

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211906

基于二值离焦的双目结构光三维测量方法*

严飞^{1,2} 吴迪¹ 文杰¹ 刘银萍³ 刘佳^{1,2}(1.南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2.江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044;
3.南京信息工程大学大气物理学院 南京 210044)

摘要: 为提高光学三维测量系统的条纹投影效率和测量精度,提出使用二值离焦方法快速投影编码条纹并结合双目立体匹配算法得到视差信息。首先采用 Bayer 抖动技术将投射的灰度条纹转化为二值条纹,降低投影仪离焦造成对比度、景深下降的影响。然后借助多频外差方法将包裹相位展开为绝对相位,利用视差约束关系和平均误差平方和代价计算来获取最佳相位匹配点。最后经三角测量原理和双目标定获取被测物体的深度信息和三维信息。通过实验对精密小球和雕像进行测量,表明本文提出的方法测量精度和传统十二步相移测量精度接近,比传统三步相移提高了 52.8%。

关键词: 二值离焦;三维测量;立体匹配;Bayer 抖动;平均误差平方和

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Binocular structured light 3D measurement method based on binary defocus

Yan Fei^{1,2} Wu Di¹ Wen Jie¹ Liu Yinping³ Liu Jia^{1,2}(1. College of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center for Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China;
3. College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To improve the fringe projection efficiency and measurement accuracy of the optical 3D measurement system, a binary defocusing method is proposed to rapidly project the coded fringes and the binocular stereo matching algorithm is used to obtain the parallax information. First, the Bayer dithering technology is used to convert the projected grayscale fringes into binary fringes to reduce the effect of the projector's defocusing on the contrast and depth of field drop. Then, the wrapped phase is expanded into absolute phase by means of multi-frequency heterodyne method, disparity constraint relation and average error sum of squares cost calculation are used to obtain the best phase matching point. Finally, the depth information and three-dimensional information of the measured object are obtained through the principle of triangulation and dual-target positioning. Through experiments on precision balls and statues, it is proved that the measurement accuracy of the method proposed in this paper is close to that of the traditional twelve-step phase shift measurement, and is 52.8% higher than the traditional three-step phase shift.

Keywords: binary defocus; 3D measurement; stereo matching; Bayer jitter; mean square differences

0 引言

近年来,在众多的三维测量与成像方法中,光学三维测量与成像技术脱颖而出,因具备非接触、速度快和高精度等优点,结构光三维测量与成像技术被广泛应用于工业检测、医学成像、考古测量、制造业与逆向工程等多个领域^[1-3]。

目前,广泛应用的三维测量系统大多数是在物体表面

投射编码结构光,结构光在物体表面进行调制后会产生变形条纹,用成像器件获取这些变形条纹,通过解调变形条纹信息后得到相位信息,再转化为高度信息来实现测量^[4]。其中,相位测量轮廓术(phase measurement profilometry, PMP)是通过数字投影仪投射至少 3 幅灰度相移条纹,就可以计算出相位信息用于测量,是经典的三维测量方法之一^[5-6]。但实际情况下,投射的灰度相移条纹会受到非线性

