

基于双目结构光的三维扫描测量系统设计

严飞, 吴迪, 祁健, 于强, 路长秋, 文杰, 肖雨倩

(南京信息工程大学自动化学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 在众多的三维测量与成像方法中, 主动式结构光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, 在工业测量中的应用越来越广泛。由于一般的三维扫描测量系统受限于投影系统的投影速度和标定精度, 难以提高结构光测量效率和精度。因此提高三维扫描测量系统的测量效率和精度有着重要研究意义和应用价值。

为提高三维扫描测量系统的条纹投影效率和测量精度, 本文设计出一种基于双目结构光的三维扫描测量系统, 实现快速投影编码条纹, 并结合双目立体匹配算法得到高精度视差信息。首先, 该设计采用 Bayer 抖动技术将投射的灰度条纹转化为二值条纹, 降低投影系统离焦造成对比度、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, 将具有唯一性的绝对相位作为立体匹配的基元, 利用视差约束关系和 MSD 匹配代价计算来获取最佳相位匹配点, 从而解决了弱纹理和重复纹理的匹配问题, 并且用二次曲线亚像素插值对视差进行精细化, 优化了亚像素视差的精度。再经过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。相比传统单目结构光测量系统, 该系统无需再对投影系统标定, 减小了投影系统非线性 Gamma 影响造成的误差。

通过实验对精密小球和雕像进行测量, 结果表明本文设计的方法测量精度为 0.059mm, 与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%。最后对生活 and 工业中的一些物品进行了测量, 例如鞋底、水管、风扇和水果, 可以容易区分这些物品的尺寸大小和形状轮廓等。

关键词: 三维扫描测量系统;结构光;双目立体视觉;二值离焦;Bayer 抖动

Design of 3D Scanning Measurement System Based on Binocular Structured Light

Yan Fei, Wu Di, Qi Jian, Yu Qiang, Lu Changqiu, Wen Jie, Xiao Yuqian

(College of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology,

Nanjing 210044, Jiangsu, China)

Abstract: It also presents information better in front of people through various technical means, and improves people's cognition of the world from two-dimensional to multi-dimensional. Among the many 3D measurement and imaging methods, active structured light 3D measurement and imaging technology stands out. Due to its advantages of non-contact, high speed and high precision, it is more and more widely used in industrial measurement. Because the general 3D scanning measurement system is limited by the projection speed and calibration accuracy of the projection system, it is difficult to improve the measurement efficiency and accuracy of structured light. Therefore, improving the measurement efficiency and accuracy of the 3D scanning measurement system has important research significance and application value.

To improve the fringe projection efficiency and measurement accuracy of the 3D scanning measurement system, a 3D scanning measuring instrument based on binocular structured light is designed in this paper to realize the rapid projection of coding fringes, and combine the binocular stereo matching algorithm to obtain high-precision 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, and the unique absolute phase is used as the primitive of stereo matching, and the optimal phase matching point is obtained by using the parallax constraint relationship and MSD matching cost calculation, solves the matching problem of weak textures and repeated textures. And the parallax is refined by quadratic curve sub-pixel interpolation, which optimizes the accuracy of sub-pixel parallax. The depth information and three-dimensional information of the measured object are obtained through the principle of triangulation and dual-target calibration. Compared with the traditional monocular structured light measurement system, the system does not need to calibrate the projection system, and reduces the error caused by the nonlinear Gamma effect of the projection system. The precision balls and statues are measured by experiments.

The results show that the measurement accuracy of the method designed in this paper is 0.059mm, which is close to the measurement accuracy of the traditional twelve-step phase shift, and is 52.8% higher than the traditional three-step phase shift. Finally, some items in life and industry are measured, such as shoe soles, water pipes, fans and fruits, and the size and shape contours of these items can be easily distinguished.

Keywords:3D scanning measuring instrument;structured light;Binocular stereo vision;Binary Defocus; Bayer Jitter

1 传感器设计背景和应用价值

近些年来,随着科学技术的不断发展和自动化水平的不断提高,在工业检测、汽车制造、生物医学、逆向工程等领域对物体的三维形貌测量提出了更高的要求。三维扫描测量系统的测量精度一般会受到投影器件的非线性 Γ 畸变的影响,还有环境等因素对解相过程造成的噪声影响,另投影系统投影条纹的速度及重建算法的速度也会影响整个系统的测量效率。如何快速准确的获得物体表面的三维模型成为了计算机视觉领域亟待解决的问题。

(1) 传统的光学三维测量分为两种投影模式:一种是在聚焦模式下投射灰度条纹来获取物体的相位信息,另一种是通过离焦二值条纹,通过调制正弦脉宽来得到相位信息。现如今应用较为广泛的数字投影系统(例如 DLP4500)投影灰度条纹的速度在 120 帧/秒,投射二值条纹速度则高达 4225 帧/秒。投射灰度条纹进行测量,一般都会受到投影系统的非线性干扰,需要对其进行校正,而现有的算法程序复杂且效果一般;投射方波二值条纹进行离焦,虽然采集回的离焦条纹不受投影系统的非线性影响,但是难以控制好离焦量的大小,不容易获得正弦性较好的离焦条纹,且方波离焦是一维二值模式,离焦量过大会降低测量景深和条纹对比度,过小则不能有效去除高阶谐波分量,会造成精度降低。

(2) 投影条纹的编码和解码策略是获取高精度相位信息的关键,目前常用的三类编码方法为:时间编码、空间编码和混合编码。时间编码的每个码字的比特在时间上被多路复用,且抗扰能力强,常用于高精度测量,但是需要投影的数量较多,常用于静态物体测量,因此测量效率较低。而空间编码和混合编码都是用于动态场景的高速测量,虽然可以用较少的投影图像快速获取物体的信息,但是在编码和解码的过程时,计算复杂度较高且容易造成解码出错,对系统的环境噪声也非常敏感,不利于提高测量精度。

