

结合条纹和伪随机结构光投影的三维成像

何 懂¹ 刘晓利¹ 殷永凯¹ 刘则毅¹ 彭 翔^{1,2}

(¹ 深圳大学光电工程学院教育部/广东省光电子器件与系统重点实验室, 广东 深圳 518060)
(² 天津大学精密仪器与光电子工程学院精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 结合条纹和随机图案投影的优点,提出了一种基于条纹投影相移和伪随机图案相结合的三维成像方法。所提方法仅需投影四幅等步相移的正弦条纹图和一幅伪随机结构光图案,结合极线约束条件和图像相关技术,建立左右两相机折叠相位的相互对应关系,在相互对应的折叠相位中,用相位值作为编码来实现双目对应匹配,故不需要对折叠相位进行展开便可实现三维重建。实验结果表明,与传统方法相比,所提方法减少了图像序列采集时间,其三维重建结果的致密性、稳健性以及精度都未受影响。

关键词 机器视觉; 条纹分析; 数字图像相关; 对应点匹配

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0209021

Three-Dimensional Imaging Based on Combination Fringe and Pseudorandom Pattern Projection

He Dong¹ Liu Xiaoli¹ Yin Yongkai¹ Liu Zeyi¹ Peng Xiang^{1,2}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Education of Ministry and Guangdong Province, College of Optoelectronics Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

²State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A new three-dimensional (3D) imaging method that combines both fringe projection and pseudorandom pattern projection technique is presented. In proposed approach, we only need to project four equal-step phase-shift images and a pseudorandom pattern image. Combined with the epipolar constraint and image correlation, the congruent relationship of the wrapped phase between left and right cameras is obtained. In each corresponding folding phase, the phase values as coding can implement the binocular matching, so 3D reconstruction can be realized without phase unwrapping. The experimental results show that the proposed method can reduce the time of image sequence acquisition, comparing with conventional fringe projection technique. In addition, the compactness, robustness and accuracy of 3D image have not been affected.

Key words machine vision; fringe analysis; digital image correlation; matching corresponding points

OCIS codes 150.0155; 100.2000; 100.2650

1 引 言

被动双目立体视觉是一类常见的三维成像技术,其基本原理是由左右两个相机获取有视差的图像,通过图像处理技术得到两图像的双目点对应关系,利用三角测量原理计算获得物体的三维信息。

其中,确定双目点对应关系是一个关键的技术环节。在很多情况下,双目图像缺乏明显的可辨析特征,往往使得被动三维成像很难得到高精度、高致密性的深度图像数据,因此限制了被动三维成像在工业测量等领域的应用。

收稿日期: 2013-10-31; **收到修改稿日期:** 2013-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(61377017,61201355)

作者简介: 何 懂(1985—),男,博士研究生,主要从事光学测试技术、三维数字成像等方面的研究。

E-mail: hedongsky@126.com

导师简介: 彭 翔(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事三维成像与造型、光学成像与测量、光学信息安全等方面的研究。E-mail: xpeng@szu.edu.cn (通信联系人)

利用结构光照明的主动三维成像技术能够很好地解决对应点匹配问题。诸多学者对主动三维成像技术做了深入研究:Morano等^[1]用投影仪投射设计的伪随机编码,利用随机编码在相机和投影仪之间查找双目点对应关系,这样由投影仪和相机构成的双目立体视觉系统相比于被动立体视觉更能有效地建立双目之间的点对应关系;Zhang等^[2]利用投影机投射伪随机散斑图案到被测物体表面后,通过图像相关技术处理左右相机图像,获取双目对应点的关系,从而重建物体表面致密的三维深度像;Schaffer等^[3]用激光散斑投影代替数字散斑投影,优点是投影机构不需要时间积分,投影速度大大提高,可以快速实时地获取物体表面的深度像。国内苏显渝课题组对基于数字散斑投影的对应点查找问题也做了卓有成效的研究^[4-5]。由于左右相机视角不平行,被测物体表面同一区域在左右相机对应图像区域面积往往不一样,这就造成对应区域图像的相关性退变^[6]。

