(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 102322823 A
(43)申请公布日 2012.01.18

(21)申请号 201110269401.3

(22)申请日 2011.09.13

(71)申请人 四川大学
地址 610065 四川省成都市武侯区一环路南一段 24 号

(72)发明人 刘元坤 苏显渝 张启灿 向立群

(51)Int.Cl.
G01B 11/25(2006.01)

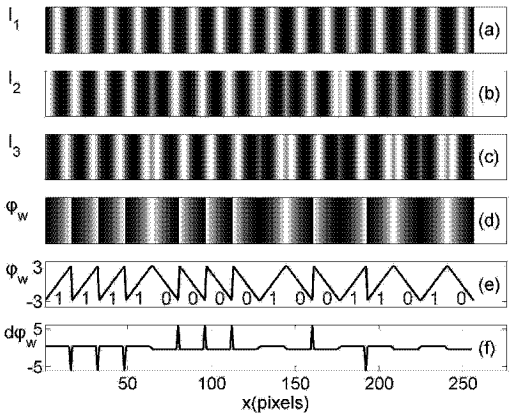
权利要求书 1 页 说明书 4 页 附图 4 页

(54)发明名称

基于相位级次自编码的光学三维测量方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于相位级次自编码的光学三维测量方法。在传统的相位测量技术中，通常需要投影额外的编码图案，以实现孤立物体的三维面形测量，本发明提出数字投影具有相位级次编码信息的正弦条纹，将相位分布的微分值或斜率值作为编码通道，各条纹周期作为一个编码单元，构造一个总长度等于投影条纹周期总数的代码序列，再由若干相邻周期构成一个代码子序列，通过查找代码子序列在总代码序列中的位置可以确定该周期的相位级次，从而得到待测物体的绝对相位分布，最后再根据相位高度关系重建出待测物体的三维面形。本发明无需投影额外的编码图像，即可完成物体三维信息获取，特别适用于孤立物体的快速三维面形测量。



CN 102322823 A

1. 一种基于相位级次自编码的光学三维测量方法，其特征在于将编码信息加载于待投影的正弦条纹相位分布中，首先构造一个代码序列，每个码元对应一个条纹周期，其码元值为 0 或 1，由每个码元和其相邻若干码元构成一个代码子序列，使得每一个代码子序列在整个代码序列中不重复出现、从而保证其唯一性，并且各代码子序列在整个代码序列中的位置即为相应条纹周期的级次，按照此代码序列就可以构造出具有编码信息的相位分布；然后再根据此已编码好的相位分布生成相应的相移正弦条纹图；测量时由数字投影设备投影具有相位自编码信息的相移正弦条纹图，根据相移技术计算出截断相位分布，并从中提取出各条纹周期的编码信息，即可确定各条纹周期级次，从而得到待测物体的绝对相位分布，再根据已知的相位与高度关系即可完成待测物体的三维面形重建，本发明不需要投影额外的编码图像，尤其适用于孤立物体的快速三维面形测量。

2. 按照权利要求 1 所述的方法，其特征在于所说的将编码信息加载于待投影的正弦条纹相位分布中，是根据相位分布的微分值或斜率的正负建立码元值与条纹周期的对应关系，微分值或斜率为正的条纹周期码元值为 1，微分值或斜率为负的条纹周期码元值为 0，反之亦然。

3. 按照权利要求 1 所述的方法，其特征在于所说的由编码相位分布生成相移正弦条纹图，是将编码相位分布用于产生相移正弦条纹的公式中，可以构造出任意帧相移正弦条纹，包括 N 帧满周期相移正弦条纹图和 N 帧任意步长相移正弦条纹图等，其中 $N \geq 3$。

4. 按照权利要求 1 所述的方法，其特征在于所说的投影具有相位自编码信息的相移正弦条纹图，当采用三帧相移时，即投影三幅正弦条纹图，可以通过 RGB 颜色耦合方法将包含有编码信息的三幅正弦条纹图叠加在一幅彩色图像中，投影设备只需投影一幅彩色正弦条纹图像，再通过 RGB 颜色分离技术，可以从拍摄到的变形彩色正弦条纹图像中分离出具有编码信息的三幅正弦条纹图。

基于相位级次自编码的光学三维测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光学三维传感技术，特别是涉及基于相位测量轮廓术对空间孤立物体的三维面形测量。