(3) 将相位信息转化为深度信息是三维测量中重要的一步,一般有两种测量模型,一是基于单目结构光的三维测量,可以通过相高法、逆相机法等来完成转化。单目测量无论哪一种方法都需要对投影系统进行复杂的标定,而通常会因标定误差造成测量精度下降。二是基于双目立体视觉的三维测量,因为在同一光场的调制下,左右视图的相位信息是不会发生改变的,通过立体匹配找到相机坐标系下不同视角二维图像之间的对应特征,并将其还原成

世界坐标系下的三维空间信息。而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。好处是无需标定投影系统，对于提高匹配过程的效率是很关键的，且精度一般较单目结构光测量要高。

2 创新点与优势

本系统使用主动式结构光技术和被动式双目立体技术结合的方法进行三维测量，设计并搭建了一套三维扫描测量系统系统，分别对精密小球和雕像进行测量。通过实验对比，相比传统三维测量系统，本系统投影效率高、测量精度高及系统抗干扰性强。其主要的创新有以下三点：

(1) 在系统的投影模式上，系统使用二维面积调制离焦技术来减小谐波影响，将 8 位的灰度条纹通过 Bayer 抖动生成 1 位的二值条纹，此时只需轻微离焦投影系统，投射出的二值条纹就具有较好的仿正弦条纹图案。相比一维二值模式的方波离焦，离焦量过大会降低测量景深和条纹对比度，该方法可以很好的改善投影条纹质量，不会造成条纹对比度下降和测量的景深减小。

(2) 在系统的条纹编码和解码策略上，系统采用相位测量轮廓术 (Phase measurement profilometry, 简称 PMP) 来获取待测物体的相位信息。通过三步相移来获取图像信息中的包裹相位，并通过多频外差法采用时域相位展开的方式把包裹相位展开为绝对相位，能提高解相的精度。选取了三种不同周期的条纹，三个条纹周期分别为 24、22、20 个像素，经过叠加后可以在 1320 个像素内做到对包裹相位进行无歧义展开。且三种周期条纹的周期相近，不会因离焦降低条纹的正弦性。该系统测量一次需投射 9 张 1 位条纹，理论上测量的投影帧率在 469 帧/秒以内，故在提高测量效率的同时也能提高测量精度。

(3) 在获取测量物体的三维信息的方法上，系统采用了被动式双目立体视觉获取视差信息，传统立体匹配是基于灰度值，在特征信息不明显地方会造成误匹配。故本文选取绝对相位作为匹配基元对相同相位点进行匹配，由于绝对相位是无歧义的，所以可以很大程度提高匹配准确率。本文还对匹配算法做了改进，提出一种基于全局和局部结合的快速搜索方法，并对相位信息进行检查，提高了匹配的速度和精度。最后通过标定相机得到透视变换矩阵，无需标定投影系统即可计算空间三维坐标信息。这样使得整个系统受硬件设备的干扰和环境噪声变得更小，大大的提高了系统的抗干扰性和稳定性。

3 实现方案简介

3.1 设计原理

该系统采用的双目结构光测量系统由一台数字投影系统、两台工业相机和被测物体组成，如图 2-1 所示。投影系统一般采用 DLP 技术的 LED 机型，两台相机采用高清摄像头分别位于投影系统左右，符合小孔成像模型。其中左右相机坐标系统为 $O_{c1}X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 、 $O_{c2}X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ ， $p1$ 、 $p2$ 为待测点 P 在相机坐标系下无畸变图像的齐次坐标。通过相机标定获取相机的内、外参数，内参数主要用于获取透视变换矩阵将像素坐标系转化为世界坐标系；外参数用于获取两个相机旋转和平移的相对位置关系，若以左相机为原点，就可以将右相机空间坐标映射到左相机下。

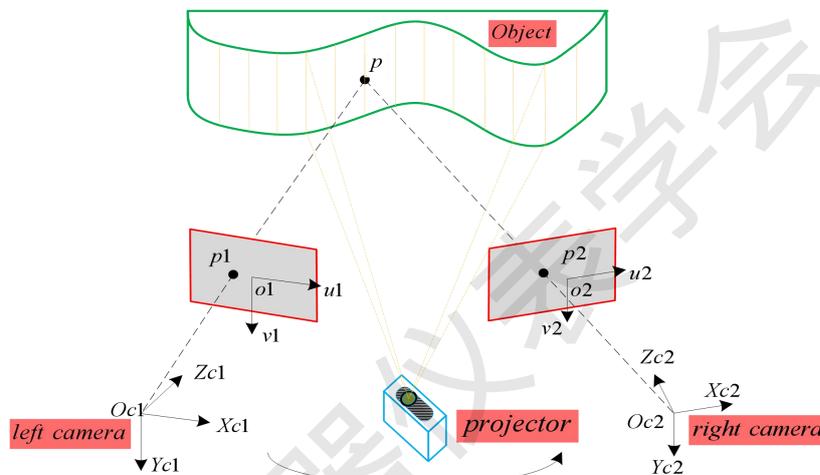


图 2-1 双目结构光系统测量原理图

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 2-2 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。 p_l' 、 p_r' 为被测点在相机左右平面成像点，该点到基线的距离为焦距 f ， X_l 与 X_r 之差为视差 d 。 P 点的深度 z 计算如公式 (1) 所示：

