

文章编号 1004-924X(2010)02-0294-09

# 结构光系统的周期编码光设计

许丽<sup>1,2</sup>, 陈黎霞<sup>1</sup>, 张之江<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电学院 信息工程学院, 河南 郑州 450011;

2. 上海大学 通信与信息工程学院 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072)

**摘要:**在结构光系统中,编码光是解决对应点匹配的关键,编码光的性能直接影响结构光测量的精度、分辨率和实时性。在深入分析条纹图变形机理的基础上,证明了空间周期性应用到编码光设计的可行性,提出了运用空间周期的约束条件,分析了在编码光设计中引入空间周期性对测量性能的改进。分析结果表明,在编码图个数保持不变的情况下,在结构光编码中引入空间周期性,系统测量分辨率将会有很大的提高;同样在保持测量分辨率不变的情况下,应用空间周期性可减少编码模式的个数,更适合实时测量系统。结合时空编码方式,提出了一种新的实时编码光设计方案——周期时空条纹编码。该编码方式利用了空间周期性,在保证测量分辨率和精度的情况下,可减少编码模式的个数,适应实时测量的应用。对该编码方式进行了实验验证,实验结果证明了空间周期性应用于编码光设计的有效性。

**关键词:**结构光系统;编码光设计;空间周期性;周期时空编码

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A

## Alternate coded pattern for structured light system

XU Li<sup>1,2</sup>, CHEN Li-xia<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-jiang<sup>2</sup>

(1. *Department of Information Engineering, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;*

2. *The Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)*

**Abstract:** In a structured light system, coded patterns are the key of the corresponding point problem, for their reliabilities directly affect measuring accuracy and resolution. In the paper, an analysis of the maximum stripe deformation (due to depth changes on the surface) and measuring resolution limits are discussed and the principle of spatial periodicity used for coding is proposed. Results show that when spatial periodicity is used for coding, the resolution is greatly improved, or the number of patterns is greatly reduced for real-time structured light systems. According to these analyses, a novel coded pattern based on spatial periodicity for real-time structured light systems is presented as an alternative to the time-space coded pattern. The coded pattern allows range scanning of moving objects with easy implementation for decoding and high measurement resolution. Experiments demonstrate the validity of spatial periodicity used in coded pattern design.

收稿日期:2008-10-23;修订日期:2008-11-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60772124)

**Key words:** structured light system; coded pattern design; spatial periodicity; alternate time-space coded pattern

## 1 引言

基于视觉的三维信息获取技术在逆向工程、虚拟现实、文物修复、机器人导航、在线产品检测等方面有着广泛的应用背景<sup>[1-3]</sup>。结构光三维信息获取技术是视觉测量技术的一种,具有测量速度快、准确度高、成本低等优点。

结构光系统的特点是使用具有某种模式的主动光源来代替立体视觉中的一个摄像机,向场景中投射该光源,然后从图像上提取相对应的模式,使得匹配问题容易解决<sup>[1,4]</sup>。结构光技术用于解决对应点匹配问题的关键是编码光的设计。常用的编码光设计方法有时间编码、空间编码、直接编码和多种编码方式的综合<sup>[4]</sup>。空间编码利用其周围点的信息来确定唯一的编码值<sup>[5]</sup>;时间编码是在连续时间上获得一个图像序列后从图像序列上获得唯一的编码值<sup>[6-7]</sup>;直接编码则是借助一些特殊的方法(颜色、灰度等特性)得到编码值<sup>[8-9]</sup>。此外,为了适应各种应用背景,还出现了使用多种编码策略的混合编码方式<sup>[10-12]</sup>。

时间编码是结构光编码方式中最常见的一种,是将一系列的编码模式周期性地投射到被测物体表面来利用其时间周期性,而空间上的周期性鲜少有人利用。本文从考察被测物体表面的深度变化所引起的条纹偏移量着手,深入分析了该偏移量的极限情况,证明了空间周期性被应用到编码光设计的可行性。结合时空编码方式,本文提出了一种新的实时编码光设计方案——周期时空条纹编码。所提出的周期空间条纹编码方式,充分利用了空间周期性,在保证测量分辨率、精度和编解码复杂度的情况下,减弱了对时间连续性的依赖,可用于对动态场景的实时测量。最后实验验证了周期时空编码测量的有效性。