收稿日期:2022-11-01

* 基金项目:江苏省产业前瞻与关键核心技术重点项目(BE2020006-2)、国家自然科学基金(61605083)项目资助

器件(摄像机和投影仪)、空间环境光、系统噪声等影响,使得测量误差偏大^[7]。从投影效率上分析,数字投影仪投射灰度条纹的速度远小于投射二值条纹的速度,对于快速与实时三维测量不是最佳的选择。为提高投影仪的投影效率和减小这种非线性影响,Zhang 等^[8]提出使用二值方波光栅法,利用数字投影仪在离焦模式下得到正弦条纹,因采用二值结构光图案,不受非线性影响,很好的避免了投影仪的非线性 Gamma 影响。较为经典的一维二值离焦是方波离焦,在离焦过程中,离焦量过大会降低测量景深和条纹对比度,过小不能有效去除高阶谐波分量,造成精度降低。为解决这个问题,Ayubi 等^[9]提出使用正弦脉宽调制技术,只需要轻微离焦也能获得较好的正弦条纹图案,却只能在一定的像素范围内才能提高测量精度。Zuo 等^[10]提出使用正弦脉宽调制技术和四步相移结合,并对其进行优化,从而减小了谐波影响,改善了离焦系统的测量精度。以上是一维二值离焦的方法及优化,都是在 1 个维度上进行改进,如果在 2 个维度上都优化二值模式,可以生成更高质量的正弦条纹图案。二维调制技术包含抖动技术、遗传算法和区域调制等方法,常见有 Floyd-Steinberg 抖动误差扩散技术,输入高灰度级的图像并通过误差传递矩阵,将单个像素位置的量化误差传递到相邻像素,然后输出低灰度级图像。二维调制技术能将产生的谐波远离基频分量,所以只需要很小离焦量就能去除高阶谐波,从而获得高质量的正弦条纹图案。

结构光三维测量技术通常使用单目相机进行测量,为了获取准确的三维信息,通常需要对投影仪进行复杂的标定,并对投影仪造成的 Gamma 畸变进行优化^[11]。现如今的算法虽然可以补偿和优化,但仍存在一定的局限性。而双目立体视觉技术可以省去复杂的投影仪标定,但传统的立体匹配对象是基于灰度值,因此对弱纹理物体表面特征信息不明显情况下,会造成匹配的歧义,影响系统的测量精度^[12]。

针对以上问题,本文提出使用主动式结构光技术和被动式双目立体视觉技术相结合,来提高投影效率和测量精度。首先使用二维面积调制离焦技术,将 8 位的灰度条纹通过 Bayer 抖动生成 1 位的二值条纹,只需轻微离焦投影仪,投射出的二值条纹就具有较好的正弦相位信息^[13]。然后借助多频外差方法将包裹相位展开为绝对相位,并融合双目立体视觉的立体匹配算^[14]。选取绝对相位作为匹配基元,快速搜索同名点,并进行代价计算获取最佳匹配点,由于绝对相位是无歧义的,故而可以很大程度提高匹配准确率^[15]。最后通过标定双目相机,无需标定投影仪即可计算空间三维坐标信息。实验结果证明该方法对于提高二值离焦双目结构光三维测量精度有一定的研究意义和应用价值。

1 双目结构光系统三维测量原理

本文采用的双目结构光测量系统由 1 台数字投影仪、

2 台工业相机和被测物体组成,如图 1 所示。投影仪一般采用 DLP 技术的 LED 机型,2 台相机采用高清摄像头分别位于投影仪左右,符合小孔成像模型^[16]。其中左右相机坐标系统为 $O_{c1}X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 、 $O_{c2}X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$, p_1 、 p_2 为待测点 p 在相机坐标系下无畸变图像的其次坐标。通过相机标定获取相机的内、外参数,内参数主要反映了相机自身属性,将像素坐标系转化为相机坐标系^[17];外参数将相机坐标系转化到世界坐标系下,在双目系统中还用于获取 2 个相机的旋转和平移相对位置关系。

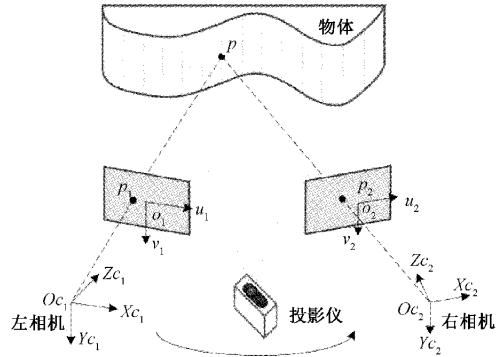


图 1 双目结构光系统测量原理图

完成双目相机的标定工作后,建立空间深度信息计算模型,如图 2 所示。其中, O_L 、 O_R 为左右相机光心,两点之间的距离为基线 T_x ,基线到被测点 p 点的距离 z 为所求深度信息。 pl' 、 pr' 为被测点 p 在相机左右平面成像点,该点到基线的距离为焦距 f , Xl 与 Xr 之差为视差 d 。 p 点的深度 z 计算如式(1)所示。

