

文章编号: 1672-8785(2023)10-0021-13

一种利用结构光照明的高精度 三维测量系统

李 伊 梁敏华 董 健

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为实现微小物体的全方位高精度三维测量, 构建了一种利用结构光照明的高精度三维测量系统。对系统采用的双远心镜头、相位解算方法、多投影点云融合算法等进行研究。首先利用双远心测量头采集图像数据, 然后采用多频相移与互补格雷码相移两种方法进行相位解算, 并分析比较两种方法在重建精度和重建效率方面的性能, 最后针对特定点云噪声提出相位滤波方法、优化的统计滤波方法以及多投影点云融合匹配校正方法。实验结果表明, 系统应针对不同使用场景选用不同的相位解算方法; 相较于单投影双目系统, 基于多投影的本系统能获取目标全貌, 且平面及高度测量精度均在 $10\ \mu\text{m}$ 以下; 在 GPU 加速后, 测量速度提升 218 倍。该系统基本满足高精度工业测量的精度高、效率高等要求。

关键词: 结构光; 三维测量; 远心镜头; 高精度

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.10.004

A High-Precision Three-Dimensional Measurement System Based on Structured Light Illumination

LI Yi, LIANG Min-hua, DONG Jian

*(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese
Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

Abstract: In order to realize the full range and high-precision 3D measurement of small objects, a high-precision 3D measurement system using structured light illumination is constructed. The double telecentric lens, phase solving method and multi-projection point cloud fusion algorithm used in the system are studied. Firstly, the image data is collected by dual telecentric measuring head, then the phase is solved by multi-frequency phase shift and complementary gray code phase shift, and the performance of the two methods in terms of reconstruction accuracy and reconstruction efficiency is analyzed and compared. Finally, the phase filtering method, the optimized statistical filtering method and the multi-projection point cloud fusion matching correction method are proposed for specific point cloud noise. The experimental results show that the system should choose different phase solving methods according to different scenarios. Compared with the single projection

收稿日期: 2023-05-26

作者简介: 李伊(1986-), 女, 黑龙江伊春人, 硕士, 实习研究员, 主要研究方向为计算机视觉及结构光三维测量。E-mail: 2426942598@qq.com

binocular system, the multi-projection based system can obtain the full picture of the target, and the precision of the plane and height measurement is less than $10\text{ }\mu\text{m}$. After GPU acceleration, the measurement speed is increased by 218 times. The system can basically meet the requirements of high precision and high efficiency of high precision industrial measurement.

Key words: structured light; three-dimensional measurement; telecentric lens; high-precision

0 引言

目前, 条纹投影三维测量技术在工业检测、医疗检测、文物保护和计算机视觉^[1-4]等领域发挥着至关重要的作用。随着微光学、微电子和集成化技术的发展, 工业产品设计更加高精度化和微小化。因此, 机械加工和制造标准必须满足严格的约束。这促进了结构光技术朝着微小物体表面三维轮廓信息方向发展^[5]。

近年来, 国内外许多学者针对小视场三维测量系统的结构及解算原理开展了大量的研究。艾佳等人^[6]将投影仪和相机搭配远心镜头, 研发了一种小视场三维测量系统。该系统精度为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 但测量视场较小且测量深度仅为 $380\text{ }\mu\text{m}$ 。张贵娇^[7]提出了基于多频外差的测量原理。该方法由外差法和相移法组成, 能够完成复杂曲面的测量。Payeur P 等人^[8]设计了一种将结构光与双目相机相结合的系统。结构光条纹的加入使得双目立体匹配的准确性大大提高, 但采用的三角立体标定法在重建精度上仍旧低于相位高度模型标定的方式。由上述研究进展可知, 大部分的测量系统由于测量范围小、测量精度低、测量效率低等因素, 未能达到工业检测的要求。