## 2 空间周期性分析

对条纹结构光系统而言,条纹变形取决于投影仪和摄像机的相对位置,也取决于被测物体表

面的形状。当投影仪和摄像机被固定,条纹变形就主要取决于被测物体表面的三维形状。

由于结构光系统测量景深的存在,条纹受到表面深度所引起的偏移量是有限的。本文从理论上分析了表面深度变化所引起的条纹偏移的极限情况,讨论了空间周期性被应用到编码光设计中的可行性。

根据条纹结构光系统建模可知,线结构光编码为一维编码。如图1所示,条纹偏移被定义为 $z$ 轴上的深度变化 $dz$ 所引起的测量图上条纹偏移在 $x$ 轴上的变化 $du$ 。对于条纹结构光系统而言, $z$ 轴上深度变化的极限为系统测量的景深 $dz$ (包括前景深 $dz_f$ 和后景深 $dz_b$ ),由景深所引起的测量图上条纹偏移量为 $du$ (偏移实际世界坐标值,mm)、 $dU$ (偏移图像坐标值, pixel)。

假设投影仪、摄像机的投影和成像系统用透镜系统来模拟。对透镜系统而言,前后景深公式为:

$$\begin{cases} dz_f = \frac{F\delta z^2}{f^2 + F\delta z} \\ dz_b = \frac{F\delta z^2}{f^2 - F\delta z} \end{cases}, \quad (1)$$

相对于测量距离的相对景深为:

$$\begin{cases} \frac{dz_f}{z} = \frac{1}{\frac{f^2}{F\delta z} + 1} \\ \frac{dz_b}{z} = \frac{1}{\frac{f^2}{F\delta z} - 1} \\ \frac{dz}{z} = \frac{dz_f}{z} + \frac{dz_b}{z} = \frac{1}{\frac{f^2}{F\delta z} + 1} + \frac{1}{\frac{f^2}{F\delta z} - 1} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, $F$ 为透镜光圈, $\delta$ 为透镜的弥散圆直径, $f$ 为透镜的等效焦距, $z$ 为测量距离。

编码结构光系统主要由投影仪和摄像机构成,因此,结构光系统的景深被认为是投影仪景深和摄像机景深的最小值:

$$dz = \min(dz_p, dz_c), \quad (3)$$

这里 $dz$ 表示结构光系统的测量景深, $dz_p$ 表示投影仪的景深, $dz_c$ 表示摄像机的景深。

根据式(2)可知,透镜景深随着焦距的增大而减小,而投影仪和摄像机之间的光圈、弥散圆直径和测量距离的差异较小。在常见的结构光系统中,投影仪的焦距大于摄像机焦距。因此,结构光系统的景深主要取决于投影仪景深。在本文实验中,系统设备的参数: $f_p=24\text{ mm}$ ,  $F=1/1.75$ ,  $\delta=0.035\text{ mm}$ ,  $z=800\text{ mm}$ ,可计算得到系统的测量相对景深约为  $dz/z\approx 5.36\%$ 。

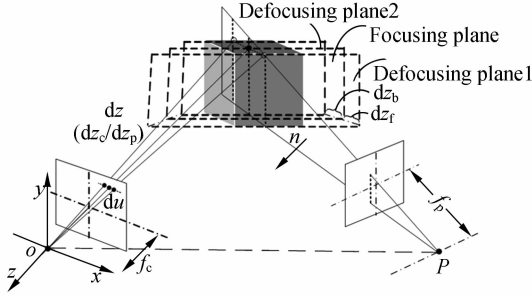


图 1 深度变化所引起的条纹偏移

Fig. 1 Stripe deformation due to depth change

最大测量范围(景深)与条纹在摄像机成像面上偏移的几何关系如图 2,投影仪和摄像机分别固定在点  $O$  和  $P$  上,根据成像和投影的几何关系,可以推导出如下关系:

$$dx = dz(\tan \alpha - \tan \beta), \quad (4)$$

其中,  $dx$  为条纹变形反映在摄像机成像的偏移量,  $\alpha$  为摄像机成像角,  $\beta$  为投影仪投影角。

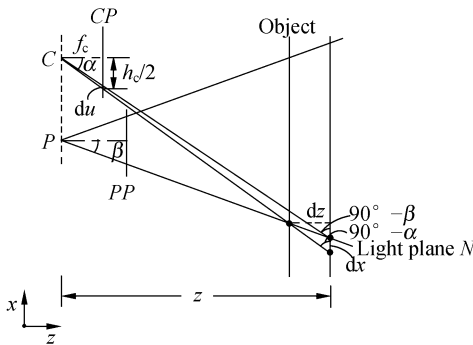


图 2 条纹图偏移的几何关系

Fig. 2 Deformation of imaging plane due to depth change

摄像机成像角满足:

$$\tan \alpha = \frac{h_c}{2f_c}, \quad (5)$$

$$h_c = N_x \times k_x, \quad (6)$$

其中,  $h_c$  为 CCD 在  $x$  轴上的尺寸大小,  $k_x$  为  $x$  轴上的尺度因子,  $N_x$  为 CCD 在  $x$  轴上的分辨率。

景深所引起的图像平面上条纹偏移量  $du$  (mm) 和  $dU$  (pixel) 可近似为:

$$du = dx \times \frac{f_c}{z} = dz \times \frac{f_c}{z} \times \frac{h_c}{2f_c} = dz \times \frac{f_c}{z} \times \tan \beta, \quad (7)$$

$$dU = \frac{dx}{k_x} = \frac{dz}{z} \times \frac{N_x}{2} - \frac{1}{k_x} \times dz \times \frac{f_c}{z} \times \tan \beta, \quad (8)$$

由于  $0^\circ < \beta < 90^\circ$ ,  $\tan \beta > 0$ , 条纹偏移反映到图像平面上可得:

$$dU < \frac{dz}{z} \times \frac{N_x}{2}, \quad (9)$$

取  $D$  为条纹在图像平面上的最大偏移量, 则

$$D = \frac{dz}{z} \times \frac{N_x}{2}, \quad (10)$$

如果用  $d$  来表示相同编码值的条纹距离, 即  $d$  必为一整数, 则相同码值的条纹间距满足式(11)时, 周期编码设计中的解码混淆可以避免。

$$d > \text{int}(2 \times D) + 1. \quad (11)$$

众所周知, 图像成像过程可认为是对场景的一次采样过程, 而编码结构光的测量过程可认为是一个再采样过程。因此, 编码过程就是确定采样点的采样过程, 编码过程必须满足抽样定理<sup>[13]</sup>。抽样定理反应在结构光测量系统中表述为: 投影仪对被测场景的分割区域必须小于摄像机的采样区域的一半, 即满足式(12):

$$f_{z_m} < \frac{f_{z_c}}{2}, \quad (12)$$

其中,  $f_{z_c}$  表示摄像机的采样频率,  $f_{z_m}$  表示结构光系统的测量频率。也就是说, 编码所分割的区域大小必须是摄像机一个像素区域的两倍, 即满足式(13):

$$\frac{1}{n} > 2 \frac{1}{N}, \quad (13)$$

这里  $1/N$  是摄像机一个像素的视场大小,  $N$  为摄像机的分辨率;  $1/n$  是结构光测量系统中一个条纹的视场大小,  $n$  为结构光测量系统的测量分辨率(主要取决于编码分辨率)。

条纹编码可认为是一维编码方式,  $\Delta$  表示摄像机成像面上一个条纹所占有的像素个数。根据式(13)可得:

$$\Delta = \frac{N}{n} > 2. \tag{14}$$

当空间周期性被应用于条纹编码中时,一个编码周期中相同码值之间的距离用  $d$  来表示。相同码值间的距离  $d$  取决于一个空间周期所占据的区域,即满足式(15):

$$\begin{cases} d = \Delta n_T \\ k = \Delta p n_T \end{cases}, \tag{15}$$

其中,  $p$  是周期索引值,  $n_T$  为一个空间周期中编码的个数,  $k$  为一个条纹所占据图像平面的像素个数。根据式(10)、(11)、(14)、(15)可得到公式(16):

$$\begin{cases} \Delta > 2 \\ \Delta n_T > 2D \\ \Delta p n_T < N \end{cases}, \tag{16}$$