$$z = \frac{T_x \times f}{Xl - Xr} = \frac{T_x \times f}{d} \quad (1)$$

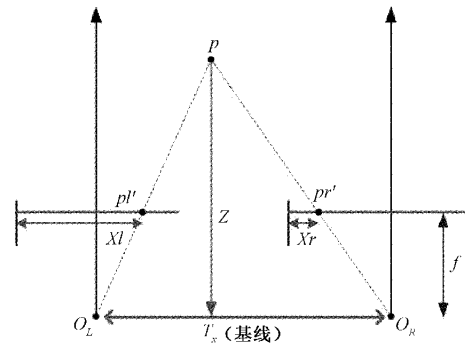


图 2 三角测量原理

若将世界坐标系建立在相机坐标系下,则空间点 p 的坐标如式(2)所示。

$$\begin{cases} Z_c = \frac{T_x \cdot f}{d} \\ X_c = Z_c \cdot \frac{u - u_0}{f} \\ Y_c = Z_c \cdot \frac{v - v_0}{f} \end{cases} \quad (2)$$

其中, X_c, Y_c, Z_c 为 p 点相机坐标系下的三维坐标, u, v 为图像坐标系下 p 点像素坐标, u_0, v_0 为相机主点坐标。

2 基于二值离焦条纹的双目结构光三维测量

2.1 二值离焦条纹的编码与解码

条纹编码技术主要是为了获取物体在空间下经过光强调制的相位信息, 将其映射成为高度, 来实现三维测量, 而编码与解码的质量决定了获取相位信息的精度, 3D 测量信息的分辨率。

传统投射 8 位灰度正弦条纹来获取包裹相位信息, 至少需要投射 3 幅相移条纹才可以计算相位。且由于投影仪的非线性 Gamma 影响, 投影仪将生成的灰度正弦条纹投射到物体上, 采集后的图案会丢失部分正弦性, 会导致计算的相位丧失部分精度, 需要通过相位补偿来弥补这部分误差^[18]。考虑到二值结构光图案具有良好的鲁棒性, 不会受到投影仪的非线性影响。本文用 8 位灰度条纹通过 Bayer 抖动生成新的 1 位二值条纹, 减少该部分误差带来的影响。抖动后的条纹是经过二维面积调制, 经投影仪轻微离焦后, 不会过多降低条纹的对比度和质量。且系统使用的数字投影仪 DLP4500 投射 8 位灰度条纹帧率在 120 帧/s, 而投射 1 位的二值条纹可以达到 4 225 帧/s, 测量 1 次需投射 9 张 1 位的二值条纹, 理论上帧率在 469 帧/s 以内, 在效率上 1 位的条纹就更显优势。

离焦后的条纹是仿正弦条纹, 为获取较为准确的相位信息, 用相移法来解出包裹相位和多频外差来展开相位。相移法是通过数字投影仪将正弦条纹在一个周期内平均每次移动 N 次, 每次移动 $2\pi/N$ 的相位, 投射在待测物体上, 相机采集回物体经过结构光调制后的变形条纹, 经过计算可以获取待测物体的包裹相位分布。 N 步相移公式如下:

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{(n-1) \times 2\pi}{N} \right] \quad (3)$$

$n = 1, 2, \dots, N$

式中: $I_n(x, y)$ 为采集到的第 n 幅相移图像, (x, y) 为像素坐标, $A(x, y)$ 表示背景光强, $B(x, y)$ 为调制光强, N 为 N 步相移, $B(x, y)/A(x, y)$ 表示条纹对比度。将式(3)带入到式(4)可以计算出包裹相位:

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin\left(\frac{2n\pi}{N}\right)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos\left(\frac{2n\pi}{N}\right)} \right] \quad (4)$$

式中: $\varphi(x, y)$ 为所求的包裹相位, 由于是反正切运算, 其相位被包裹在 $(-\pi, \pi]$ 之间, 为获取连续性的相位分布, 则需要对包裹相位展开为绝对相位。

本文用到多频外差通过时域展开相位方法, 选取了 3 种不同周期的条纹, 分别为 24、22、20 这 3 个条纹周期, 经过叠加后的周期为 1 320。投影仪输出条纹宽度和相机拍摄图像的宽度为 1 280, 意味着相位展开后, 获得的绝对相

位在 1 280 个周期是无歧义。由于三频外差是在双频外差基础上再次迭代运算的, 为了简单清楚表达, 本文以双频外差为例, 其相位展开原理如式(5)~(7):

$$T_{12} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

$$\Delta\phi_{12} = \phi_1 - \phi_2 = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2, & \varphi_1 > \varphi_2 \\ 2\pi + \varphi_1 - \varphi_2, & \varphi_1 \leq \varphi_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\varphi_{12} = \varphi_1 + \text{floor} \left(\frac{\Delta\phi_{12} \frac{T_{12}}{T_1} - \varphi_1}{2\pi} \right) \times 2\pi \quad (7)$$

其中, φ_1, φ_2 分别对应为 T_1, T_2 2 种周期的包裹相位, T_{12} 为 T_1, T_2 2 种周期合成的更大的周期, φ_{12} 为最后解得的绝对相位。 $\Delta\phi_{12}$ 为 φ_1, φ_2 的相位差, $\text{floor}(\cdot)$ 为向下取整。

2.2 基于相位的立体匹配算法

立体匹配通常是用来分析获取不同视角的二维图像, 根据图像之间的相似性进行约束, 找到彼此之间的对应点或相似点。立体匹配算法通常用于双目视觉系统当中, 获取的二维图像信息往往是包含空间场景的深度信息, 只是相机获取的图像丢失了深度信息。因此, 立体匹配需要做的就是找到相机坐标系不同视角二维图像之间对应特征, 并将其还原成世界坐标系下的三维空间信息。传统的匹配算法一般是基于图像灰度或者特征点, 在特征信息不明显地方会造成误匹配。而本文选取绝对相位作为立体匹配中的匹配基元, 同一物体在经过光照不变情况下调制后, 物体上的每一点相位值大小都是不变的, 这使得图像中的每一个点的绝对相位值都是唯一的, 因此能够提高匹配过程的精准率。通过极线约束进行立体校正, 找到左右图像的每个平面对应行, 搜索范围从二维降到一维, 只需在同一极线搜索匹配对应点的相位, 不仅缩小了双目匹配的范围, 并且还具备唯一约束性。

本文提出全局结合局部的快速搜索方法, 立体匹配算法流程如图 3 所示。

将左视图绝对相位作为待匹配图, 将右视图绝对相位作为待搜索图, 在右视图绝对相位进行搜索最相近的相位值, 匹配过程分 2 步, 第 1 步建立左视图待匹配框 $BOX_L(3 \times 3)$, 在右视图也建立一个搜索框 $BOX_R(3 \times 3)$, 为避免在边缘和噪声处出现误匹配, 对搜索框和待匹配框进行相位检查, 若存在相位 ≤ 0 的相位则认为该点不可靠, 列入不可信点, 下一个点开始全局搜索。通过滑动右视图待匹配框寻找可信点, 当搜索框中心点相位差的绝对值小于阈值 0.5, 则列为可信点, 下一个点搜索改为局部搜索。第 2 步将第一步中获取的可信点进行平均误差平方和匹配代价计算, 计算方式如式(8)所示。

$$D(i, j) = \frac{1}{3 \times 3} \times \sum_{s=1}^3 \sum_{t=1}^3 [BOX_L_i(s, t) - BOX_R_j(s, t)]^2 \quad (8)$$