相位辅助双目立体视觉是另一重要的主动三维成像技术^[7-8]。该方法通常利用数字投影仪或机械光栅将一组正弦条纹投射至物体表面,通过相移技术或者傅里叶变换处理双相机采集的受物体调制的正弦条纹,通过条纹自动分析获得折叠相位图。然后,对折叠相位进行展开得到物体表面的绝对相位。一般地,单幅折叠相位图所含的信息不足以恢复物体的绝对相位。目前已发展多种采用附加图像序列确定折叠相位级次的相位展开方法,最为常用的有基于格雷码相位展开和时间相位展开^[9]。相对于散斑投影,基于相位辅助的三维成像有如下优点:每一个像素都有唯一的编码(两个正交方向的绝对相位或者在极线约束的条件下单方向的绝对相位);相位信息有很好的稳健性,受环境光照和物体表面反射率影响小;连续表面对应的相位信息是连续的,因此可以获得数据密度很高的深度图像。无论是格雷码相位展开,还是变频的时间相位展开都需要采集若干幅图像用以确定折叠相位的展开级次,所以基于相移辅助的三维成像采集的图像序列比较长。

本文提出一种结合正弦条纹和伪随机散斑投影的相位辅助三维成像技术。该方法采集四幅等步相移图像和单幅伪随机结构光图像,借助伪随机图像确定左右相机获取折叠相位相互之间的对应关系。在相互对应的折叠相位区间内,利用极线约束,依据唯一相位编码进行双目对应点搜索。

2 结合条纹和伪随机结构光投影的编码方案

设计伪随机结构光对折叠相位区域进行编码,并据此确定左右相机折叠相位的相互对应关系。在相互对应的折叠相位区间上,相位值是唯一的,可以以相位值为依据进行亚像素插值,确定双目点对应关系。再利用标定模型^[10]和三角测量原理,实现双目重建。系统如图1所示, C_l 、 C_r 分别双目系统的左右相机, P 为结构光投影机构。关于相机成像模型、双目系统标定过程、三维重建原理等基本理论可参见文献^[7],这里不再赘述。以下重点讨论编码方案涉及的关键问题,包括极线校正、折叠相位编码、伪随机的投影结构光等。

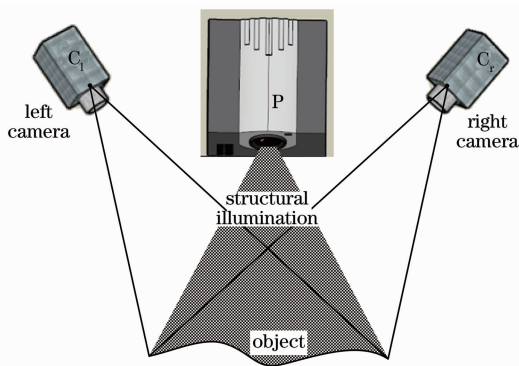


图1 结构光辅助的双目立体视觉系统

Fig. 1 Phase-aided binocular stereo vision system

2.1 极线矫正

基于相位辅助的三维成像主要有两类:一是双向的正交相位对视场内每一个像素赋予唯一的相位编码;二是结合极线约束,根据极线方向的绝对相位,对极线上的点进行一维相位编码,从而实现双目对应点查找。

在双目视觉系统中,空间中一点 P ,在左右相机的图像投影点 p_l 、 p_r 满足极线约束关系,如图2所示。左图的像点 p_l 在右图上的对应点 p_r 必定在极线 l_r 上,同理 p_r 在左图上的对应点 p_l 也必定在极线 l_l 上,即 $\mathbf{p}_r^T \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{p}_l = 0$,其中 $\mathbf{p}_r, \mathbf{p}_l$ 为点 p_r, p_l 对应的向量, \mathbf{F} 为基本矩阵^[11]。极线矫正的目的是将一般的双目立体结构变换为标准极线的几何结构,使得共轭极线 l_l, l_r 均与 u 轴平行,并沿 v 轴方向有着相同的纵坐标,从而使得对应点查找只需沿一维搜索,提高查找效率。