背景技术

[0002] 三维物体表面轮廓测量，即三维面形测量，在机器视觉、生物医学、工业检测、快速成型、影视特技、产品质量控制等领域具有重要意义。光学三维传感技术，由于其具有非接触、精度高、易于自动控制等优点获得很大发展。现有的光学三维传感方法主要包括：三角测量法、莫尔条纹法 (Moiré Topography, 简称 MT)、傅里叶变换轮廓术 (Fourier Transform Profilometry, 简称FTP)、空间相位检测术 (Spatial Phase Detection, 简称 SPD)、相位测量轮廓术 (Phase Measuring Profilometry，简称 PMP) 等，这些方法都是通过解调受三维物体面形调制的空间结构光场，以获得三维物体面形的高度信息。其中最常用的空间结构光场三维传感方法是傅里叶变换轮廓术和相位测量轮廓术。傅里叶变换轮廓术是通过对变形条纹图像进行傅里叶变换、频域滤波和逆傅里叶变换等步骤实现的。相位测量轮廓术需要从多帧相移条纹图形来重建三维面形，具有很高的精度，但在传统的相位测量技术中，在测量不连续物体时，相位展开是一个难题，此时通常需要投影额外的编码图案，如时间相位展开法或正弦条纹投影与格雷码方法相结合等，但是由于投影了额外编码图案使得这些方法不适用于对不连续物体场景的快速三维测量。

发明内容

[0003] 本发明针对传统相位测量轮廓术中，在测量不连续物体时，需要投影额外的编码图案，提出采用数字投影设备投影具有相位级次编码信息的正弦条纹，将相位分布的微分值或斜率作为编码通道，完成对各条纹级次的编码，因此无需投影额外的编码图像，即可完成对空间不连续物体的三维面形测量。

[0004] 本发明的目的采用下述技术方案来实现：

设计具有编码信息的相位分布，根据编码相位分布产生用于数字投影设备投影的 N 帧相移正弦条纹 ($N \geq 3$)，在编码相位分布中，每个条纹周期作为一个编码单元，码值为 1 或 0，分别对应编码相位微分值或斜率值的正或负，从而设计构造出一个总长度等于投影条纹周期数的代码序列，完成对各条纹级次的编码；在测量时，投影 N 帧相移条纹图，再根据相移算法计算出截断相位分布，由其微分值或斜率值确定当前周期码值，然后将该码值与其相邻若干周期码值组成一个代码子序列，通过查找该子代码序列在预先设计的代码序列中的位置，就可以确定当前周期的级次，从而得到待测物体的绝对相位分布，再根据已知的相位与高度关系即可完成待测物体的三维面形重建；最后再采用希尔伯特变换修正因编码引起的局部相位误差。与传统的相位测量轮廓术相比，新的方法不需要投影额外的编码图像，尤其适用于孤立物体的快速三维面形测量。

[0005] 本发明与现有技术相比有如下优点：

1、本发明将相位级次信息编码在相位分布中，使得在进行光学三维测量时，不需要投影额外的编码图像，即可获取待测物体的绝对相位分布；

2、本发明可以根据待测物体的大小，调整代码序列长度，实现对不同尺寸物体的测量；

3、本发明与高速投影和记录设备相结合，特别适合于实现孤立物体的快速运动面形测量。

附图说明

[0006] 图 1 为系统的光路示意图。

[0007] 图 2 为传统的三帧相移条纹图，其中 a) 第一帧条纹，b) 第二帧条纹，c) 第三帧条纹，d) 截断相位，e) 截断相位剖面。

[0008] 图 3 为本发明中提到的基于相位级次自编码的三帧相移条纹图，其中 a) 第一帧条纹，b) 第二帧条纹，c) 第三帧条纹，d) 截断相位，e) 截断相位剖面与编码值，f) 截断相位微分。

[0009] 图 4 为本发明中编码信息引入的相位测量误差，其中 (a)~(d) 为三帧条纹图及截断相位，(e)~(h) 为条纹图和截断相位剖面及条纹编码值，(i) 为展开相位与传统相移结果差。

[0010] 图 5 为采用希尔伯特变换修正局部相位误差，其中 (a) 余弦条纹，(b) 余弦条纹剖面，(c) 正弦条纹，(d) 正弦条纹剖面，(e) 截断相位分布，(f) 希尔伯特变换修正后相位与传统 3 步相移结果之差。

[0011] 图 6 为本发明的测量流程图。

[0012] 图 7 为实施例中的测量结果，其中 a) 第一帧条纹，b) 第二帧条纹，c) 第三帧条纹，d) 截断相位，e) 绝对相位。

具体实施方式

[0013] 下面结合附图、工作原理及实施例对本发明作进一步详细说明。

[0014] 相位级次自编码的相位测量方法所采用的光路与传统的相位测量轮廓术测量光路相似。图 1 为三维成像系统示意图，系统由投影仪和摄像机构成，投影仪投出正弦条纹，摄像机在另一位置拍摄被物体表面形貌调制的变形条纹，通过分析拍摄到的图像计算出相位分布，再根据相位与高度关系可以重建出待测物体的三维面形分布。