本文提出了一种结构光照明测量系统。利用基于 DLP4710 芯片开发的投影组件将正弦条纹投影到物体表面, 搭配同步触发相机采集变形条纹图, 并将传统结构光中的针孔镜头替换为远心镜头, 消除了透视误差, 增大了拍摄景深, 降低了图像失真并提高了图像分辨率。本文对系统使用的两种解码算法进行了精度、准确率以及效率的对比, 并对互补格雷码的二值化方法进行了优化; 针对特定点云噪声提出了相位滤波以及优化的统计滤波, 再使用基于

控制方程的相位高度模型进行了三维重建; 最后采用多投影点云融合校正算法来得到目标微小物体的全方位、高精度三维点云。

1 结构光三维测量基本原理

三维复杂目标的高精度结构光扫描大多使用远心结构光三维测量设备。基于结构光的双远心三维扫描系统由一台相机、一个双远心镜头和多个光栅投射组件构成。其中, 双远心镜头的光轴与多个光栅投射组件的轴线呈固定预设角度。下面以单相机、单双远心镜头、单光栅投影组件为例(见图 1)进行介绍。在扫描的过程中, 首先利用光栅投射组件向被测物体投射多组预设结构光编码图案, 并同时控制相机采集被测物体表面调制而产生形变的结构光图案, 然后对一系列结构光图像进行相位解码, 最后根据预先标定的全画幅相位与高度的对应关系参数来解算目标的空间三维坐标。

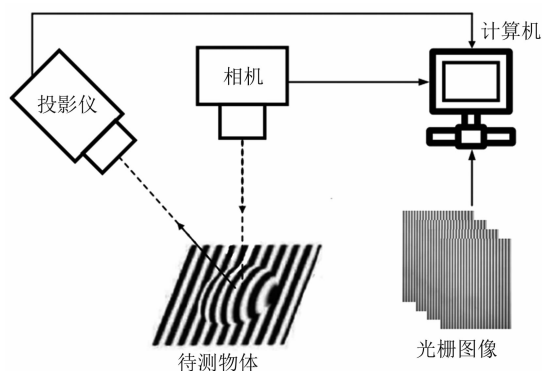


图 1 系统原理图

1.1 远心相机模型

远心相机成像模型如图 2 所示。与真空成像模型不同, 双远心透镜的孔径光阑放置在焦点上, 并且只允许从物体侧平行于光轴的光线通过。入射平行光保证了足够大的景深范围, 从镜头出来的平行光则保证即使工作距离在景