极线向量可表达为

$$l_r = \mathbf{F} \cdot \mathbf{p}_l, \quad (1)$$

$$l_l = \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{p}_r, \quad (2)$$

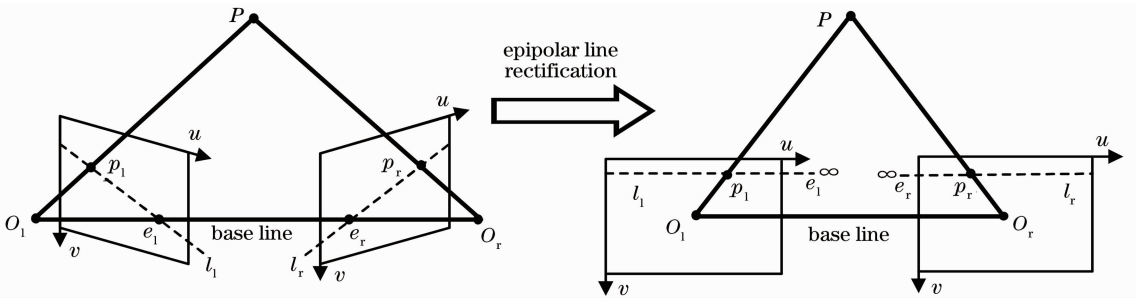


图 2 极线矫正

Fig. 2 Epipolar lines rectification

式中基本矩阵 \mathbf{F} 可以由标定所得的相机内外参数计算得到^[12-13]。

极线矫正过程的本质是将极线变换成与图像坐标 u 轴平行的直线。由极线约束可知:所有的极线都相交于极点 e , 此时点 e 有 u 轴的无穷远处。极线校正的图像应满足如下两条条件: 1) 极点位于无穷远处, 即极点对应向量由 $\mathbf{e} = (u_0, v_0, 1)^T$ 变换为 $\mathbf{e}' = (u_0, 0, 0)^T$; 2) 在变换中, v 轴上任意点 A 像素位置保持不变, 即点 A 对应向量 $\mathbf{A} = (0, a, 1)^T$ 经过变换后仍为 $\mathbf{A}' = (0, a, 1)^T$ 。

根据上面两条件可得, 将极点对应向量 $\mathbf{e} = (u_0, v_0, 1)^T$ 变换至无穷远 $\mathbf{e}' = (1, 0, 0)^T$ 的变换矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{e}' = \mathbf{H}\mathbf{e} \\ \mathbf{e} = [u_0 \ v_0 \ 1]^T \Rightarrow \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1/u_0 & 0 & 0 \\ -v_0/u_0 & 1 & 0 \\ -1/u_0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{e}' = [1 \ 0 \ 0]^T \end{cases} \quad (3)$$

在已标定的双目立体视觉系统中, $\mathbf{K}_l, \mathbf{K}_r$ 为别为左右相机的内参矩阵, \mathbf{R}, \mathbf{T} 为左右相机的旋转和平移矩阵。左右相机的极点对应向量 $\mathbf{e}_l, \mathbf{e}_r$ 可以表示为

$$\mathbf{e}_l = \mathbf{K}_l \cdot \mathbf{R}^T \cdot (-\mathbf{T}), \quad (4)$$

$$\mathbf{e}_r = \mathbf{K}_r \cdot \mathbf{T}, \quad (5)$$

将(4)、(5)式代入(3)式的 \mathbf{e} 可以得到左右相机的极线校正变换矩阵 $\mathbf{H}_l, \mathbf{H}_r$ 。

在左相机任一点 x_l 经极线校正变换后, 为对应向量 $\mathbf{x}'_l = \mathbf{H}_l \cdot \mathbf{x}_l$; 对应右相机有, 对应向量 $\mathbf{x}'_r = \mathbf{H}_r \cdot \mathbf{x}_r$, 然后以左图像平面的极线位置为基准, 调整右图像平面上的极线, 使共轭的极线在同一直线上, 有共同的纵坐标。经过极线矫正后, 双目对应点查找只需图像在横坐标方向一维搜索。