[0015] 由计算机生成的待投影 N 帧相移正弦条纹图，其强度分布可以表示为：

$$I(x) = a + b\cos\left(\frac{2\pi}{p}x + \frac{n}{N}2\pi\right) \qquad (1)$$

其中 a 为直流分量，b 为调制度，p 为条纹周期，N 为相移帧数，n=0, 1, …, N-1 表示第 n 帧条纹图。x 为投影仪像素坐标，若令 $\Phi = 2\pi x/p$，那么 Φ 和 x 一样均为单调连续分布的。实际上，由于相移技术采用反三角函数计算相位，使得相位分布介于 $[-\pi, \pi]$，表示为 Φ_w，因此，可以采用截断相位分布 Φ_w 替代连续相位 Φ，用于产生要投影的标准正弦条纹图样，其强度分布为：

$$I(x) = a + b\cos(\varphi_w + \frac{n}{N}2\pi) \quad (2)$$

在相位级次自编码技术中，首先设计编码相位，根据编码相位生成待投影的 N 帧相移条纹。在编码相位中，将每个周期作为一个编码单元，其编码值为 1 或 0，分别对应相位分布的微分值正或负，或斜率值正或负，完成对条纹级次的空间标记编码。在测量时，按顺序投影 N 帧相移正弦条纹图像，根据相移技术计算出截断相位，再做相应的解码，从而获取待测物体的绝对相位。

[0016] 为了叙述的方便，我们以三帧满周期相移为例来说明本发明的编码思想，这里选用相位分布的微分值正负来判断条纹周期的码值，同样，也可以采用相位分布的斜率值正负来判断条纹周期码值。图 2 为传统的三帧相移条纹图，其中图 2a-c 为条纹图，图 2d 为截断相位分布，图 2e 为截断相位分布的剖面图，图 3 为根据预先设计的编码相位分布产生的三帧相移条纹图，其中图 3a-c 为条纹图，图 3d 为截断相位分布，图 3e 为截断相位分布的剖面图和各条纹周期的码值，代码序列为“1111000010011010”， 图 3e 为该行截断相位分布的微分值，微分值的正负与各条纹周期的码值对应。在测量待测物体时，根据相移算法可以从三帧变形条纹图中计算出对应的截断相位分布：

$$\varphi_w(x,y) = \arctan\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x,y)\sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x,y)\cos(2\pi n/N)} \quad (3)$$

由截断相位微分值的正负就能够判断各周期的码值，再由当前周期及其相邻若干周期编码信息可以构成一个子代码序列，而所构造的代码子序列具有唯一性，即在整个代码序列中只出现一次，通过与整个代码序列进行匹配，即可确定各周期级次。根据已知的代码序列，在图 3 中子代码序列长度为 4，那么若一个条纹周期的子代码序列为“1111”，通过在整个代码序列进行匹配，可知该条纹周期级次为 1，“1110”对应的周期级次为 2，“1100”对应的周期级次为 3 等等。

[0017] 在设计用于产生编码相位分布的代码序列，为了满足代码子序列的唯一性，代码子序列长度与整个代码序列长度应满足以下要求：

$$2^k \geq M \quad (4)$$

其中 k 为子代码序列长度，M 为整个代码序列长度。如果正弦条纹图共有 64 个条纹周期，则子代码序列长度要大于等于 6，当条纹图有 32 个条纹周期，子代码序列长度需大于等于 5。

[0018] 在获取条纹周期级次 m 后，即可恢复待测物体绝对相位，所采用的算法为：

$$\begin{cases} \varphi_c(x,y) = \varphi_w(x,y) + 2m\pi & when \quad \text{code value} = 1 \\ \varphi_c(x,y) = -\varphi_w(x,y) + 2m\pi & when \quad \text{code value} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

这里 ϕ_c 为连续的绝对相位分布。

[0019] 在相位级次自编码技术中，当采用三帧相移时，即投影三幅正弦条纹图时，可以通

过 RGB 颜色耦合方法将包含有编码信息的三幅正弦条纹图叠加在一幅彩色图像中，此时投影设备仅需投影一幅彩色正弦条纹图像，再通过 RGB 颜色分离技术，可以从拍摄到的变形彩色正弦条纹图像中分离出具有编码信息的三幅正弦条纹图，然后再根据如前文所述的相位计算方法，可以完成待测物体的三维面形测量。

