to unwrap combined with the non-constraints system

Data	Coordinates/pixel	Height/mm	Difference/mm	Relative difference
Highest point	82	40.023 6	-	-
Symmetrical points 1	18	25.913 3	0.396 9	1.53%
	146	25.516 4		
Symmetrical points 2	26	29.899 3	0.23	0.77%
	138	29.669 3		
Symmetrical points 3	34	32.834 8	0.170 6	0.52%
	130	32.664 2		
Symmetrical points 4	42	35.255 8	0.139 2	0.4%
	122	35.116 6		
Symmetrical points 5	50	36.947 7	0.033 3	0.09%
	114	36.981 0		
Symmetrical points 6	58	38.256 3	0.059 7	0.16%
	106	38.316 2		
Symmetrical points 7	66	39.169 8	0.162 1	0.41%
	98	39.331 9		
Symmetrical points 8	74	39.723 3	0.028 6	0.07%
	90	39.751 9		

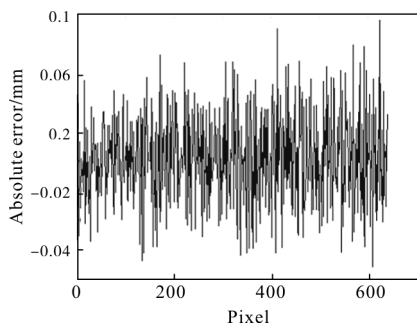
的高度差值的均值和均方差分别为 0.152 6 mm 和 0.114 3 mm,可见文中所提方法的测量效果更好。另外,待测拱桥的实际最高点高度为 40 mm,与表 2 和表 3 中测的最高点高度值比较可得,就最高点测量结果而言,截断相位分界线编码解相位结合非完全约束系统模型测量方法的测量精度更高。

为进一步验证两种测量方法的测量精度,模拟对高度为 12 mm 的长方体进行测量,文中所提方法的测量结果如图 7(a)所示,测量误差的第 200 行数据如图 7(b)所示,测量误差大部分在±0.02 mm 之间,求取测量结果的平均误差为 0.002 0 mm,测量误差绝对值均值为 0.030 1 mm,测量误差的标准差为 0.029 1 mm。与双频非均匀条纹相位展开结合约束测



(a) 长方体仿真测量结果

(a) Simulated measurement result of cuboid



(b) 第 200 行绝对误差值

(b) Data of absolute error in 200th row

图 7 长方体测量试验

Fig.7 Cuboid measurement experiment

量系统测量方法的测量结果相比, 平均误差降低了 95%, 误差绝对值均值降低了 93.83%, 误差标准差降低了 90%。

### 4.3 实际实验与分析

在实验室中搭建了三维测量系统, 实验系统由分辨率为的明基 MP515 型投影仪、分辨率为 pixel 的 SVCam-ECO267 彩色工业 CCD 相机、型号为 M3Z1228C-MP 的镜头、型号为宏碁 4750 G 的计算机组成, 为进行对比, 同时采用型号为 croma564 的三坐标测量仪对该物体进行测量。文中方法测得高度值的最大值为 12.136 mm, 最小值为 12.042 mm, 平均值为 12.082 mm; 三坐标测量仪测得高度值的最大值为 12.006 mm, 最小值为 12.002 mm, 平均值为 12.005 mm; 在测量结果平均值方面, 与三坐标测量仪的测量结果比较, 平均误差仅为 0.64%。

## 5 结论

文中根据均匀条纹二值时空编码解相位方法, 提出一种用于非均匀条纹相位展开的截断相位分界线二值时空编码解相位方法, 该方法可以准确得到

变形非均匀条纹的连续绝对相位, 可解除双频非均匀条纹相位展开算法中对条纹频率的限制。针对捕获编码条纹二值化过程中阈值可靠性低的问题, 提出一种提高阈值可靠性的方法, 通过提高捕获编码图像较暗区域的亮度, 进而提高捕获编码图像的整体亮度对比度, 最终提高二值化阈值的可靠性。文中仿真实验采用非完全约束的系统模型, 大大降低了系统的安装难度, 有效抑制了系统安装误差的扩散。拱桥形物体仿真测量结果表明, 文中方法较双频非均匀解相位结合完全约束系统测量方法, 对称性误差均值降低了 65%, 对称性误差均方差降低了 51%。长方体仿真测量结果表明, 文中方法较双频非均匀相位展开结合完全约束系统测量方法, 测量误差均值降低了 95%, 误差绝对值均值降低了 93.83%, 测量误差均方差降低了 90%, 实际测量结果与三坐标测量仪相比平均误差仅为 0.64%。在文中所提方法保持了截断相位分界线编码相位展开方法需要辅助图像少的特点, 在减少辅助图像的同时, 提高了测量精度。

### 参考文献:

- [1] Su Xianyu, Zhang Qian. Dynamic 3-D shape measurement method: A review [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 191-204.
- [2] Mohammadi F, Kofman J. Single-frame digital phase-shifting 3D shape measurement using pixel-wise moiré-wavelength refinement [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2016, 78: 196-204.
- [3] Wang Haixia, Qian Kemao, Soon S H. Valid point detection in fringe projection profilometry[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7535-7549.
- [4] Feng Fan, Duan Fajie, Bo En, et al. Surface profile measuring system based on fringe projection and sinusoidal phase modulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 44(12): 3762-3768. (in Chinese)
- [5] Fei Kai, Zhang Lu, Zhu Feihu, et al. Design of laser triangulation system based synchronized scanners with LIDAR [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2358-2363. (in Chinese)
- 费凯, 张璐, 朱飞虎, 等. 融合 LIDAR 的激光同步扫描三角测量系统的设计 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2358-2363.
- [6] Wang Xin, Da Feipeng. Phase unwrapping algorithm using



- interlaced fringe for 3D shape measurement [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(2): 249–255. (in Chinese)
- 王新, 达飞鹏. 三维形貌测量中基于错位条纹的解相位方法[J]. 光电子·激光, 2011, 22(2): 249–255.
- [7] Lin Haixin, Wu Qingyang, Huang Jinhui, et al. Binary spatiotemporal encode method for structured light projection of three-dimensional measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 198–202. (in Chinese)
- 林海新, 吴庆阳, 黄锦辉, 等. 应用于结构光投影三维测量的二值时空编码方法[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 198–202.
- [8] Dai Shijie, Yi Dan, Li Weichao, et al. Generation method of piecewise-uneven fringes and its applications in two-frequency phase unwrapping [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2849–2853. (in Chinese)
- 戴士杰, 易丹, 李伟超, 等. 分段非均匀条纹生成方法及其在双频解相位中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2849–2853.
- [9] Lei Zhihui, Li Jianbing. Full automatic phase unwrapping method based on projected double spatial frequency fringes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(1): 39–42. (in Chinese)
- 雷志辉, 李健兵. 基于双频投影条纹的全自动相位解包裹方法[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 39–42.
- [10] Ding Yi, Xi Jiangtao, Yu Yanguang, et al. Frequency selection in absolute phase maps recovery with two frequency projection fringes [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13238–13251.
- [11] Cao Pu, Xi Jiangtao, Yu Yanguang, et al. 3D shape measurement based on projection of triangular patterns of two selected frequencies [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 29234.