2.2 确定折叠相位的相互对应关系

在任意折叠相位区域中, 沿着极线方向的相位

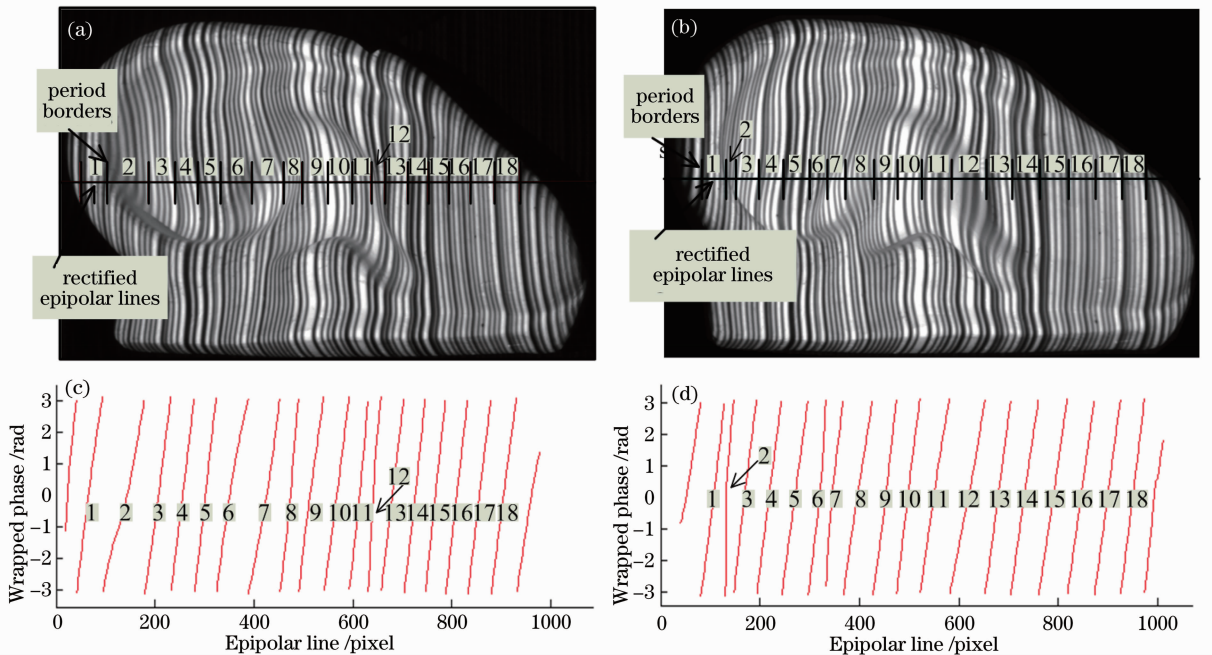


图 3 折叠相位相互对应示意图

Fig. 3 Correspondence of wrapped phase

分布都是从 $-\pi$ 到 π 单调变化的,因此只需要确定左右相机折叠相位的对应关系。借助伪随机结构光投影来对折叠相位进行编码,利用图像相关技术来确定左右相机中被同一编码结构光照明的折叠相位区域,进而在这相互对应的折叠相位区间内进行左右相机的双目对应点查找。如图3所示,图3(a)和(b)分别为左右相机采集到的结构光图案,通过极线矫正,共轭的极线有相同的纵坐标,相位边缘是由折叠相位的跳变确定。图3(c)和(d)分别是沿图3(d)和(b)所示的极线方向上的折叠相位。

由左右相机采集到四步相移图,求其折叠相位确定的相位边界,分别把伪随机结构投影图的共轭极线 l_l^* 和 l_r^* 分成 n, m 部分,记为 $S_l = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_n\}, S_r = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_m\}$ 。在 S_l 和 S_r 之间利用图像相关技术寻找对应折叠相位区间的相关峰值,以此来确定相互对应的折叠相位。有各种不同的相关测度函数来确定图像的相关峰^[14],它们各有优缺点,这里采用互相关测度函数(NCC,记为 N_{CC})^[15],表达为

$$N_{CC}(I_l, I_r) = \frac{\left\{ \sum_{k_i, k_j} \sum_{k'_i, k'_j} [I_l(i+k_i, j+k_j) - \bar{I}_l] \cdot [I_r(i'+k'_i, j'+k'_j) - \bar{I}_r] \right\}^2}{\left\{ \sum_{k_i, k_j} \sum_{k'_i, k'_j} [I_l(i+k_i, j+k_j) - \bar{I}_l] \right\}^2 \cdot \left\{ \sum_{k_i, k_j} \sum_{k'_i, k'_j} [I_r(i'+k'_i, j'+k'_j) - \bar{I}_r] \right\}^2} \quad (6)$$