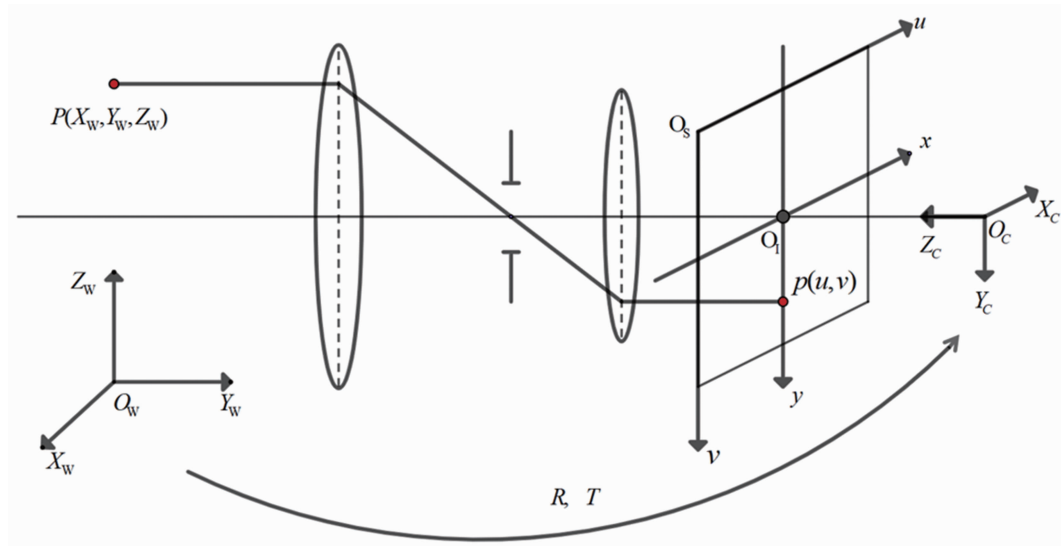


图2 远心镜头成像模型

深范围内发生大幅变化, 成像高度(即放大倍率)也不会发生变化^[9]。双远心镜头解决了普通镜头在分辨率、景深和扩展倍率方面不满足高精度测量的问题, 具有零畸变、无透视误差等特点, 适用于高精度测量和检测行业。

1.2 相位主值求解及相位展开

相位解码一般分为相位主值求解和相位解包裹。相位主值求解求出的是光栅相位的相对位置, 其范围为 $0 \sim 2\pi$ 或 $-\pi \sim \pi$ 。这使得一幅完整的光栅条纹图像包含多个相位周期, 不同的像素对应的相位不是唯一的。相位解包裹就是将整张图像画幅中多个相位周期转换成一个连续且完整的相位周期, 使得每个像素对应的相位值在整张图像画幅中是唯一的。绝对相位表达式如下:

$$\Phi_h(x, y) = \phi_h(x, y) + 2\pi k_h(x, y) \quad (1)$$

式中, $\phi_h(x, y)$ 为像素点相位主值, $k_h(x, y)$ 为通过解包裹得到的条纹级次, $\Phi_h(x, y)$ 为绝对相位。

1.2.1 相位主值求解

相位主值的解算采用相移法。通过投射多幅具有预设相位差的正弦条纹图案所得到的系列图像, 计算包含目标三维轮廓信息的包裹相位^[10]。该算法抗噪性强, 计算简单, 应用广泛。为了保证解算精度, 本文采用十二步相移法。

在相移法中, 光栅投射组件投射的图案为强度以正弦分布的光栅条纹图, 强度分布如下:

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta_n] \quad (2)$$

式中, (x, y) 为正弦条纹图案中的像素点坐标; I_n 是采集条纹图像的强度; $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 分别是图像的背景强度和调制强度; $\phi(x, y)$ 是受高度调制的相位; δ_n 是初始相位, 且 $\delta_n = 2\pi n/N$ 。本文采用十二步相移法, 所以投影的每幅正弦条纹图相较于上一张正弦条纹图向固定方向移动了 $1/2$ 个周期。对应的包裹相位 $\phi(x, y)$ 可由式(3)算出:

$$\phi(x, y) = -\arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{12-1} I_n(x, y) \sin(\delta_n)}{\sum_{n=0}^{12-1} I_n(x, y) \cos(\delta_n)} \right] \quad (3)$$

1.2.2 相位展开法

1.2.2.1 三频外差法

多频外差法是一种时间相位展开方法。基于拍频原理, 通过将多个不同频率的正弦光栅相位作差, 将小周期的包裹相位转换为大周期的相位差, 使得相位差信号能够覆盖整个视场; 然后再根据相位差来得到整幅图像的绝对相位分布^[11]。根据实际图像宽度, 选择能够完全标记整幅图像的多个频率, 以确保包裹相

位歧义性问题得到解决。本文使用三个频率, 周期分别为 $T_1=28$ 、 $T_2=26$ 和 $T_3=24$ 。具体解包裹相位的公式为

$$\varphi_{12} = \phi_1 - \phi_2 = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2 & \varphi_1 \geq \varphi_2 \\ 2\pi + \varphi_1 - \varphi_2 & \varphi_1 < \varphi_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$m_{12} = \text{round}\left[\frac{T_2}{T_2 - T_1}\varphi_{12} - \varphi_1/2\pi\right] \quad (5)$$