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

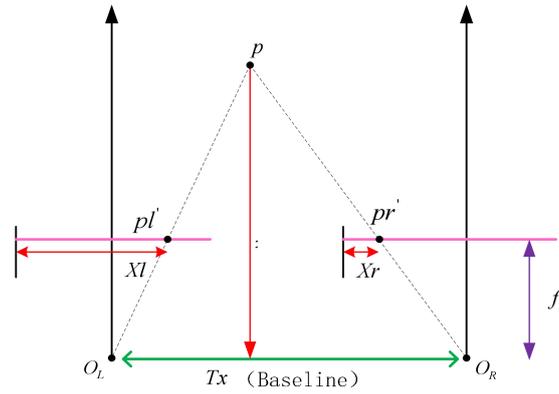


图 2-2 三角测量原理

其中， Q 为透视变换矩阵，通过下列公式（2）、（3）、（4）求得世界空间三维坐标 $\left[\frac{X}{W}, \frac{Y}{W}, \frac{Z}{W} \right]$ ，其中其中 c_x 、 c_y 为左相机主点在图像中的坐标， c'_x 表示右图像主点，当矫正正确时 $c_x = c'_x$ ，此时 $\frac{Z}{W}$ 相当于公式（1）中的深度 z ， T_x 和 d 也同公式（1）中的基线和视差一样。

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_x} & \frac{c_x - c'_x}{T_x} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - c_x \\ y - c_y \\ f \\ \frac{-d + c_x - c'_x}{T_x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{X}{W} \\ \frac{Y}{W} \\ \frac{Z}{W} \\ \frac{1}{W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{x - c_x}{d} T_x \\ -\frac{y - c_y}{d} T_x \\ -\frac{f}{d} T_x \\ \frac{1}{d} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2 设计方法

3.2.1 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，三维测量信息的分

分辨率。

传统相移法投射 8 位灰度正弦条纹获取包裹相位信息，至少需要投射三幅相移条纹才可以计算相位。且由于投影系统的非线性 Γ 影响，投影系统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，即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。为解决这部分误差带来的影响，且考虑到二元结构光图案具有良好的鲁棒性，不会受到投影系统的非线性影响。故本文将 8 位灰度条纹通过 Bayer 抖动生成新的 1 位二值条纹，条纹抖动过程如图 3-1，抖动后的条纹是经过二维面积调制，经投影系统轻微离焦后，也不会降低条纹的对比度和质量。

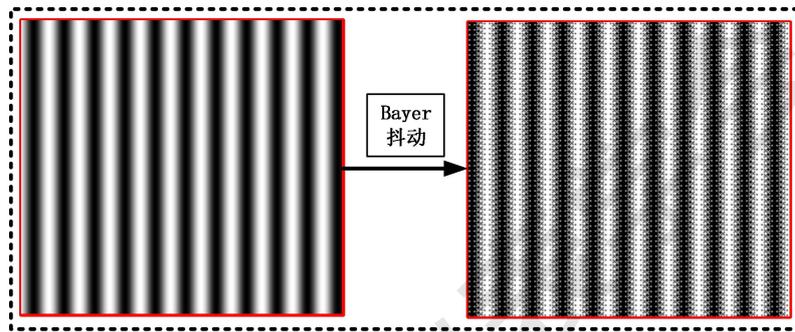


图 3-1 Bayer 抖动过程

离焦后的条纹是仿正弦条纹，为获取较为准确的相位信息，用三步相移法来解出包裹相位和三频外差来展开相位。同时考虑到投影系统离焦程度，本选取的三种条纹周期是非常接近，这样就能避免不同周期的条纹在离焦后丢失更多的正弦性。

该系统所使用的数字投影系统 DLP4500 投影 8 位灰度条纹的帧率在 120 帧/秒，而投射 1 位的条纹可以达到 4225 帧/秒，本系统测量一次需投射 9 张 1 位条纹，如图 3-2。理论上帧率在 469 帧/秒以内，故在效率上投射 1 位的条纹更显优势。三频三相的投影条纹如图 4 所示，其中 $I_1 \sim I_3$ 为第一种周期三步相移条纹， $I_4 \sim I_6$ 为第二种周期的三步相移条纹， $I_7 \sim I_9$ 为第三种周期的三步相移条纹。

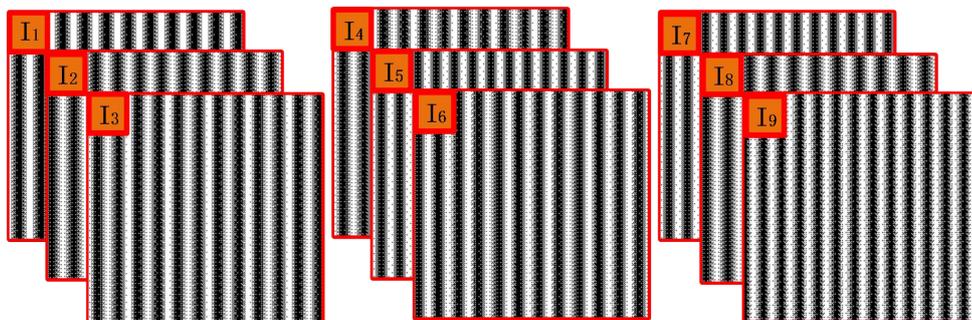


图 3-2 三频三相条纹编码图案

相移技术是通过数字投影系统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，经过运算就能得到待测物体的包裹相位分布。 N 步相移公式 (5) 如下：

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

$$n=1,2,\dots,N \quad (5)$$

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。将公式 (5) 带入到式 (6) 可以计算出包裹相位：