确定折叠相位的相互对应关系实质是,利用(6)式确定图3(a)中的“1”、“2”、…与图3(b)中的“1”、“2”、…相互对应关系,从而获得折叠相位图3(c)中的“1”、“2”、…与图3(d)的“1”、“2”、…相互对应关系。在(6)式中,为了表征折叠相位的对应关系,所取的相关窗口的长度为折叠相位的长度,即 $k_{li} = l_i, k_{ri} = r_i$ 。由数字投影投射到物体表面的相位周期为 p ,但由于正弦条纹受到物体表面高度调制,使得左右相机采集到的每一折叠相位的长度 l_i, r_i 各不相同。由同一区域编码结构光照明的物体表面区域,在左右相机的成像区域大小各异,使得左右图像相互对应区域的相关性退化。如图3所示,沿极线方向图3(a)中编号2的折叠相位区域与图3(b)同为编号2的折叠相位区域是相互对应的,但它们的相位长度明显不一样。在折叠相位区间中,具有同样相位值的区域对应相同的投影结构光区域。以相位值为依据对结构光图像进行极线方向重采样^[16],设相位采样间距为 $S_p = 2\pi/N$,每一相位区域的结构光图像沿纵坐标为 y 的极线方向重采样,采样长度为 N 。该数字的元素 A_i 可表达为

光照明图,如图4所示,重采样后,左右相机采集的图像反映投影系统所投射的伪随机结构光,而且沿极线方向每个折叠相位周期有着相同长度的图像区域,与物体表面法向和相机成像角度无关。一般地,结构光图像中对应折叠相位区间的可辨析程度只与结构光设计方案相关。

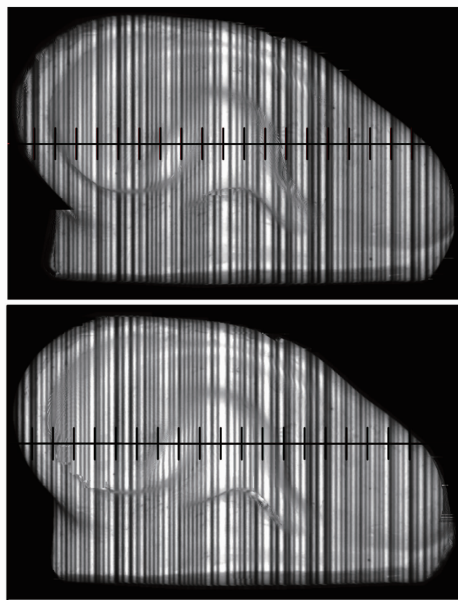


图4 结构光图像重采样结果

Fig. 4 Resampling structure light maps

2.3 伪随机结构光投影设计思想

大多情况下,都能利用数字图像相关技术来确定折叠相位之间对应关系^[1-5]。由于每个折叠相位区域的图案都是随机产生的,有可能使在两个不同的折叠相位区域产生的图案相似,这就造成折叠相位搜索出现歧义性。为了解决这问题,Bräuer-Burchardt等^[16]

$$A_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n w_j I(x_j, y),$$

$$w_j = \begin{cases} 1, & x_{i-1} < w_r(x_j, y) \leq x_i \\ 0, & \text{else} \end{cases},$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (7)$$

式中 $I(x_j, y)$ 为伪随机结构光照明图像位置 (x_j, y) 的图像强度值, $w_r(x_j, y)$ 为折叠相位图中位置 (x_j, y) 的相位值。重采样后左右摄像采集到的结构

设计了一种沿着极线方向分布的条形码结构光,其编码规则就是使得不同的折叠相位对应编码之间的加权汉明距离最大。但是这种设计思想没有考虑具体的测量空间,需要沿着极线搜索整个视场,需要比较大的编码容量,限制了汉明距离。这样在加权汉明距离较小的两个区域受环境光、相机本身噪声以及左右两相机角度差异等因素的影响,对应折叠相位搜索可能会出现误匹配。为此提出一种受测量空间限制的一维伪随机图案的方案可减少编码容量,增加相互差异性。