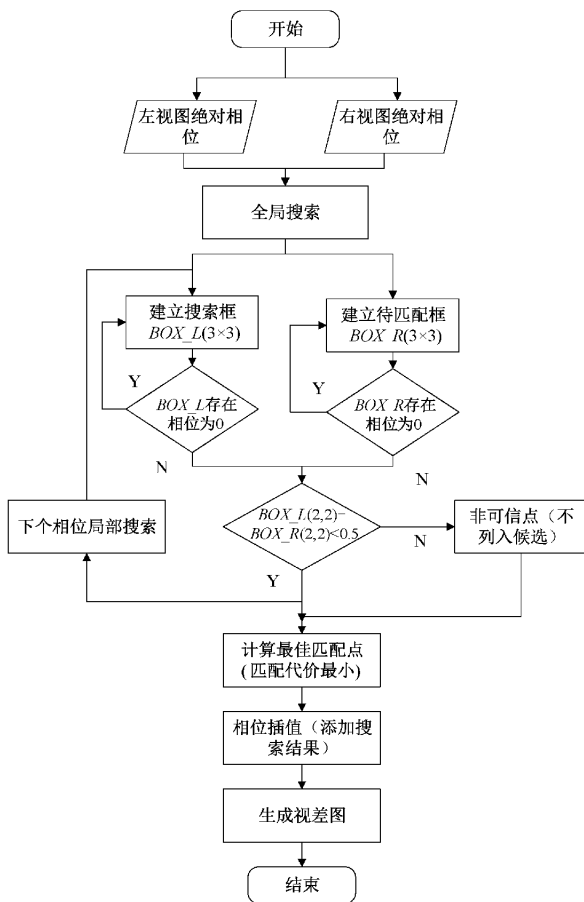


图 3 立体匹配算法流程

其中, $BOX_L_i(s, t)$ 为第 i 个窗口大小为 (s, t) 的待匹配框, BOX_R_j 为第 j 个窗口大小为 (s, t) 的搜索框, $D(i, j)$ 为第 i 个待匹配框的第 j 个搜索框的匹配代价。搜索框本文大小设置的是 (3×3) , 则 $s, t \in [1, 2, 3]$, i 的大小比左视图的宽度小 2, j 的大小取决于第 i 个待匹配框处的可信点多少, 所以第 i 个待匹配框对应应有 j 个搜索框。由于绝对相位是单调递增的, 周围相位大小同中心点相位

的大小很接近, 本文采用局部立体匹配算法, 计算左匹配框和右搜索框的绝对相位值的差值平方和的均值。然后遍历所有可信点的代价计算结果, 匹配代价最小处的点即为最佳匹配点, 计算该点的视差, 并在该处进行二次曲线亚像素插值, 来提高视差的精度。

3 实验和结果分析

3.1 实验系统搭建

为了验证本文测量方法, 搭建了一套双目结构光三维测量系统。该系统的采集模块由 2 台型号为 MV-SUA133GM-T 工业黑白相机和 1 台型号为 DLP4500 数字投影仪组成, 其中相机的分辨率@帧率为 $1\ 280 \times 1\ 024 @ 245\ FPS$, 投影仪的输出分辨率为 $1\ 280 \times 800$ 。本文通过对棋盘格标定板进行标定来得到相机内外参数, 其中标定板的型号为浮法玻璃基板 GP200, 图案阵列为 12×9 , 边长为 $15\ mm$, 精度为 $0.01\ mm$ 。搭建好的测量系统实物图如图 4 所示, 其中待测试模型为大卫石雕头像。



图 4 双目结构光测量系统

系统进行测量前需要对系统标定, 本文使用软件 Matlab 进行双目立体标定。由于光照的均匀程度和标定板图像的清晰程度会对标定的误差造成影响, 进而影响测量结果, 所以在标定的过程中, 需要尽可能保持光照均匀, 使采集回的标定板图案分辨率高, 标定完成后得到双目相机的内外参数如表 1 所示。