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

$$(6)$$

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，故需要将包裹相位展开为绝对相位。

本文采用多频外差通过时域展开相位的方法，选取了三种不同周期的条纹，周期分别为 24、22 和 20，这三个条纹周期经过多频外差原理叠加后的周期为 1320。但考虑到使用的 DLP4500 投影系统输入条纹宽度为 912，截取前 912 个条纹宽度烧录到投影系统中。投影系统输出条纹宽度和相机的拍摄图像的宽度为 1280，意味着相位展开后，获得的绝对相位在 1280 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，本文就以双频外差为例，其相位展开原理如公式 (7)、(8)、(9)：

$$T_{12} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \quad (7)$$

$$\Delta\phi_{12} = \phi_1 - \phi_2 = \begin{cases} \phi_1 - \phi_2 & (\phi_1 > \phi_2) \\ 2\pi + \phi_1 - \phi_2 & (\phi_1 \leq \phi_2) \end{cases} \quad (8)$$

$$\phi_{12} = \phi_1 + \text{floor} \left(\frac{\Delta\phi_{12} \frac{T_{12}}{T_1} - \phi_1}{2\pi} \right) \times 2\pi \quad (9)$$

其中， ϕ_1 ， ϕ_2 分别对应为 T_1 ， T_2 两种周期的包裹相位， T_{12} 为 T_1 ， T_2 两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。