[0020] 在相位级次自编码技术中，根据码值的不同，将有 4 种组合，即 11， 10， 01， 00，其中 10 和 01 改变了原截断相位的单调性，使得截断相位分布在 $-\pi$ 或者 π 处出现拐点，由此生成的相移条纹图像中的某些帧条纹图像在这些区域的条纹质量将会降低，最终出现局部相位误差。图 4 为采用三帧相移对平面物体的实测数据，其中图 4(a)~(d) 为三帧条纹图及截断相位，图 4(e)~(h) 为条纹图和截断相位剖面及条纹编码值，图 4(i) 为展开相位与传统相移结果差。可以看出第一帧条纹图与传统 3 步相移的第一帧条纹图相同，第二、三帧条纹与传统 3 步相移的对应条纹有根本差别。并且第二、三帧图像在编码为 10 和 01 的位置条纹质量发生了降低，从而使得该处的相位测量结果存在较大误差，如图 4(i) 所示。造成这种现象的主要原因是光学系统的低通滤波本质。为此为了提高本发明的测量精度，需要进行局部相位校正，在本发明中我们采用希尔伯特变换对该位置的局部相位就行修正。

[0021] 在相移技术中，由公式 $\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x,y)\cos(2\pi n/N)$ 和 $\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x,y)\sin(2\pi n/N)$ 可以计算出几乎不含直流成分的 cos 和 sin 条纹分量，如图 5(a) 和 (c) 所示。根据已知的编码信息以及相移顺序可知，图 5(a) 中的 cos 条纹分量较少受编码引起的条纹失真影响。另外，相对于传统的 3 步相移，相位编码中的 sin 条纹分量在码元 10 转换拐点两边的采样点 p_1 和 p_2 处改变了相移方向，因此在 p_1 和 p_2 之间出现条纹局部失真。如果将 cos 条纹分量作为标准，选择图 5(d) 中所示的 p_1 和 p_2 所在周期 A 和 B，采用希尔伯特变换计算出新的 sin 条纹分量，再由反三角函数可以计算出新的相位分布，局部替代 p_1 和 p_2 之间的初始相位，修正结果与传统相移结果的误差分布如图 5(f) 所示。可以看出经过相位修正后，由于相位编码引起的、图 4(b) 所示的相位误差已被很好地消除了，最终保证了三维面形测量数据的质量。

[0022] 终上所述，本发明中编码投影条纹的产生以及测量中绝对相位计算过程可以用图 6 来表示。

[0023] 下面给出了本发明用相位级次自编码技术进行三维测量的一个实施例，本发明包含但不限于此实施例中的内容。

[0024] 在本实施例中，用 LCD 投影仪和摄像机搭建了测量系统。LCD 的分辨率为 1024×768 pixels ，摄像机分辨率为 1280×1024 pixels，投影条纹的周期为 16 像素，即投影条纹共有 64 个条纹周期，因此子代码序列长度至少要不小于 6，才能保证各子代码序列的唯一性，采用的代码序列为“1111110000001000011000101000111001001011001101001111010101011 10110”。测量过程中仅需获取 3 帧相移图像，即可根据本发明提出的方法计算出待测物体的绝对相位分布。

[0025] 测量对象为一个孤立物体—风扇叶片，测量结果如图 7 所示，其中图 7a-c 为三帧相移条纹图，图 7d 为截断相位分布，图 7e 为绝对相位分布。这样的孤立物体如果采用传统的相移技术进行重建，必须投影投影标记图案，标记孤立区域之间的相对关系，才能完成三维面形测量。