表 1 双目相机标定结果

	左相机	右相机
相机内参	$\begin{bmatrix} 2\ 085.599 & 0 & 0 \\ 0 & 2\ 085.415 & 0 \\ 676.143 & 549.679 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2\ 074.965 & 0 & 0 \\ 0 & 2\ 074.547 & 0 \\ 646.116 & 531.465 & 1 \end{bmatrix}$
径向畸变	$[-0.113\ 0.197]$	$[-0.105\ 0.124]$
切向畸变	$[-0.000\ 2\ 0.000\ 6]$	$[0.001\ 1\ 0.000\ 8]$

右摄相机相对左摄相机外参旋转 R 与平移矩阵 T :

$$R = \begin{bmatrix} 0.997 & 0.011 & -0.074 \\ -0.011 & 0.999 & -0.003 \\ 0.073 & 0.004 & 0.997 \end{bmatrix}$$

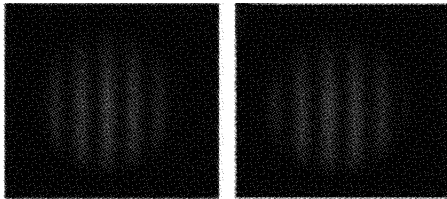
$$T = [-57.142\ 0.146\ 5.541]$$

3.2 条纹对比度、精度评价实验

为了证实本文提出二值抖动离焦方法获取的正弦条纹对条纹对比度影响较小, 利用该方法和传统灰度正弦条纹对标准球进行测量, 实验环境及投影亮度都始终保持不变, 该小球的型号: DS-LCB-D50.8GZ 哑光陶瓷球, 直径为

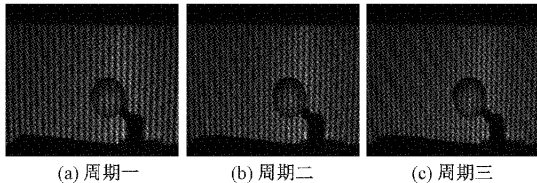
50.814 0 mm。

图 5(a)为传统灰度条纹正弦条纹图案,图 5(b)二值抖动后离焦得到的正弦条纹图案。显然,2 张图像的平均亮度大致一样,通过对 2 种方法的正弦条纹图案计算,以均方根对比度方式计算对比度。传统正弦条纹对比度计算结果为 19.178,而本文方法的对比度计算结果为 17.526。通过对对比度数据结果表明,本文方法相比传统灰度正弦条纹的对比度并不会下降很大。



(a) 灰度正弦 (b) 离焦后正弦
图 5 灰度正弦图案与离焦后正弦图案

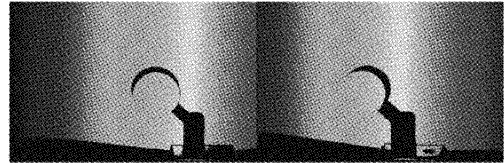
图 6 为本文方法中左相机获取的变形条纹图案,图 6(a)~(c)为 3 种不同周期的图案。



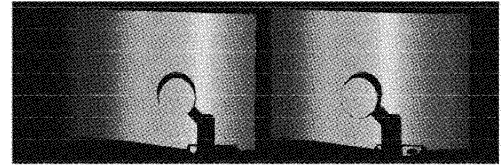
(a) 周期一 (b) 周期二 (c) 周期三
图 6 左相机采集的不同周期条纹图案

将采集到的图案按照 2.1 节的方法进行解包裹相位并展开为绝对相位,其中,图 7(a)为绝对相位,图 7(b)为相位立体校正后的结果。

经过校正后的绝对相位,左右视图的绝对相位都被约束在每一条极线上,在立体匹配过程中只需要在同一条极线上搜索相同的相位值,就可以完成相位立体匹配过程,从而可以获得视差信息。最后根据第 1 节的三维测量原理,将视差信息转化为深度信息,通过相机标定后可以求出待测物体的三维坐标信息。小球重建实验结果如图 8 所示,在实验过程中保证环境不变,只改变投影条纹的方