下图为该方法的仿真图，其中图 3-3 为相位平面图，图 3-4 为绝对相位的 3D 图，图 3-5 为各种周期（包含叠加）的相位图

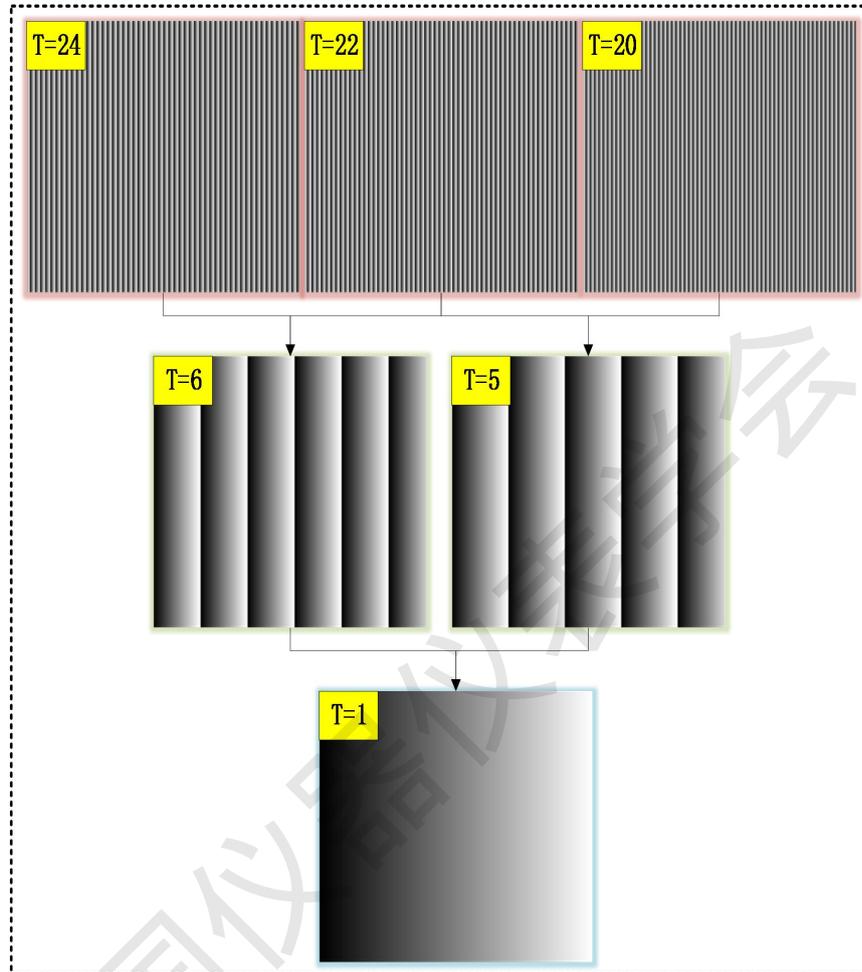


图 3-3 相位平面图

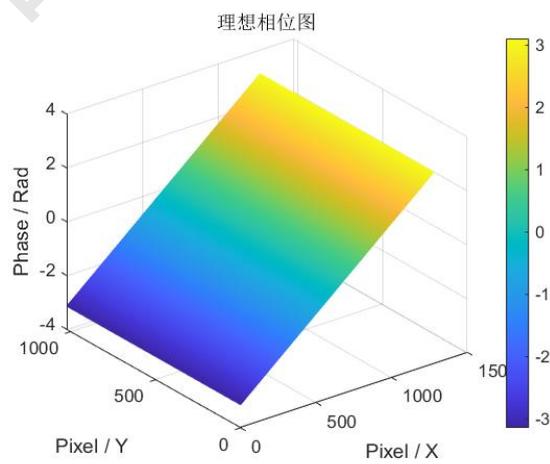


图 3-4 绝对相位的 3D 图

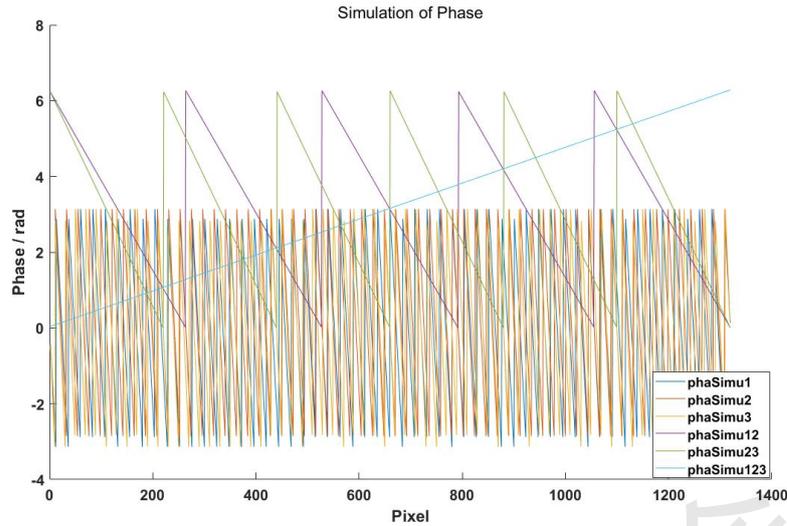


图 3-5 各个周期（包含叠加）的相位图

3.2.2 基于绝对相位的立体匹配算法

立体匹配通常是用来分析不同视角的二维图像，来获取图像之间的相似性，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还具备唯一约束性。

本文提出全局搜索和局部搜索结合的快速搜索方法，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，匹配过程分两步，第一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，若存在相位小于或者等于 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。通过滑动右视图待搜索框寻找可信点，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。第二步将第一步中获取的可信点进行 MSD 匹

配代价计算，计算方式如公式（10）所示：

$$D(i, j) = \frac{1}{3 \times 3} \times \sum_{s=1}^3 \sum_{t=1}^3 [BOX_L_i(s, t) - BOX_R_j(s, t)]^2 \quad (10)$$

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。本文将搜索框大小设置的是 (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，故采用 MSD 匹配算法，计算出左匹配框和右搜索框绝对相位值的差值平方和，将其取均值。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。插值公式为：

$$d_x = d - \frac{C_+ - C_-}{2(C_+ + C_- - 2C)} \quad (11)$$

式中 d 为某点最小匹配度量的视差值，即当前立体匹配点，为了计算视差 d 的亚像素精度 d_x ，取视差为 d 点相邻两个视差为 d_+ 、 d_- 的视差值，其中 C 、 C_+ 、 C_- 分别表示 d 、 d_+ 、 d_- 处的代价聚合值。

4 实验和结果分析

4.1 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扫描测量系统。该系统的采集模块由两台型号为 MV-SUA133GM-T 工业黑白相机和一台型号为 DLP4500 数字投影系统组成，其中相机的分辨率@帧率为 1280X1024@245FPS，投影系统的输出分辨率为 1280×800。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 15mm，精度为 0.01mm。搭建好的测量系统实物图如图 4-1 所示，其中待测试模型为大卫石雕头像。

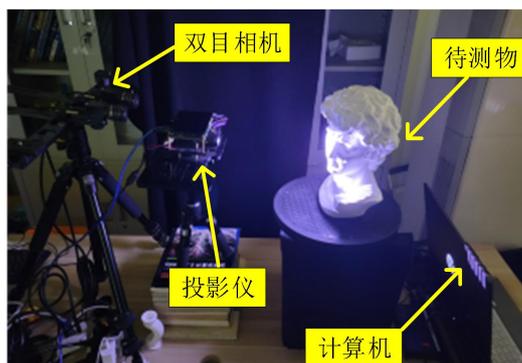


图 4-1 双目结构光测量系统

系统进行测量前需要对系统标定，本文使用软件 Matlab2021b 中的 Stereo Camera Calibrator App 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片分辨率高，最后左右相机各共采集 10 张图片来标定。标定的结果如下图 4-2 所示：系统标定的全局平均误差为 0.04pixels。

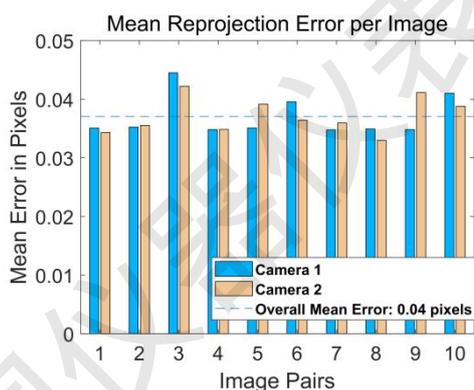


图 4-2 双目相机标定误差

标定结果得到双目相机的内外参数如下表 4-1 所示：

表 4-1 双目相机标定结果

	Left camera	Right camera
Internal parameter matrix	$\begin{bmatrix} 2085.599 & 0 & 0 \\ 0 & 2085.415 & 0 \\ 676.143 & 549.679 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2074.965 & 0 & 0 \\ 0 & 2074.547 & 0 \\ 646.116 & 531.465 & 1 \end{bmatrix}$
Radial distortion	[-0.113 0.197]	[-0.105 0.124]
Tangential distortion	[-0.0002 0.0006]	[0.0011 0.0008]

右摄相机相对左摄相机外参旋转 R 与平移矩阵 T 如下：

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

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

4.2 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 哑光面陶瓷球,直径为 50.8140mm。图 4-3 (a) 为传统灰度条纹正弦条纹图案,图 13 (b) 二值抖动后离焦得到的正弦条纹图案。显然,两张图像的平均亮度大致一样,通过对两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。