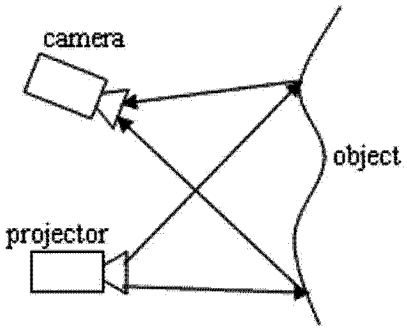

camera
object
projector

图 1

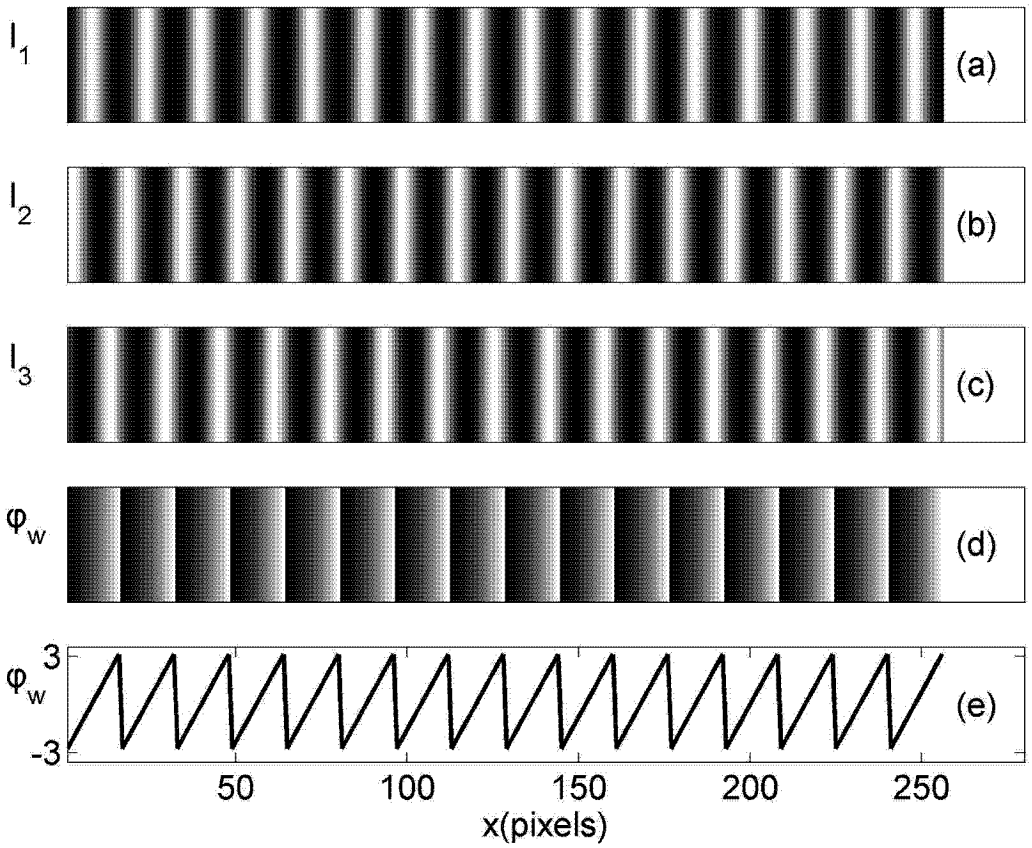

I1
(a)
I2
(b)
I3
(c)
φw
(d)
φw
3
-3
(e)
50
100
150
200
250
x(pixels)