$$\phi_{12} = 2\pi m_{12} + \varphi_1 \quad (6)$$

$$\varphi_{23} = \phi_2 - \phi_3 = \begin{cases} \varphi_2 - \varphi_3 & \varphi_2 \geq \varphi_3 \\ 2\pi + \varphi_2 - \varphi_3 & \varphi_2 < \varphi_3 \end{cases} \quad (7)$$

$$m_{23} = \text{round}\left[\frac{T_3}{T_3 - T_2}\varphi_{23} - \varphi_2/2\pi\right] \quad (8)$$

$$\phi_{23} = 2\pi m_{23} + \varphi_2 \quad (9)$$

$$\varphi_{123} = \phi_{12} - \phi_{23} = \begin{cases} \varphi_{12} - \varphi_{23} & \varphi_{12} \geq \varphi_{23} \\ 2\pi + \varphi_{12} - \varphi_{23} & \varphi_{12} < \varphi_{23} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} T_{12} \\ T_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (T_1 * T_2)/(T_2 - T_1) \\ (T_2 * T_3)/(T_3 - T_2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$m_{123} = \text{round}\left[\frac{T_{23}}{T_{23} - T_{12}}\varphi_{123} - \varphi_{12}/2\pi\right] \quad (12)$$

$$\phi_{123} = 2\pi m_{123} + \varphi_{12} \quad (13)$$

式(4)~式(9)中的 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 是利用十二步相移法解出的三套条纹的包裹相位。然后将 φ_1 、 φ_2 代入式(4)~式(6), 解算出第一套和第二套条纹联合展开的绝对相位 ϕ_{12} 。同理将 φ_2 、 φ_3 代入式(7)~式(9), 解算出第二套和第三套条纹联合展开的绝对相位 ϕ_{23} 。由于绝对相位 ϕ_{12} 和 ϕ_{23} 仍然无法使得整画幅中每一点的相位值具有唯一性, 所以需继续展开。将 ϕ_{12} 和 ϕ_{23} 作为包裹相位 φ_{12} 和 φ_{23} 代入式(10)~式(13), 最终求得利用三个频率的系列条纹图像展开的绝对相位 ϕ_{123} 。

1.2.2.2 格雷码法

格雷码相位展开也属于时间域展开。图像中每个像素相互独立, 避免了由于目标表面不连续而造成的空间相位展开错误。与多频相移法相比, 格雷码相移法虽然参与解码的图像数量变少, 在解算时间效率上有所提升, 但存在解码错误的情况。因此使用一幅互补格雷码以

及优化后的二值化方法来改善相位展开错误的情况。

在使用格雷码图像求解条纹级次之前, 需使用合适的阈值对格雷码系列图像进行二值化处理。二值化是将目标物体正经历暗条纹的部分所对应的像素置为 0, 将正经历亮条纹的部分所对应的像素置为 1。一般使用固定阈值或者自适应阈值的方法来加以解决。但由于不同物体结构以及表面材质存在差异, 存在目标物体表面反光或表面接收其他环境光而受到影响的情况, 使得正经历暗条纹的像素的表现值大于正经历亮条纹的像素, 最终导致二值化错误影响解码。为改善上述问题, 采用一系列反向格雷码编码图案^[12]与原始格雷码图案(见图 3), 根据式(14)与式(15)得到直接光源分量 $L_d(p)$ 和全局环境光分量 $L_g(p)$ 。基于每个像素对应的原格雷码图像像素值、反向格雷码图像像素值、直接光源分量、全局环境光分量^[13](环境光和物体间的漫反射), 依据式(16)判断该点二值化为 1、0 或不确定(判为无法编码的阴影区域)。

$$L_p^+ = \max_{0 \leq i \leq k} I_i(p), L_p^- = \min_{0 \leq i \leq k} I_i(p) \quad (14)$$

$$L_d(p) = \frac{L_p^+ - L_p^-}{1 - b}, L_g(p) = 2 \frac{L_p^+ + bL_p^-}{1 - b^2} \quad (15)$$