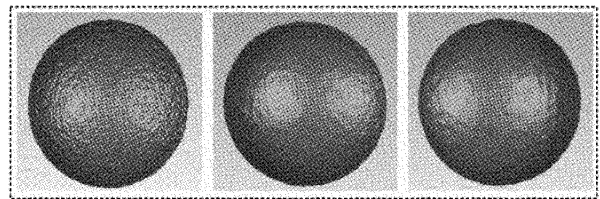


(a) 绝对相位



(b) 相位校正

图 7 展开后的绝对相位和相位校正



(a) 三步相移 (b) 十二步相移 (c) 本文方法

图 8 小球三维重建结果对比

式,分别对传统三步相移、十二步相移和本文方法进行对比。

从图中重建结果可以看出,传统的三步相移重建结果表面点云波动较大并不光滑,而十二步相移可以改善三步相移的不足,但是需要投影更多的灰度条纹,而本文的重建结果较三步相移更好,和十二步相移结果相近,却只需要投射较少的二值条纹。

为评价提出的测量方法精度,在获得点云数据的基础上,将点云数据拟合成标准球体直径的小球,结果如表 2 所示,3 种方法获得的点云数量几乎相近,本文方法拟合后的小球圆心坐标为: $(x_0, y_0, z_0) = (-1.055 5, 30.627 3, 424.287 0)$,其中拟合半径为 25.407 0 mm,测得 RMSE 为 0.059 mm。其中三步相移、十二步相移的 RMSE 分别为: 0.125 mm、0.043 mm。

表 2 实验结果对比

	点云数量	拟合球心 (x_0, y_0, z_0)	拟合半径/mm	均方根误差/mm
三步相移	25 902	$(-1.127 0, 30.792 9, 424.321 7)$	25.407 0	0.125
十二步相移	26 005	$(-1.076 2, 30.593 6, 424.232 7)$	25.407 0	0.043
本文方法	25 783	$(-1.055 5, 30.627 3, 424.287 0)$	25.407 0	0.059

3.3 较大深度物体实验

传统投射灰度正弦条纹测量是聚焦模式,不会改变测量的景深,但是二值离焦测量方法由于离焦原因,只有一定的离焦量范围内才能获得较好的正弦性条纹,即会导致测量的景深变小。为验证本文方法对测量景深影响较小,

与传统正弦条纹测量方法对比。通过对深度为 160 mm 的石膏大卫雕像进行测量,图 9 为不同方法的测量重建结果。

从图 9 可以看出,三步相移由于受到投影仪 Gamma 等非线性影响,重建表面有类似“水波纹”的错误结果,而

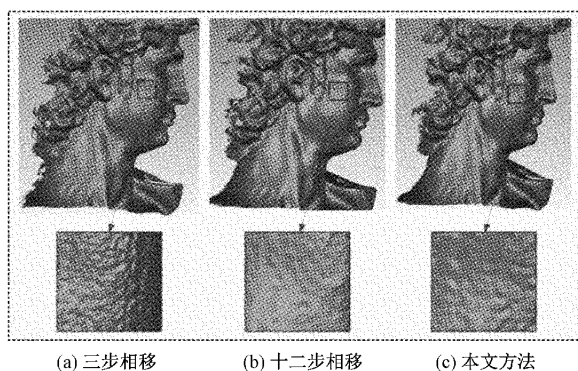


图 9 大卫雕像重建结果

本文方法可以较好的重建恢复原始大卫雕像的三维形貌,和十二步相移的重建结果很接近。同时也证明了该方法并未因为离焦测量而降低测量的景深,导致重建质量和精度降低。

4 结 论

本文提出了一种基于二值离焦的双目结构光三维测量方法,对传统的灰度条纹进行 Bayer 抖动来生成新的二值条纹,只需轻微离焦投影仪来获得仿正弦条纹。实验表明该方法生成条纹的质量和对比度并未受到较大影响,较传统离焦效果要好,与聚焦投影灰度正弦条纹效果相近。由于投射的是二值条纹,在投影效率上比灰度条纹有很大提升。为了提高测量精度,选用三频外差的时间相位展开方法,获取绝对相位信息,并结合双目立体视觉技术来计算待测物三维信息。整个测量系统无需对投影仪标定,且通过离焦投影仪测量,很大程度上避免了投影仪的非线性 Gamma 影响。