图 2

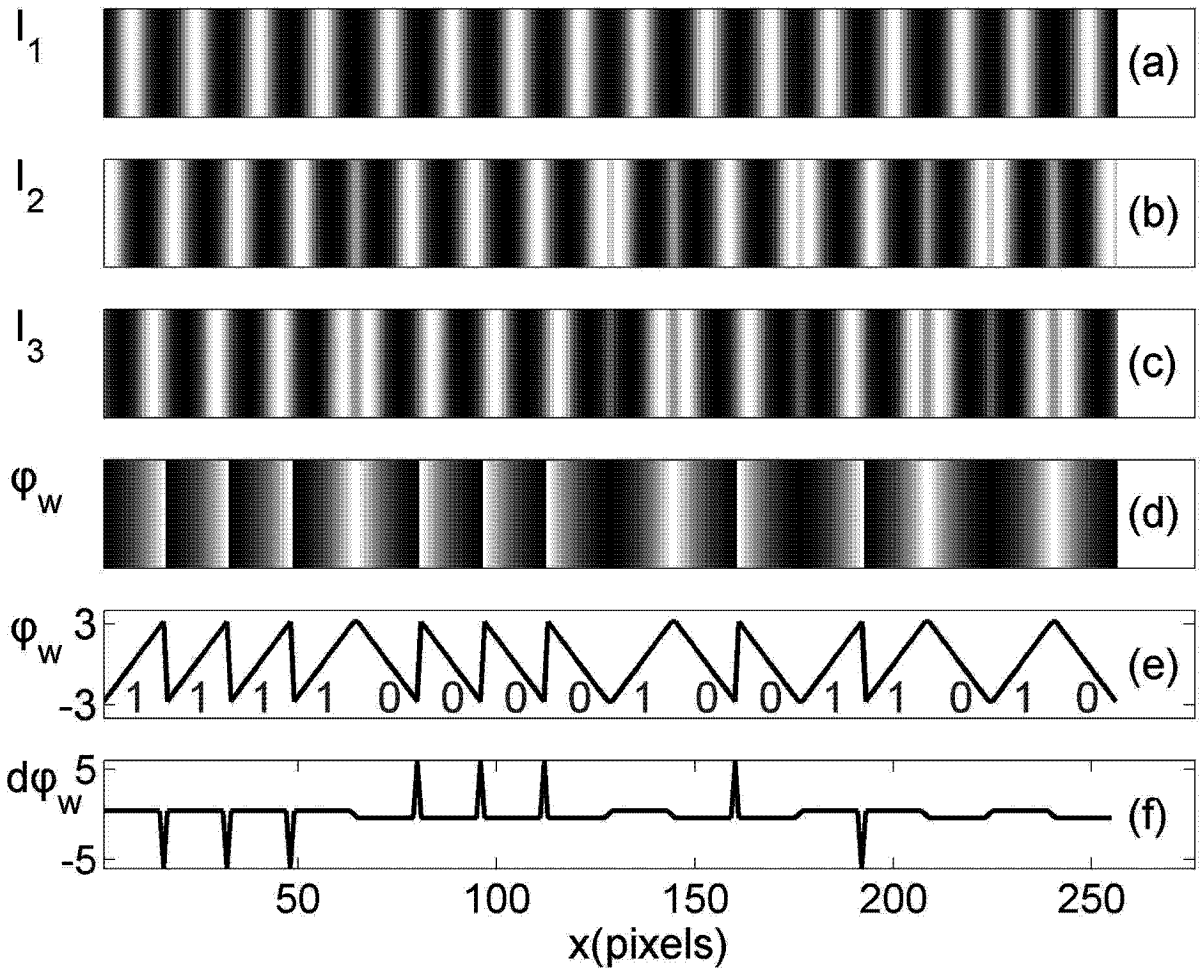

I1
(a)
I2
(b)
I3
(c)
φw
(d)
φw 3
-3
1 1 1 1 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0
(e)
dφw 5
-5
(f)
50 100 150 200 250
x(pixels)

图 3

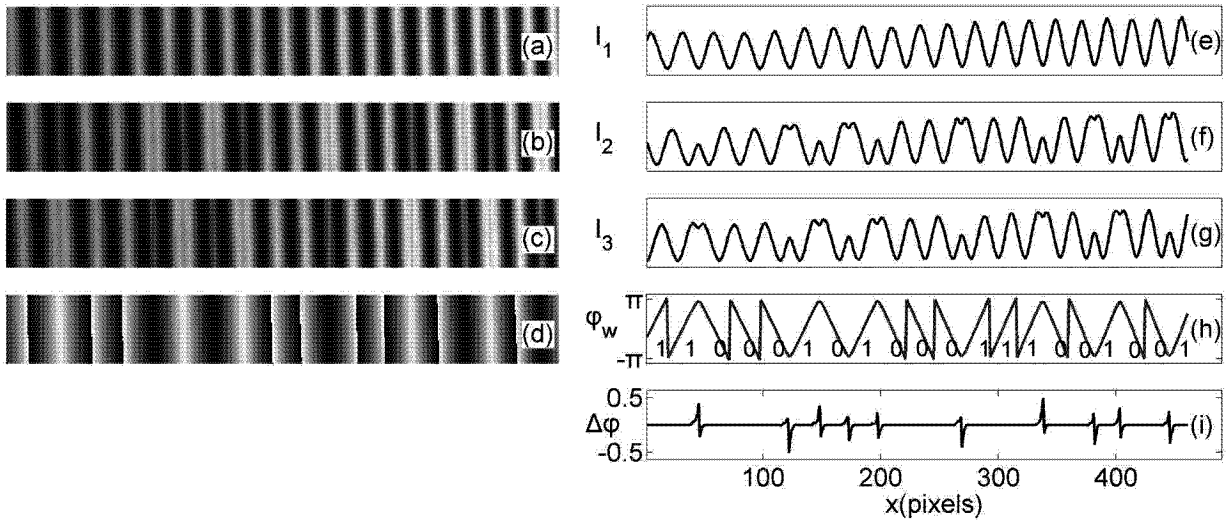

(a)
(b)
(c)
(d)
I1
(e)
I2
(f)
I3
(g)
φw π
-π
1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0 1
(h)
0.5
Δφ
-0.5
(i)
100 200 300 400
x(pixels)