式中, L_p^+ 是像素在格雷码系列图中的灰度最大值; L_p^- 是像素在格雷码系列图中的灰度最小值; $L_d(p)$ 是该像素的直接光源分量; $L_g(p)$ 为全局环境光分量; b 是指光机关闭时与开启时的比值, 一般设置成 0.05。

$$d < m \rightarrow I(x, y) = \text{uncertain}$$

$$d > i_{\text{total}} \wedge p > \bar{p} \rightarrow I(x, y) = 1$$

$$d > i_{\text{total}} \wedge p < \bar{p} \rightarrow I(x, y) = 0 \quad (16)$$

$$p > d \wedge \bar{p} > i_{\text{total}} \rightarrow I(x, y) = 0$$

$$p > i_{\text{total}} \wedge \bar{p} > d \rightarrow I(x, y) = 1$$

$$\text{otherwise} \rightarrow I(x, y) = \text{uncertain}$$

式中, d 是直接照明分量, m 是预定最小阈值。 d 小于 m , 则判定为阴影。本文将 m 设置为 5。 i_{total} 为投影仪所有像素照亮场景的总间

1080; 相机型号为海康 MV-CH250-90YM-C-NF, 相机分辨率为 5120×5120 ; 远心镜头的放大倍率为 0.231, 景深为 10 mm。测量时, 依次将预设图投影到 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 视场内的物体表面上。该系统(见图 5)将 1 台相机与 4 台投影仪搭配使用, 以测量目标物体全貌; 使用硬件触发投影仪依次向被测物体投射结构光, 并使用相机与投影仪进行同步触发采集图像。

表 1 系统标定结果

参数	多频相移	格雷码相移
C_1	-0.65261	-0.0201647
C_2	-7.92946×10^{-7}	-7.88535×10^{-7}
C_3	-2.99378×10^{-7}	-9.2192×10^{-9}
C_4	0.00108007	0.00107896
C_5	2.81409×10^{-5}	8.69529×10^{-7}
D_0	0.0400299	0.0399965
D_1	-0.00217068	-6.73012×10^{-5}
D_2	2.71843×10^{-8}	2.84509×10^{-8}
D_3	-2.35591×10^{-9}	-7.19136×10^{-11}
D_4	1.84135×10^{-9}	1.51545×10^{-8}
D_5	8.13796×10^{-9}	2.61239×10^{-10}

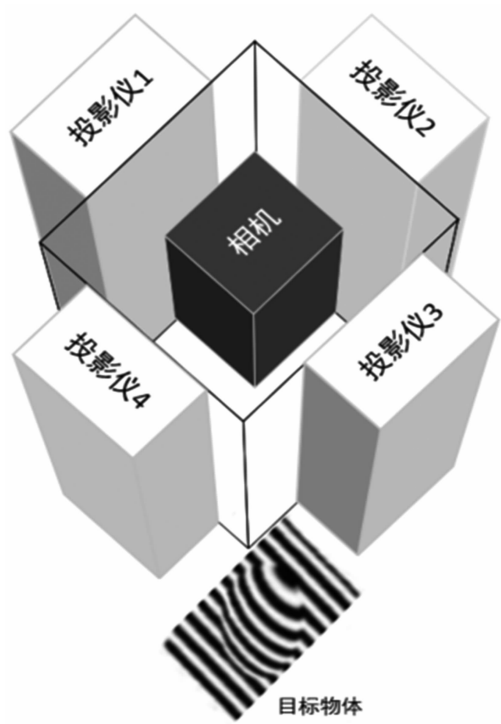


图 5 测量系统结构图

2.2 多频相移方法和格雷码相移方法对比

采用 3 频 12 步相移方法和 12 步相移 6 幅互补格雷码方法对复杂物体进行相位解算。实验条件为单投影单相机情况。本文重建的复杂目标是喷粉的 5 角硬币、电路板以及有高度差的陶瓷块。相机采集的复杂目标的照片如图 6 所示。