在标定过程中,利用平面标靶摆放若干不同的位置对系统进行标定,利用标靶位置确定测量空间^[10],如图 5(a)所示。

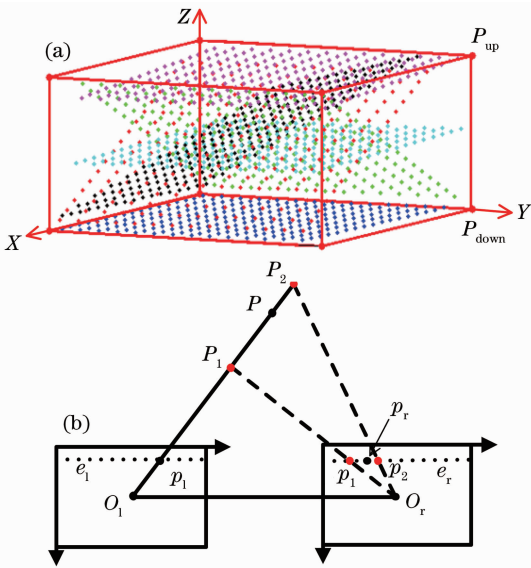


图 5 测量空间限制查找范围

Fig. 5 Search range limited by measuremental space

如图 5(b)所示,由于测量空间限制,经过左图中心 O_l 和像点 p_l 的射线与测量空间的 P_{up} 、 P_{down} 平面的交点分别为 P_1 、 P_2 。空间点 P_1 、 P_2 在右图的投影点 p_1 、 p_2 落于 p_l 对应极线 e_r 上。如果在测量空间内有一点 A ,它在左图的投影点为 p_l ,那么它

在右图对应点肯定在 p_1 与 p_2 之间,因此不需要在整条极线 e_r 上搜索 p_l 的对应点 p_r 。为折叠相位设计的编码只需要保证覆盖区域 p_1 与 p_2 ,不需要在视场内全覆盖。这样就可以减少编码容量,提高编码的可识别度。

这里提出的编码方案,利用标定空间约束,减少对应的折叠相位的搜索范围,使得在约束的搜索范围内不同折叠相位所对应的编码差异性足够大而且唯一。在具体阐述该方案之前,首先清楚几个相关的概念:利用单幅结构光图案在搜索范围内将得到的每个折叠相位唯一的编码称为相位编码;在该结构光图案中该编码的位宽称之为编码宽度,其与相位周期有相同的像素长度;为了使得在搜索范围内相位编码各不相同,设计能完全覆盖搜索范围的一系列没有互相重复的相位编码,这个编码系列称为编码周期。对于分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的投影系统,如果投影的相位周期为 20 pixel ,所以设计的伪随机条形码,其位宽亦为 20 pixel 。先设定第一个折叠相位所对应的编码 $C_0 = [11001100110011001100]$,其后,随机产生一个长度为 20 的折叠相位编码 C_i 作为候选的折叠相位编码,记其连续的“0”、“1”码位长分别记为 L_0 、 L_1 。假如它满足以下条件:1)保证两两相位编码的差异性, C_i 和已经产生的编码 C_j 互相关系数不高于阈值 R_{th} ;2)使在每相位编码中所包含信息量足够大,编码 C_i 中“1”在 $R_{th}^{C_1}$ 和 $R_{th}^{C_2}$ 之间,且 L_0, L_1 都不大于 $R_{th}^{L_0}$;3)由于相机投影机离焦,视场不完全重合等因素影响,相机和投影机不可能是逐个像素对准的,所以 L_0, L_1 不小于 $R_{th}^{L_0}$,即

$$N_{CC}(C_0, C_i) < R_{th} \cdots N_{CC}(C_{i-1}, C_i) < R_{th}, \quad (8)$$

$$R_{th}^{C_1} \leq \text{sum}(C_i) \leq R_{th}^{C_2}, \quad (9)$$

$$R_{th}^{L_0} \leq L_0 \leq R_{th}^{L_0}, \quad R_{th}^{L_1} \leq L_1 \leq R_{th}^{L_1}. \quad (10)$$

如果满足(8)~(10)式,即将 C_i 视为一个折叠相位的编码 C_i ,即 $C_i = C_i$ 。

这里将折叠相位两两编码的相关性阈值 R_{th} 设为



图 6 设计的伪随机条形码示意图

Fig. 6 Designed pseudorandom pattern projection

0.16,为了得到均匀的编码段将 $T_{\text{左}}^{\text{左}}$ 、 $T_{\text{右}}^{\text{右}}$ 分别设为 8、12; $R_{\text{左}}^{\text{左}}$ 、 $R_{\text{右}}^{\text{右}}$ 分别设为 2、4。照此规则产生的编码如图 6 所示,其中一编码周期包含 14 个折叠相位编码,每个折叠相位的编码位宽为 20 pixel。对于 1280 pixel×1024 pixel 的投影系统,投影的正弦条纹相位周期 20 pixel 来说,需要 5 个编码周期覆盖整个视场。一般情况搜索范围 p_1 与 p_2 不超过编码周期。所以在搜索范围 p_1 与 p_2 内编码都是唯一的。