图 4

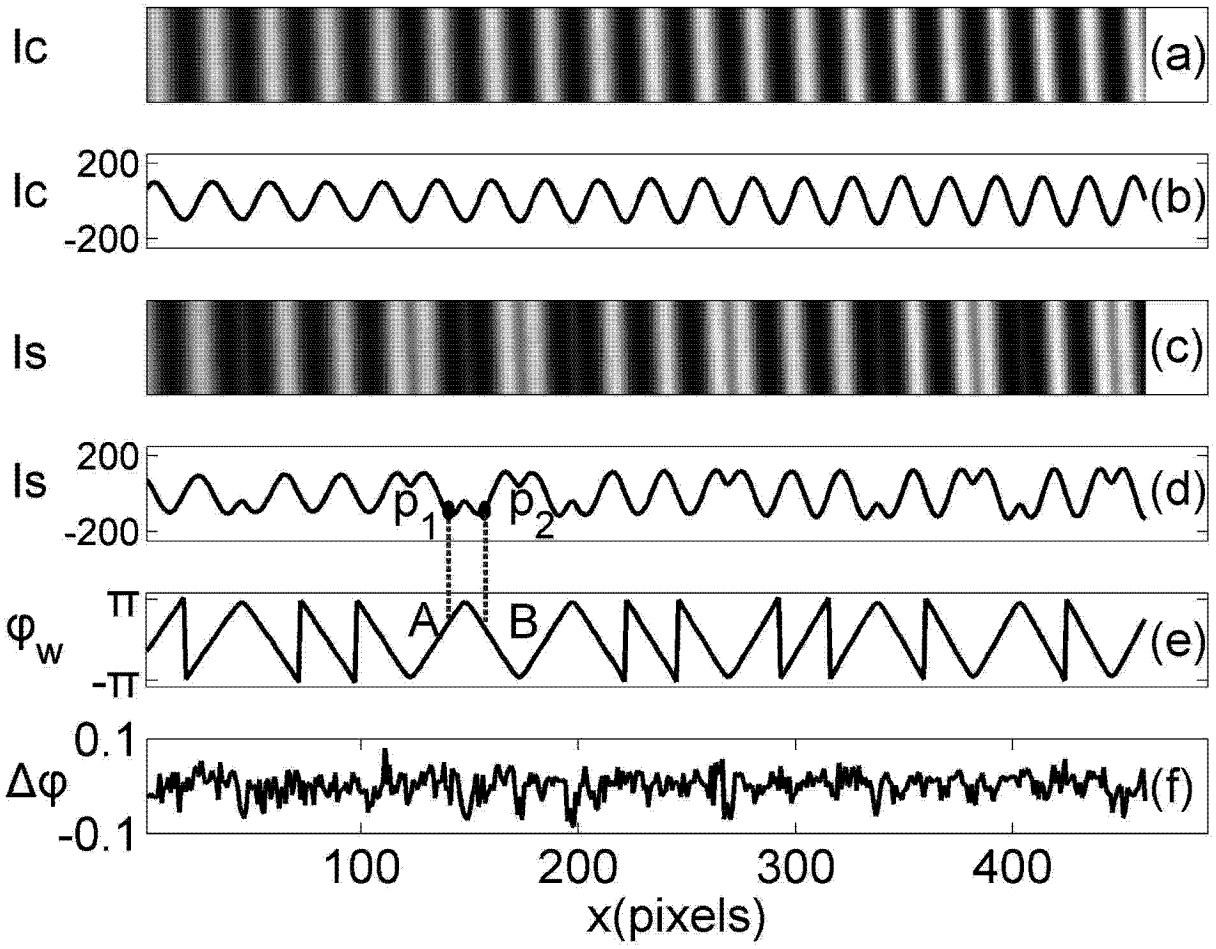

Ic
(a)
Ic
200
-200
(b)
Is
(c)
Is
200
-200
p1
p2
(d)
φw
π
-π
A
B
(e)
Δφ
0.1
-0.1
(f)
100
200
300
400
x(pixels)