使用滤波算法去除无关噪声点, 并将重建点云数据进行高度范围内的颜色渲染。上述三个复杂目标的重建结果如下: 图 7(a)所示为采用多频相移方法对喷粉硬币的重建结果, 图 7(b)所示为采用互补格雷码相移方法对喷粉硬币的重建结果, 图 7(c)为两种方法的重建细节对比图。图 8(a)所示为采用多频相移方法对电路板的重建结果, 图 8(b)所示为采用互补格雷码相移方法对电路板的重建结果, 图 8(c)为两种方法的重建细节对比图。图 9(a)所示为采用多频相移方法对陶瓷块的重建结果, 图 9(b)所示为采用互补格雷码相移方法对陶瓷块的重建结果, 图 9(c)为两种方法的重建细节对比图。

通过对比图 7(c)、图 8(c)、图 9(c)中的点云细节, 并结合图 6 所示的实际拍摄环境, 可以分析出在目标物体表面边缘部分(见图 7(c))、高度变化显著的部分(见图 8(c)与图 9(c))、由于目标物体遮挡造成的阴影区域部分(见图 9(c))、由于目标物体表面材质不同造成的镜面反射部分(见图 8(c)), 互补格雷码相移方法相比于多频相移方法会产生错误的解相位结果。

本文将一组反向格雷码与原始格雷码图像相结合, 计算出采集的图像中来自实际场景的光源直接分量以及来自环境的间接光分量, 并由此进行图像二值化。图 10(a)所示为使用反向格雷码优化的二值化方法重建出的陶瓷块点云, 图 10(b)所示为使用原始格雷码图像的均值作为阈值进行二值化后重建出的陶瓷块点云, 图 10(c)所示为两种二值化方法重建点云的细节对比图。从图 10(c)中可以看出, 本文