当编码周期数满足式(16)时,解码过程可以避免出现混淆。

以上分析可以得出,空间周期性满足一定条件时(即所选取的空间编码周期数满足式(16))可应用到条纹编码中。在编码图个数保持不变的情况下,引入空间周期性结构光编码中测量的分辨率将会有很大的提高;同样,在保持测量分辨率不变的情况下,应用空间周期性可减少编码模式个数,更适合实时测量系统。

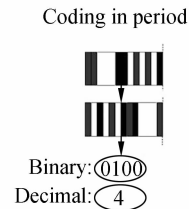
### 3 周期时空编码光设计

考虑提高测量系统的实时性和获得高的测量分辨率是两个互相制约的条件,本文在保证测量分辨率的条件下,提出了利用空间周期性提高系统实时性的编码设计。综合考虑编解码的效率,根据将空间周期性应用到编码的可行性论证,本文设计了基于条纹边缘的周期时空编码光<sup>[10-11]</sup>。空间周期编码设计过程包括三个部分:其一是设计一个空间周期内条纹编码;其二是根据结构光系统投影仪和摄像机的参数确定周期数  $p$ ;最后是编码值唯一性的确定。

#### 3.1 一周期内编码的设计

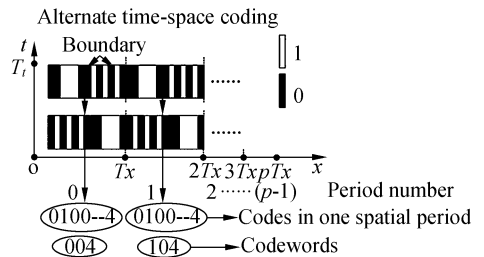
条纹编码作为一种一维编码方式,解码方便;二进制黑白条纹边缘编码有利于条纹边缘的提取,对各种噪声有很强的鲁棒性,如来自测量环境

的噪声、被测物体表面自身颜色、阴影等。本实验设计的编码光是使用两帧二进制(黑/白)条纹边缘编码光,这样每个条纹可以得到 4 位二进制码字(4 bit:0~15),除去 4 个解码不可实现的条纹边缘(即两帧编码图中同时出现条纹边缘两次为全黑或全白的情况,该条纹边缘为不可识别边缘),可得到 12 个编码值。编码过程见图 3,根据两幅编码图中条纹边缘左右两侧的黑白灰度,得到一个 4 位二进制码值,如表 1 所示。由于条纹边缘编码的特性,相邻的二进制码值中满足前一个二进制码值的后两位数字与后一个码值的前两位数字相同。



(a) 一个周期的编码设计

(a) Alternate time-space coding in a period



(b) 周期编码光设计

(b) Alternate time-space coding



(c) 第 1 帧  
(c) Frame 1



(d) 第 2 帧  
(d) Frame 2



(e) 实测图



(f) 实测图

(e) Measuring picture (f) Measuring picture

图 3 周期时空编码设计

Fig. 3 Design of alternate time-space coded pattern

表 1 一空间周期码值分布

Tab.1 Codes in a spatial cycle

二进制码值	十进制码值	二进制码值	十进制码值
0001	1	0010	2
0110	6	1000	8
1011	11	0011	3
1110	14	1101	13
1001	9	0111	7
0100	4	1100	12

### 3.2 周期数的确定

以表 2 参数的测量系统为例,进行结构光编码周期数设计,可以得到:

$$dU < \frac{dz}{z} \times \frac{N_x}{2} = \frac{5.36}{100} \times \frac{1\ 392}{2} = 37.3 \text{ pixel}$$

$$D = 37.3 \text{ pixel}$$

当相邻的同一码值的距离满足式(16)时,可以避免解码混淆,空间周期性被应用到实时编码中。如表 2 所示,该结构光系统中摄像机水平方向的分辨率为 1 392 pixel,而测量过程中所使用的分辨率为 1 000 pixel。那么得到的测量参数为:

$$\begin{cases} n_T = 16 \text{ stripe} \\ N = 1\ 000 \text{ pixel} \\ D = 37.3 \text{ pixel} \end{cases}$$

根据式(16)可得到编码设计过程中所选取的周期数满足:

$$p < 13.3,$$

因此,在实时周期时空编码中,周期数可选择为  $p = 1, 2, 3, 4, \dots, 13$ 。这里选取了 5 个空间周期( $p = 5$ )的编码方式。