图 5

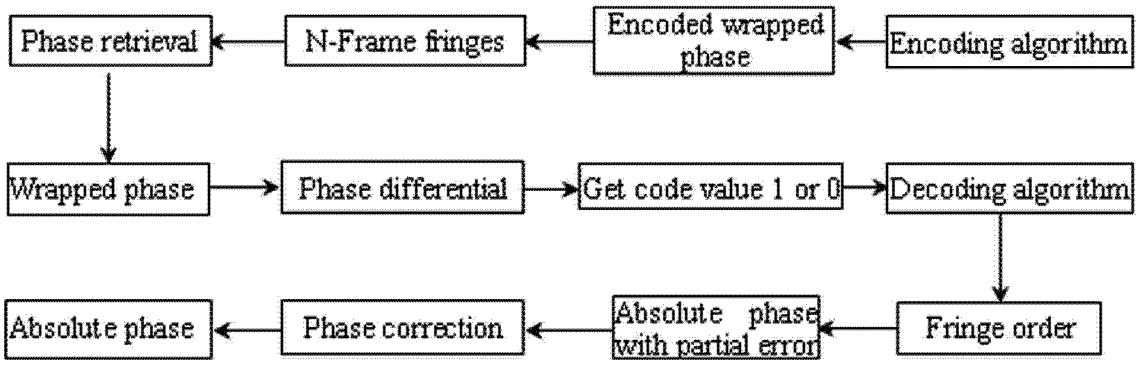

Phase retrieval
N-Frame fringes
Encoded wrapped phase
Encoding algorithm
Wrapped phase
Phase differential
Get code value 1 or 0
Decoding algorithm
Absolute phase
Phase correction
Absolute phase with partial error
Fringe order

图 6

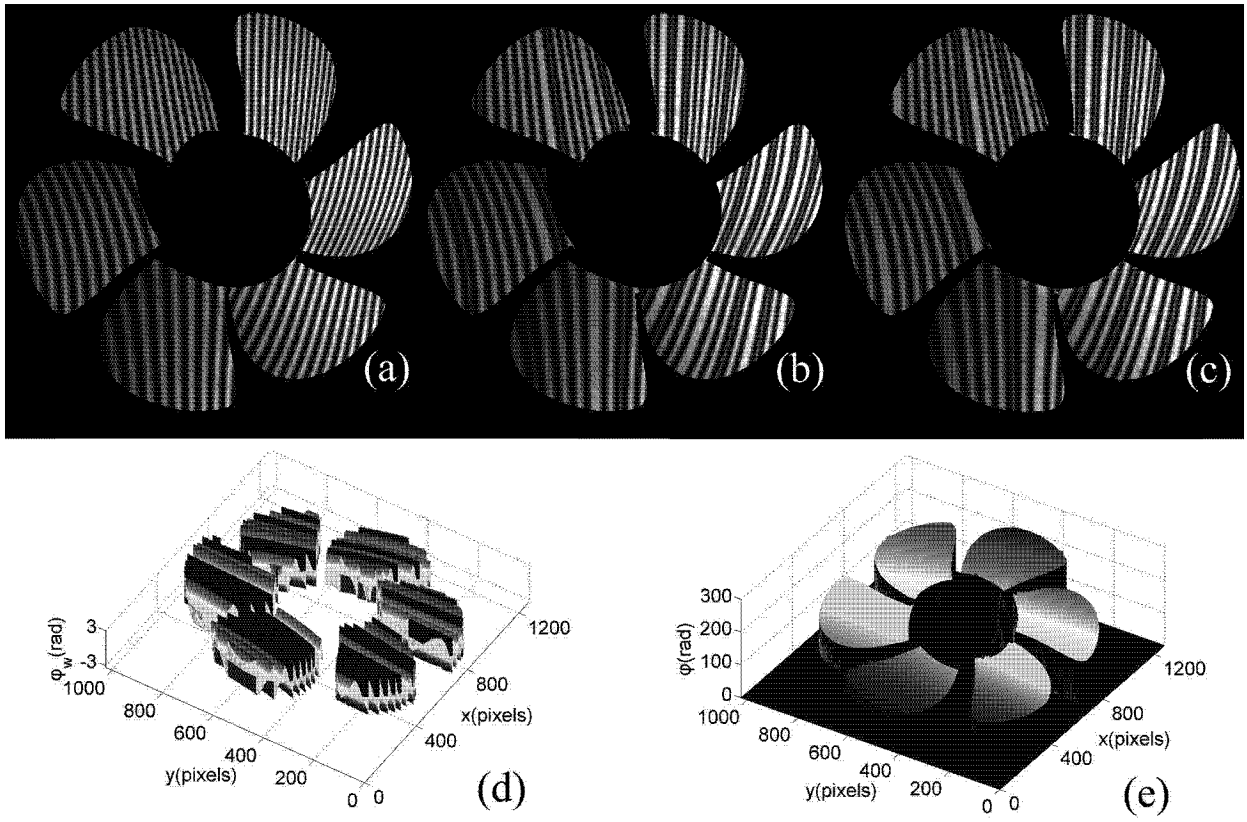

(a)
(b)
(c)
φ_w(rad)
3
-3
1000
800
600
400
200
0
y(pixels)
0
400
800
1200
x(pixels)
(d)
φ(rad)
300
200
100
0
1000
800
600
400
200
0
y(pixels)
0
400
800
1200
x(pixels)
(e)

图 7