最后通过对比试验表明,本文所提方法的测量精度误差为 0.059 mm,同传统十二步相移的精度相近,较传统三步相移精度提高了 52.8%。另对大卫雕像进行重建,表明该方法并未因离焦而导致测量景深减小,导致重建的质量下降。故本文提出的三维测量方法,对传统的测量精度具有一定的改善作用,还提高了系统的抗干扰性与稳定性。

参考文献

- [1] YE Q, DONG J F, ZHANG Y J. 3D Human behavior recognition based on binocular vision and face-hand feature[J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4712-4717.
- [2] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1999, 39(1): 10-22.
- [3] GORTHI S S, RSATOGLI P. Fringe projection techniques: Whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [4] GONG Y, ZHANG S. Ultrafast 3-d shape measurement with an off-the-shelf dlp projector[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19743-19754.
- [5] ZHANG S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 28-37.
- [6] ZHENG Y, WANG Y, LI B. Active shape from projection defocus profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*. 2020, 134: 106277.
- [7] YING X, LAURA E, JUNFEI D, et al. Phase error compensation for three-dimensional shape measurement with projector defocusing[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(17): 2572-2581.
- [8] ZHANG S, HUANG P S. Phase error compensation for a 3-d shape measurement system based on the phase-shifting method[J]. *Optics Engineering*, 2007, 46: 063601.
- [9] AYUBI G A, AYUBI J A, JMD M, et al. Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3682-3684.
- [10] ZUO C, CHEN Q, FENG S, et al. Optimized pulse width modulation pattern strategy for three-dimensional profilometry with projector defocusing [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(19): 4477-4490.
- [11] XING S, GUO H. Directly recognizing and removing the projector nonlinearity errors from a phase map in phase-shifting fringe projection profilometry [J]. *Optics Communication*, 2019, 435: 212-220.
- [12] CAO M, ZHANG G M, CHEN, Y M. Stereo matching of light-spot image points in light pen in binocular stereo visual [J]. *Optik*, 2014, 125(3): 1366-1370.
- [13] 孟森森,蔡宁,林斌. 基于阈值优化抖动算法的高质量三维形貌测量[J]. *光子学报*, 2019, 48(8): 16-24.
- [14] 刘飞,李佳鑫,赖俊霖,等. 基于多频外差的全频解相方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 173-180.
- [15] 曾凡志,鲍苏苏. 一种自适应多窗口的立体匹配算法[J]. *计算机科学*, 2012, 39: 519-521, 558.
- [16] JIAO X X, ZHANG L, SUN Y, et al. Three-dimensional reconstruction for a large scene of integral imaging based on color-position characteristics [J]. *Optoelectronics Letters*, 2015, 11(4): 268-272.
- [17] RAN Q, ZHOU K M, YANG Y L, et al. High-precision human body acquisition via multi-view binocular stereopsis [J]. *Computers & Graphics*, 2020, 87: 43-61.
- [18] 杨初平,翁嘉文,王健伟. 基于载频条纹相位分析的畸变测量和校正[J]. *光子学报*, 2010, 39(2): 316-319.

作者简介

严飞,副教授,博士,主要从事三维测量与显示、嵌入式图像处理技术等方面的研究。

E-mail: fyan@nuist.edu.cn

刘佳(通信作者),教授,博士,主要从事虚拟现实增强现实、人机交互及机器人技术等方面的研究。

E-mail: liujia@nuist.edu.cn