图 6 复杂目标

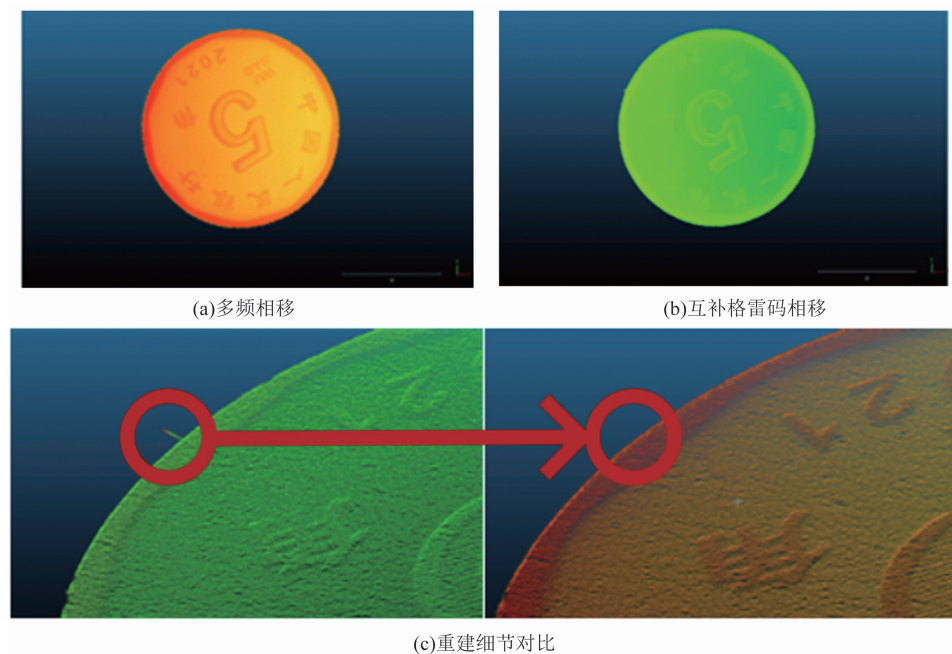


图 7 喷粉硬币重建结果

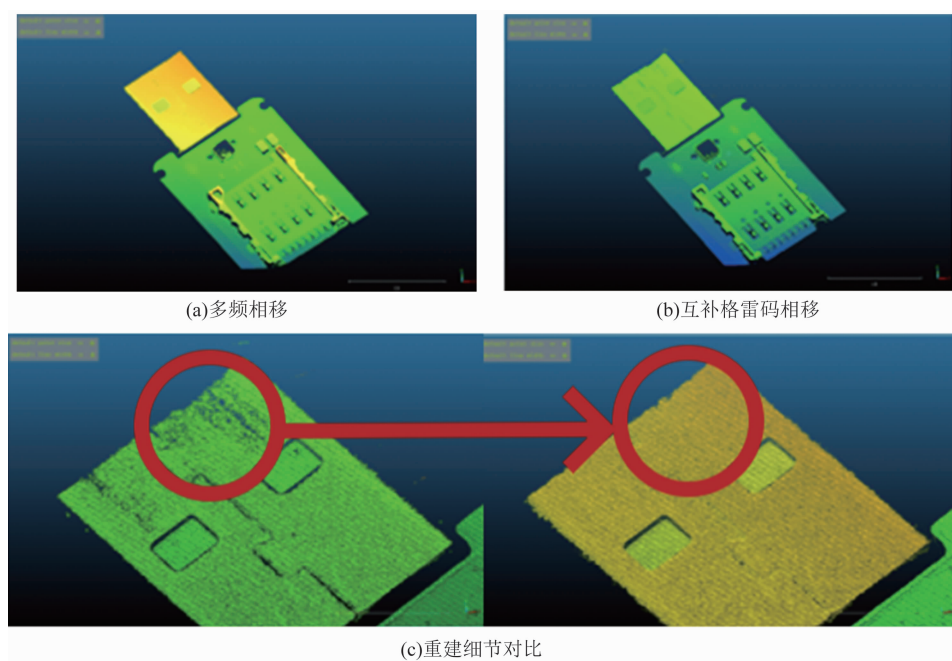


图 8 电路板重建结果