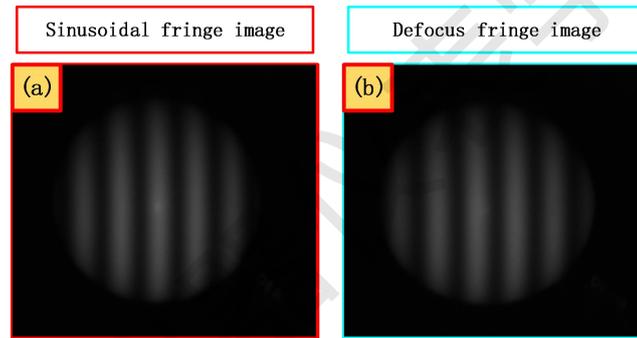


图 4-3 正弦条纹图像。(a) 传统灰度正弦条纹; (b) 离焦后的正弦条纹

如下图 4-4 为本文方法中左相机获取的变形条纹图案,图 4-4 (a)、(b)、(c) 为三种不同周期的图案。

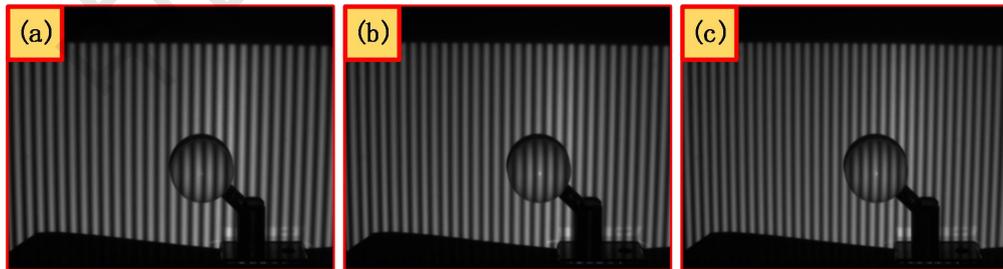


图 4-4 左相机采集的图像。(a) 第一种周期条纹图案; (b) 第二种周期条纹图案; (c) 第三种周期条纹图案

如下图 4-5 是对左相机拍摄到的一组测量图像的解相,Pha1、Pha2、Pha3 分别为初始三种周期的包裹相位,Pha12、Pha23 分别为初始周期两两叠加后的相位,最后 Pha 为所解出的绝对相位,图中可以看出,小球和背景的绝对相位分布是线性递增的,解相是准确的。

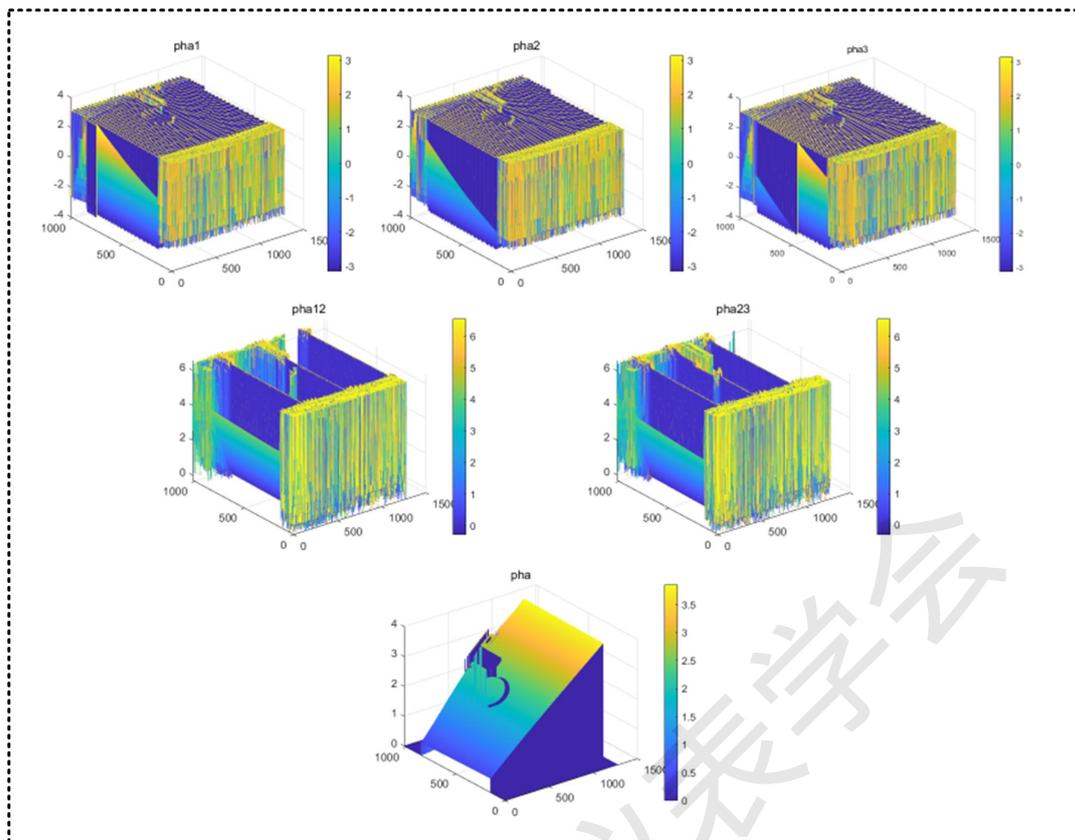


图 4-5 左相机解得的相位 (3D)

将采集到的图案按照 3.1 节的方法进行解绝对相位，其中，图 4-6 为解相位和相位校正结果，图 4-6 (a) 为解出的绝对相位，图 4-6 (b) 为相位立体校正后的结果。