3 实验结果

为了验证所提方法的有效性和稳健性,对双目系统进行标定,并投影采集四步相移正弦条纹图和伪随机结构光图。对所采集的图像作极线校正,其中 l_l 、 l_r 为一对共轭的极线,左相机极线 l_l 上的折叠相位 a_l ,利用测量空间限制确定右相机对应的折叠相位搜索区间 p_1 与 p_2 。如图 7 所示,区间 p_1 与 p_2 所跨越 8 位折叠相位,而设计的结构光编码周期为 14 个折叠相位,所以在区间 p_1 与 p_2 没有重复的折叠相位编码。利用第 2.2 节提到方法,以折叠相位为依据在伪随机投影图重新插值,然后在 p_1 与 p_2 区间中遍历每个折叠相位区域,并计算其与 a_l 的相关系数。 a_r 与折叠相位 a_l 有非常高的相关性,其他折叠相位区间的相关性都很低,能够稳健地建立左右相机的折叠相位的对应关系。

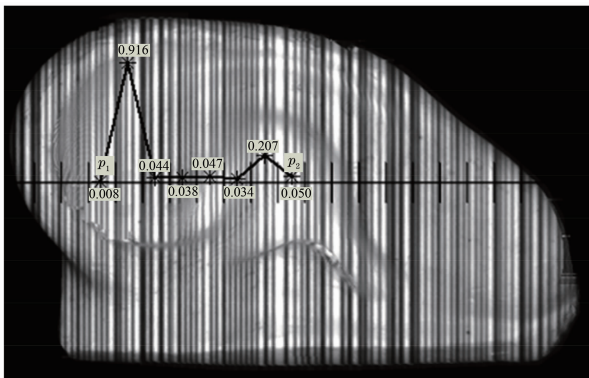


图 7 建立左右相机的折叠相位对应关系

Fig. 7 Designed pseudorandom pattern projection

在相互对应的折叠相位图中,以相位为依据进行亚像素插值,可确定出双目的点对应关系,并结合三角测量原理重建物体表面的三维图像,如图 8 所示。图 8(a)和(c)为本文所提的方法重建的结果,图 8(b)和(d)是经典的相移-格雷码重建的结果。图 8(a)和(c)在边缘和内部处数据缺失是由于折叠相位边界定位不正确造成的,在结构光重采样时,不完整的折叠相位周期会在该区域带来比较大的偏

差,没能根据采样后的结构光图像建立该区域双目间折叠相位的对应关系。由于数据缺失部分不会超过一个折叠相位,数据量较小,故对整体重建影响不大。而且,在三维建模过程中,为获取物体完整三维信息,通常需要多视点采集,并利用深度图像匹配技术,以获得完整的三维数据,与此同时,因为不同视点的深度像的数据缺失不尽相同,就可以进行缺失数据相互补充。