表 2 测量系统参数

Tab.2 Parameters of measuring system

System parameters	Value
Projector resolution	1 040 pixel×768 pixel
Camera resolution	1 392 pixel×1 040 pixel
Size of LCD in projector	19.6 cm
Focus of projector	$f_p \in [24, 38.2]$ mm
Aperture of projector's lens	$F \in [1/2.42, 1/1.75]$
Max of measuring field	240 mm×300 mm
Work distance	800 mm
Transformation scale of camera	$k_x = k_y = 4.65 \times 10^{-3}$ mm/pixel
Max value in $x$ direction	$\text{Max}(x) = 240/2 = 120$ mm
Max of deformation in pixels	$D = 37.3$ pixel
Number of spatial periods	5

### 3.3 编码值的确定

为了保证每个条纹边缘有一个唯一的编码值(包括码值与周期数),编码值的第一位是空间周期数(0~4),码值取决于两帧编码图中条纹边缘两侧的二进制灰度(0/1)。利用其空间周期性,循环 5 个周期进行编码,这样可以获得  $5 \times 12$  个编码值,所设计的编码图如图 3 所示。图 3(a)表示了一个空间周期上可得到 12 个码值,每个码值由条纹边缘两侧的条纹灰度决定(黑条纹代表 0,白条纹代表 1),其由 4 位二进制数字转换为 2 位的十进制数字;图 3(b)表示了唯一编码值的构成过程,在条纹灰度所决定的十进制码值的百位上加入编码周期数,可得到一个 3 位的编码值,从而保证了编码值的唯一性。图 3(c)和(d)为设计的两帧编码图 3(e)和(f)为实际测量的编码图。

## 4 周期时空编码光与其他编码光的性能比对

本节主要对周期时空编码光进行性能分析,并和现存的一些编码光进行比较。时间编码作为结构光编码中最常见的一种,具有易实现、空间分辨率高、测量精度高等优点,其本质缺陷是编码帧数多,不适合用于动态场景的三维信息获取。而现行的实时系统多应用一帧编码模式的编码设计方案,如使用颜色或空间信息的伪随机编码<sup>[14]</sup>,其不足是借助空间领域或颜色信息,限制了测量的空间分辨率和对应用背景的适应性。时空编码是对测量分辨率和时间连续性的一种折衷<sup>[10-11]</sup>,为了克服编码对时间连续性的依赖,本文把空间周期性引入了条纹时空编码中。因此,该周期时空条纹编码既能满足测量精度,又能满足分辨率的要求,更能适应对动态场景的测量。

本文对设计的新编码方式和现存的一些实时系统的编码方式在编码帧数、码值、编码效率、解码算法精度、对实时测量的适应性等方面进行对比,结果见表 3。

表3 周期时空编码光与现存编码方式的性能对比

Tab.3 Comparison of real-time structured light system with traditional coded strategies

Strategy	Codes/Patterns	Coding efficiency	M-ary	Decoding	Suit to dynamic scenes
Spatial (De Bruijn)	125/1		$n$ -ary	Color binary, Color calibration	Yes
Temporal	$2^m/m$	$2^m/2^m$	Binary	White/black, peak	No
Space-time	110/4	$110/2^8$	Binary	White/black, edge	Yes
Alternate time-space	60/2	$5 \times 12/2^4$	Binary	White/black, edge	Yes

由以上对比结果可知,伪随机编码最适合实时结构光系统<sup>[14]</sup>。由于该编码方式使用了颜色和空间信息,进行颜色标定和解码的过程很复杂。时间编码是一种高鲁棒性的编码方式。时空编码可用于对慢速物体的三维信息获取<sup>[10-11]</sup>。当空间周期性被应用于 Hall-Holt 系统中,测量效率将会有很大提高。如 3.2 节分析可知,系统参数如本文系统:

$$n_T = 110 \text{ stripe}$$

$$N = 1\,000 \text{ pixel},$$

$$D = 37.3 \text{ pixel}$$

由公式(16)可得到 Hall-Holt 系统能使用的空间周期个数为:

$$p < 4.5,$$

当空间周期个数  $p$  取 4 时, Hall-Holt 系统测量条纹从 110 条提高到 440 条,系统的测量分辨率将提高 4 倍。

从以上各种编码方式的比较可以得出,在编码图个数保持不变的条件下,引入空间周期性结构光编码中测量分辨率将会有很大提高;同样在保持测量分辨率不变的情况下,应用空间周期性可减少编码模式个数,更适合实时测量系统。