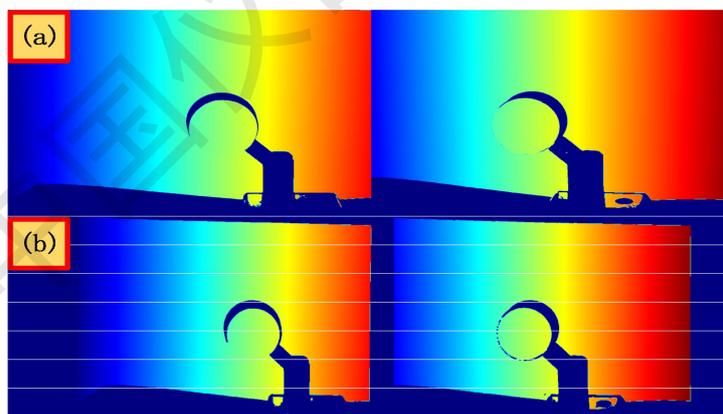


图 4-6 解相位和相位校正结果。(a) 解相位结果；(b) 相位校正结果

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 2 节的三维测量原理，将视差信息转化为深度信息，通过相机标定后的透视变换矩阵就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 4-7 所示，

在实验过程中保证环境不变，只改变投影条纹的方式，分别对传统三步相移、十二步相移和本文方法进行对比。

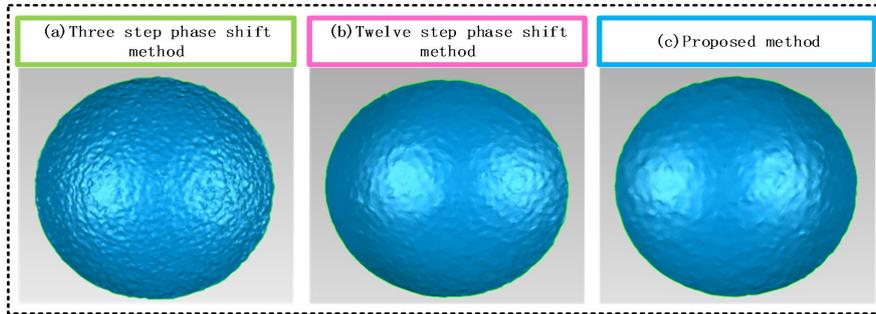


图 4-7 小球重建结果。(a) 三步相移结果；(b) 十二步相移结果；(c) 本文结果

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。

为了评价提出的测量方法精度，在获得点云数据的基础上，选取约 2 万多个点拟合标准球，拟合得结果如下图 4-8 所示。

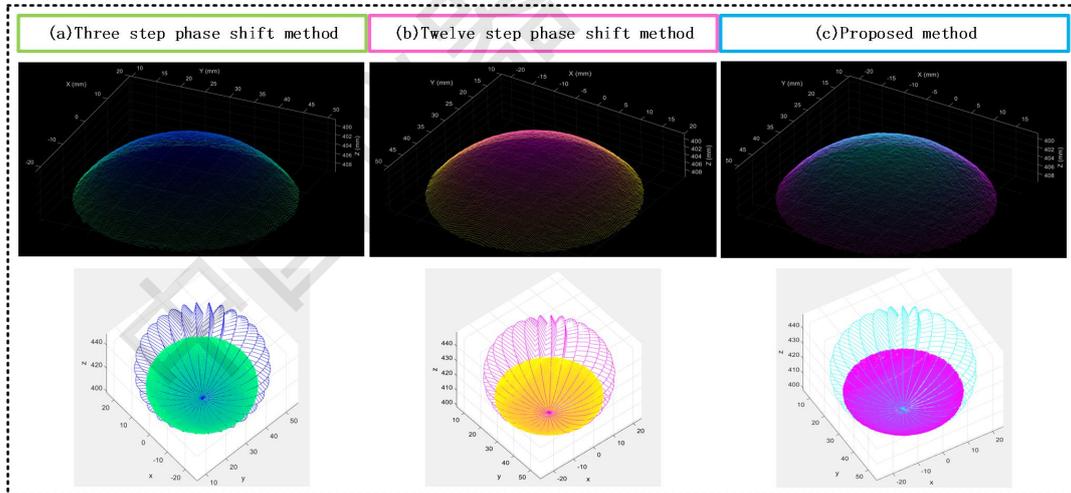


图 4-8 小球拟合结果。(a) 三步相移结果；(b) 十二步相移结果；(c) 本文结果

将测得的点云数据拟合成标准球体直径的小球，结果如表 4-1，本文方法拟合后的圆心坐标为 $(x_0, y_0, z_0) = (-1.0555, 30.6273, 424.2870)$ ，其中拟合半径为 25.40701 mm，将拟合的小球和标准球对比，每一个点的误差可表达为：

$$e = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} - r_0 \quad (12)$$

其中, e 表示该点误差, (x, y, z) 为实际点云的坐标, 拟合的小球圆心坐标 (x_0, y_0, z_0) , r_0 为拟合的半径, 该系统方法测得 RMSE 为 0.59mm。

表 4-1 各种方法的精度对比

方法	三步相移	十二步相移	本文方法
拟合点云数 (个)	25902	26005	25783
拟合半径 (m)	25.40702	25.40701	25.40701
均方根误差 (m)	0.125	0.043	0.059

其中三步相移、十二步相移的 RMSE 分别为: 0.125mm、0.043mm。

4.3 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 160mm 的石膏大卫雕像进行测量, 下图 4-9 为不同方法的测量重建结果。