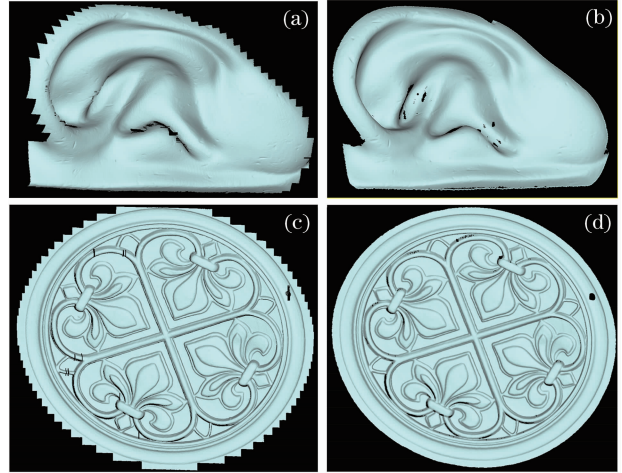


图 8 实验结果

Fig. 8 Experimental results

4 结 论

提出了一种相位编码方案,利用设计的单幅伪随机条形码结构光图案对每个折叠相位区域进行编码。根据该相位编码利用数字图像相关技术,只需搜索左右相机折叠相位的对应关系,不需要对的折叠相位图进行展开。在相互对应的折叠相位区间内通过线性插值得到相位值相同的亚像素坐标位置,建立左右相机的点对关系,进而重建物体三维形貌。该方案创新性在于利用单幅设计的结构光伪随机条形码代替了格雷码图像序列,减少了图像序列采集时间。实验证明在采集时间上大为减少,重建的物体表面与传统方法相当,在快速三维获取上有很大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Morano R A, Ozturk C, Conn R, *et al.*. Structured light using pseudorandom codes[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(3): 322-327.
- 2 Zhang Hui, Zhang Liyan, Wang Hongtao, *et al.*. Surface measurement based on instantaneous random illumination[J]. Chinese J Aeronautics, 2009, 22(3): 316-324.
- 3 Schaffer Martin, Grosse Marcus, Kowarschik Richard. High-speed pattern projection for three-dimensional shape measurement using laser speckles[J]. Appl Opt, 2010, 49(18): 3622-3629.

- 4 Dai Hongjun, Su Xianyu, Zou Xiaoping. A regional searching fast algorithm for shape measurement by digital speckel correlation[J]. *J Optoelectronics & Laser*, 2002, 13(4): 382-385.
代红军, 苏显渝, 邹小平. 数字散斑相关三维面形测量的局部搜索快速算法[J]. *光子·激光*, 2002, 13(4): 382-385.
- 5 Li Meiju, Su Xianyu. Stereo matching by means of digital speckle [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 550-554.
李美菊, 苏显渝. 投影数字散斑的立体匹配 [J]. *激光技术*, 2004, 28(5): 550-554.
- 6 Ogale Abhijit S, Aloimonos Yiannis. Shape and the stereo correspondence problem[J]. *Int J Comput Vision*, 2005, 65(3): 147-162.
- 7 Zhu Rongyue, Zhu Rihong, Li Jianxin. Application of virtual grating phase-shifting fringe method for three-dimensional shape measurement[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s108003.
朱荣月, 朱日宏, 李建欣. 一种虚条纹相移算法在结构光三维测量中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s108003.
- 8 Hu Luyao, Da Feipeng, Wang Luyang. A novel color fringe projection method for 3D measurement of colorful objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0212002.
胡路遥, 达飞鹏, 王露阳. 一种针对彩色物体的光栅投影三维测量方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0212002.
- 9 Peng Xiang, Yin Yongkai, Liu Xiaoli, *et al.*. Phase-aided three-dimensional imaging and metrology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900120.
彭 翔, 殷永凯, 刘晓利, 等. 基于相位辅助的三维数字成像与测量 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900120.
- 10 Bougu J Y. Camera Calibrat Ion Toolbox for Matlab[OL]. <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib-doc/>. [2013-12-29].
- 11 Zhang Ke. 3D Reconstruction of Free-Form Surfaces Based on Binocular Vision[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. 51-78.
张 可. 基于双目立体视觉原理的自由曲面三维重构 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. 51-78.
- 12 Zhang Guangjun. *Vision Measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2005.
张广军. *机器视觉* [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 13 Zhang Ning, Chang Lei, Xu Xiping. Research on the technology of three-dimensional reconstruction based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 051001.
张 宁, 常 雷, 徐熙平. 基于机器视觉的三维重建技术研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 051001.
- 14 Scharstein Daniel, Szeliski Richard. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [J]. *Int J Comput Vision*, 2002, 47(1-3): 7-42.
- 15 Sun Mingyong, Cai Kang, Yang Deyu, *et al.*. Three-dimensional deformation measurement with the combination of DSCM and ESPI[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 111201.
孙明勇, 蔡 康, 杨德宇, 等. 数字散斑相关法和电子散斑干涉术相结合的三维变形测量方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 111201.
- 16 Bräuer-Burchardt Christian, Kühmstedt Peter, Notni Gunther. Combination of Sinusoidal and Single Binary Pattern Projection for Fast 3D Surface Reconstruction[M]. // Axel Pinz, Thomax Pock, Horst Bischof, *et al.*, *Pattern Recognition*, Springer Berlin Heidelberg, 2012, 7476: 276-286.

栏目编辑: 何卓铭