## 5 实验结果

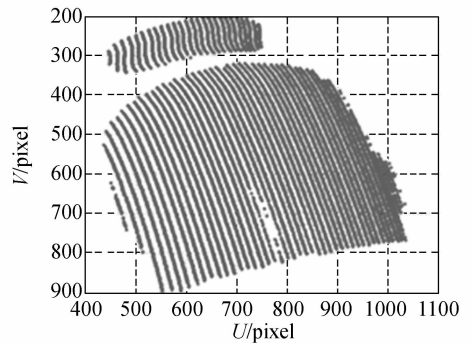
本实验采用 EPSON EMP-821 LCD 投影仪和 CoolSNAP cf CCD 摄像机组成的结构光测量系统,摄像机和投影仪的分辨率分别为  $1\,040 \text{ pixel} \times 1\,392 \text{ pixel}$  (像素尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ ) 和  $1\,024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 。测量距离在  $1\,000 \text{ mm}$  以内,测量范围为  $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。本文从编码对颜色鲁棒性的影响和在实时系统中的应用两方面考察了周期时空编码的性能。

为了验证黑白条纹的周期时空编码光对被测物体表面颜色的鲁棒性,选择了一个具有颜色的



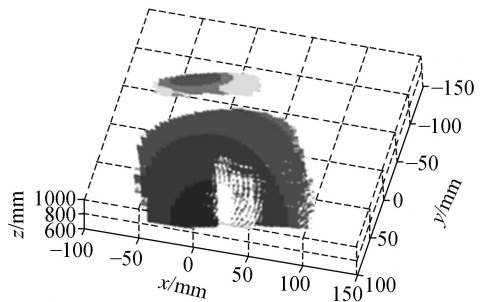
(a) 瓷瓶原物图

(a) Picture of object



(b) 条纹解码图

(b) Results of stripe extraction and decoding



(c) 三维测量结果表面图

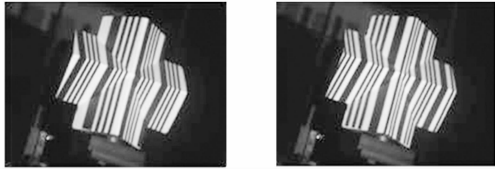
(c) Result of 3D measurement

图4 瓷瓶测量结果

Fig.4 Results of bottle measurement

物体(瓷瓶)作为被测物体,如图 4 所示。从瓷瓶测量结果可以看出,在条纹提取和解码过程中,该编码方式能保持数据的完整性(除了在底部镜面反射区)。空间周期性被应用到二进制条纹编码中,既能保持对物体表面颜色的鲁棒性,又提高了测量分辨率。