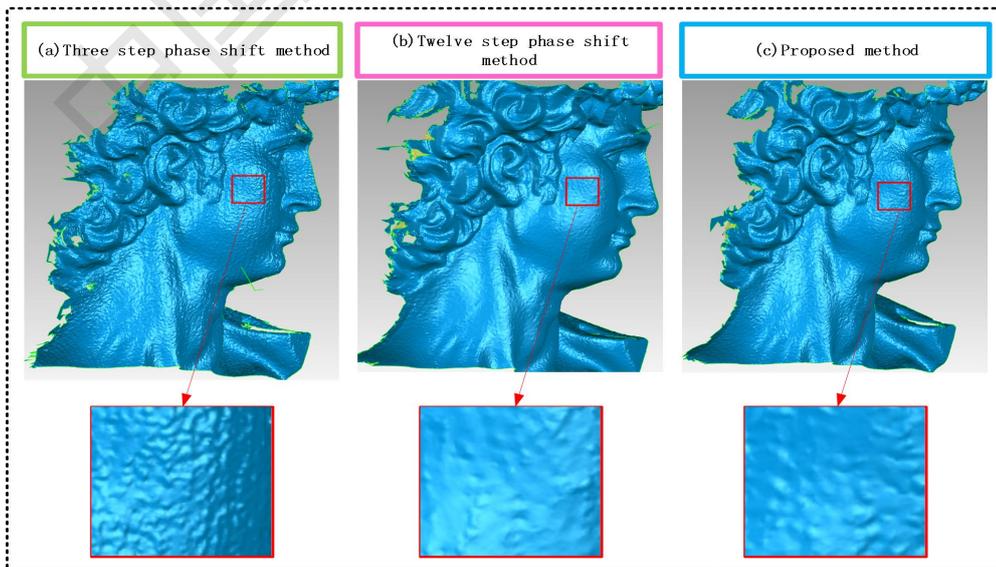


图 4-9 大卫雕像重建结果。(a) 三步相移结果; (b) 十二步相移结果; (c) 本文结果

从图 4-9 可以看出，三步相移由于受到投影系统 Γ 等非线性影响，重建表面有类似“水波纹”的错误结果，而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。

4.4 多种物品的测量

下图 4-10 为生活中或工业中的一些物品的三维扫描测量，其中图 4-10 (a) 为鞋底的凹槽的纹路检测，可以看出，经过三维扫描测量，纹理都可以细致的重建出来，图 4-10 (b)、(c) 为弯管和风扇的测量，可以用来判断它们的尺寸和精度是否满足要求，图 4-10 (d) 为水蜜桃的扫描测量，可以用来检测大小并对其进行分类。

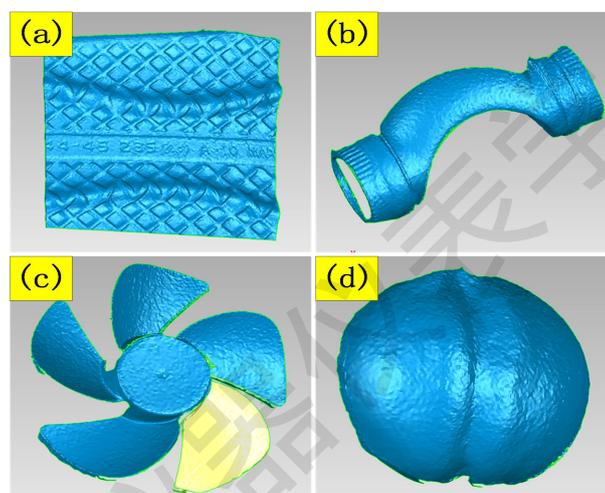


图 4-10 多种物品的扫描测量

参考文献:

- [1] Petriu E M, Sakr Z, Spoelder H J W, et al. Object recognition using pseudo -random color encoded structured light[C]//Conference Record -IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference. IEEE, 2000:1237-1241.
- [2] 丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等.非接触式三维重建测量方法综述[J].激光与光电子学进展, 2017,54 (7) ,070003.
- [3] Lepetit V, Fua P. Monocular Model-Based 3D Tracking Of Rigid Objects: A Survey[J]. Foundations & Trends in Computer Graphics & Vision, 2005, 1 (1) :1--89.
- [4] Besl P J, Mckay N D.Method for registration of 3-D shapes[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1992, 14 (3) :239-256.

- [5] Moore A. An introductory tutorial on kd-trees[C]//Quantum Computing: Theory, Applications and Implications (Digest No:1997/145), IEE Colloquium on. IET, 1991:1/1 - 1/3.
- [6] 殷永凯, 张宗华, 刘晓利, 等. 条纹投影轮廓术系统模型与标定综述[J]. 红外与激光工程, doi:10.3788/IRLA202049.0303008.
- [7] 张吴明, 钟约先, 由志福等. 基于结构光编码的相展开方法[J]. 光学技术, 2002, 28 (5), 404-406.
- [8] Levin D. The Approximation Power of Moving Least-Squares[J]. Mathematics of Computation, 2000, 67 (224) :1517-1531.
- [9] Qingsheng Gao, Yuntao Song, Weibin Xi, Meng Zhang, Qiang Wan, Shahab Ud-Din Khan, Wei Deng, Chunlong Zou. Real Time Measurement and Analysis for Three-Dimensional Displacement of EAST Cold Magnets[J]. Journal of Fusion Energy, 2014, 335:.
- [10] Ming-Hung, Chiu, Yen-Hsin, Chen, Jian-Ming Su. A New 3D Surface Profile Measuring System Based on the Telescope and Webcam[J]. Natural Science, 2014, 0616:.
- [11] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. Opti Eng, 1999, 39 (1) :10 -22.
- [12] Chen C, Zheng Y F. Passive and Active Stereo Vision for Smooth Surface Detection of Deformed Plates[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, 42 (3) :300-306.
- [13] 李洪海, 王敬东. 摄像机标定技术研究[J]. 光学系统器, 2007, 29 (4) :7-12
- [14] Will P M, Pennington K S. Grid coding: A preprocessing technique for robot and machine vision[J]. Artificial Intelligence, 1971, 2 (3-4) :319-329.
- [15] 周利兵, PMP 中相移算法与误差分析研究[D]成都:四川大学, 2003.
- [16] Rioux M. Laser range finder based on synchronized scanners.[J]. Applied Optics, 1984, 2321:.