周期时空编码可用于实时测量系统中,两帧编码光周期性地投射到被测物体表面。当被测物体的运动速度小于编码光的投射周期时,可实现

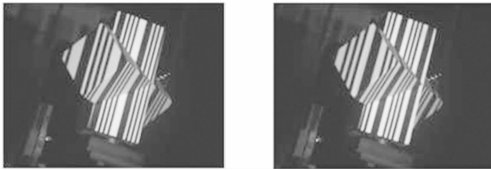


(a1) 两组测量图

(a2) 两组测量图

(a1) Measurement pictures

(a2) Measurement pictures

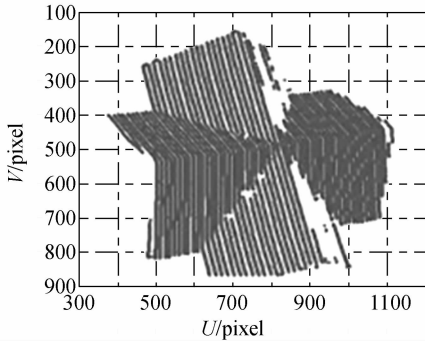


(b1) 两组测量图

(b2) 两组测量图

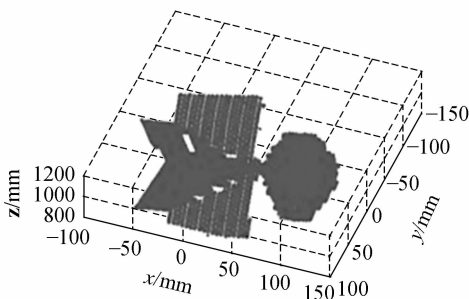
(b1) Measurement pictures

(b2) Measurement pictures



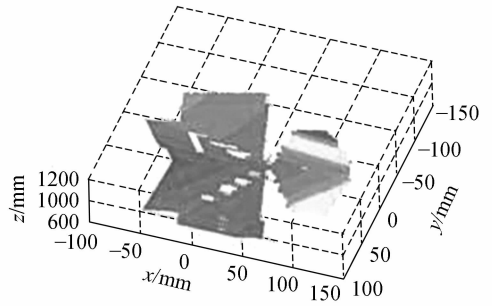
(c) 条纹解码图

(c) Results of stripe extraction and decoding



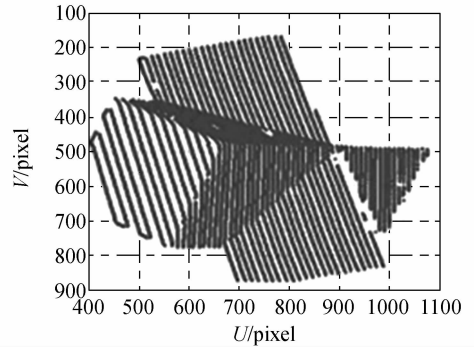
(d) 测量点云

(d) Measured point clouds



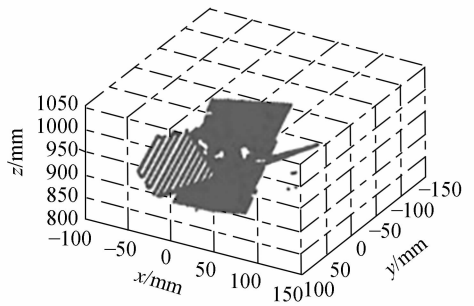
(e) 测量表面图

(e) Results of fitted surfaces in two different views



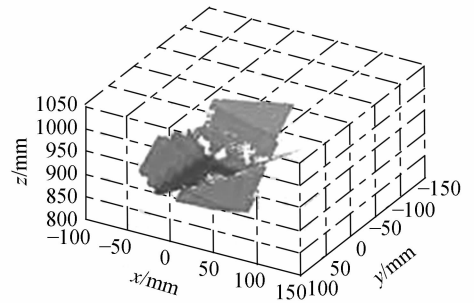
(f) 条纹解码图

(f) Results of stripe extraction and decoding



(h) 测量点云

(h) Measured point clouds



(i) 测量表面图

(i) Results of fitted surfaces in two different views

图 5 几何体测量结果

Fig. 5 Results of geometric objects

实时测量。实验验证采用手持几何体在编码光场中慢速移动,其中两视场的测量结果如图5所示。图5(a1)和(a2),(b1)和(b2)为两组测量图,图5(c)、(d)、(e)分别为a组测量结果的解码图、测量点云和表面图,(f)、(h)、(i)分别为b组测量结果的解码图、测量点云和表面图。该实验验证了空间周期性可用于实时测量系统中,在保证测量分辨率的条件下,引入空间周期性减少了编码模式的个数,从而满足了实时测量的要求。

## 6 结 论

本文通过对条纹变形机理的分析,明确了该

偏移量的极限情况,从而证明了空间周期性被应用到编码光设计的可行性和条件,并论证了空间周期性应用到编码光设计中的必要性,提出将空间周期性应用到结构光编码中,将使系统测量的分辨率和实时性有很大的提高。结合时空编码方式,本文提出了一种新的实时编码光设计方案——周期时空条纹编码。所提出的周期空间条纹编码方式充分利用了空间周期性,在保证测量分辨率、精度和解码复杂度的情况下,减弱了对时间连续性的依赖,可用于对动态场景的实时测量。和其他编码光进行了性能比较,实验结果验证了空间周期性应用到编码光设计中的有效性。

### 参考文献:

- [1] JOAQUIM S, JORDI P, JOAN B. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(4):827-849.
- [2] 祝世平, 强锡富. 工件特征点三维坐标视觉测量方法综述[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(2):192-197.  
ZHU SH P, QIANG X F. Analysis of 3D coordinate vision measuring methods with feature points and workpiece[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2):192-197. (in Chinese)
- [3] 田庆国, 葛宝臻, 杜朴, 等. 基于激光三维扫描的人体特征尺寸测量[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1):84-88.  
TIAN Q G, GE B ZH, DU P, *et al.*. Measuring of human figure size based on laser 3D scanning[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1):84-88. (in Chinese)
- [4] MOUADDIB E B, SALVI J. Recent progress in structured light in order to solve the correspondence problem in stereo vision[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997, 1:130-136.
- [5] 董斌, 尤政, 李颖鹏, 等. 基于空间二进制编码的3D形貌测量方法[J]. *光学技术*, 1999, 5:33-36.  
DONG B, YOU ZH, LI Y P, *et al.*. A novel 3D range image measurement method based on spatial binary code[J]. *Optical Technology*, 1999, 5:33-36. (in Chinese)
- [6] HORN E, KIRYATI N. Toward optimal structured light patterns[J]. *Image and Vision Computing*, 1999, 17(2):87-97.
- [7] SATO K. Range imaging based on moving pattern light and spatio-temporal matched filter[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 1996, 1:33-36.
- [8] CARRIHILL B, HUMMEL R. Experiments with the intensity ratio depth sensor[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1985, 32:337-358.
- [9] TAJIMA J, IWAKAWA M. 3-D data acquisition by rainbow range finder[C]. *International Conference on Pattern Recognition*, 1990:309-313.
- [10] HOLT H, RUSINKIEWICZ S. Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects[C]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2001:359-366.
- [11] DAVIS J, NEHAB D, RAMAMOORTHI R, *et al.*. Spacetime stereo: a unifying framework for depth from triangulation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(2):296-302.
- [12] GUAN C H, LAU L G, D L. Composite structured light pattern for three-dimensional video[J]. *Optics Express*, 2003, 11(5):406-417.
- [13] 张吴明, 钟钧先. 结构光编码的MATLAB程序优化设计[J]. *光学技术*, 2003, 29(4):493-497.  
ZHANG W M, ZHONG Y X. MATLAB program

optimization design of structured light binary code [J]. *Optical Technology*, 2003, 29(4):493-497. (in Chinese)

[14] PAGES J, SALVI J, COLLEWET C, *et al.*. Opti-

mised De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(8):707-720.

#### 作者简介:

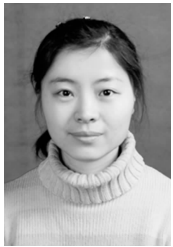


许 丽(1978—),女,河南郑州人,博士,2000年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2006、2009年分别于上海大学获得硕士学位、博士学位,主要从事图像处理、视觉检测、三维建模等方面的研究。E-mail: xuli\_yh@shu.edu.cn

#### 导师简介:



张之江(1968—),男,上海人,教授,博士生导师,1999年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事图像处理、视觉检测、数字全息和三维显示等方面的研究。E-mail: zjzhang@shu.edu.cn



陈黎霞(1979—),女,河南郑州人,讲师,2002年于郑州大学获得学士学位,2005年于郑州大学获得硕士学位,主要从事信号处理、图像处理等方向的研究。E-mail: chenlixia@ncwu.edu.cn

#### ● 下期预告

## 稀疏采样傅里叶望远镜成像

刘欣悦,董 磊,王建立

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

为了实现傅里叶望远镜快速成像,提出了一种稀疏采样图像重构方法,并对利用稀疏傅里叶样本精确重构目标图像的问题进行了研究。首先,基于压缩感知理论,并考虑到目标图像在变换域的稀疏性或可压缩性,建立稀疏采样图像重构问题的优化模型。然后,构造适当的随机稀疏采样模板,对目标图像的傅里叶分量进行采样测量。最后,利用随机稀疏测量样本,通过非线性优化精确重构目标图像。实验结果表明,对实际的卫星图像,利用20%~30%随机测量样本非线性重构图像与利用全部测量样本直接重构图像的均方误差仅为4%~6%。该方法利用随机稀疏傅里叶样本能够实现精确的图像重构,而且大大减少了测量样本的数量,从而有效降低了实现快速成像对傅里叶望远镜系统的成本和复杂性要求。