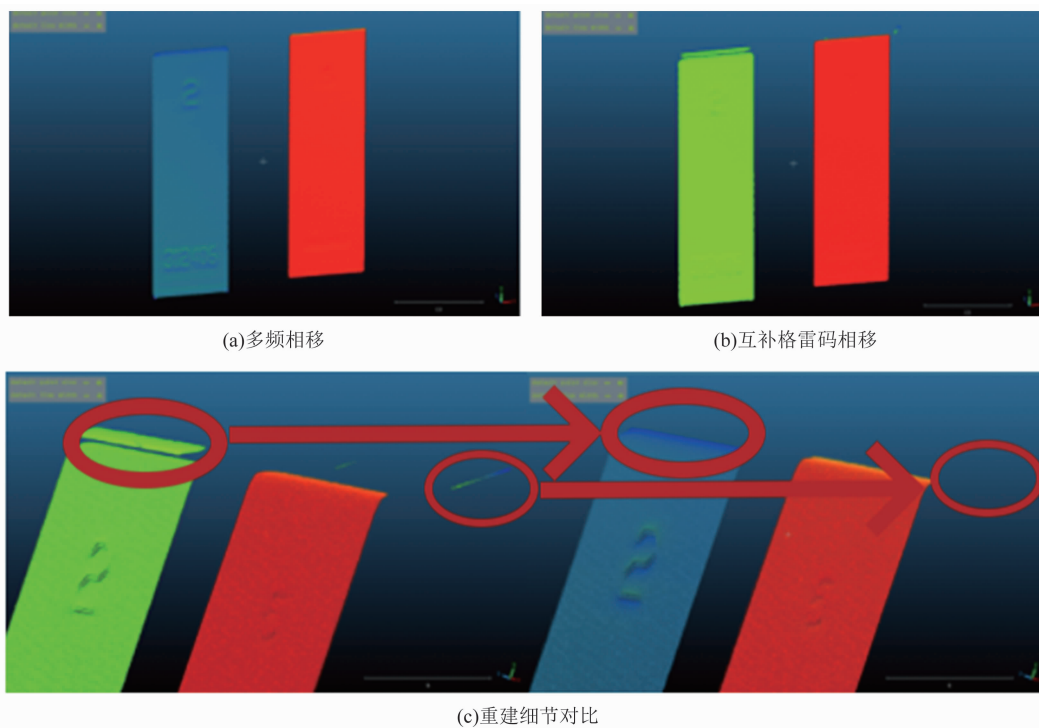


图 9 陶瓷块重建结果

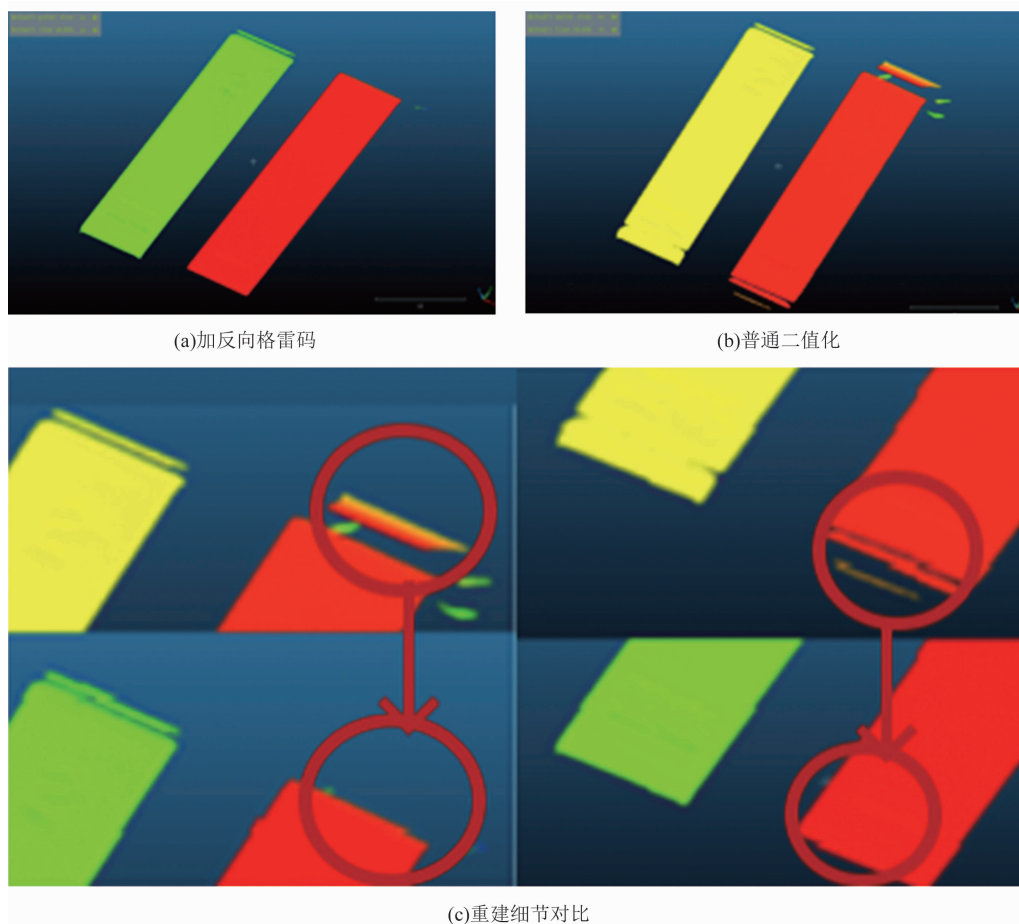


图 10 标准陶瓷平面重建结果

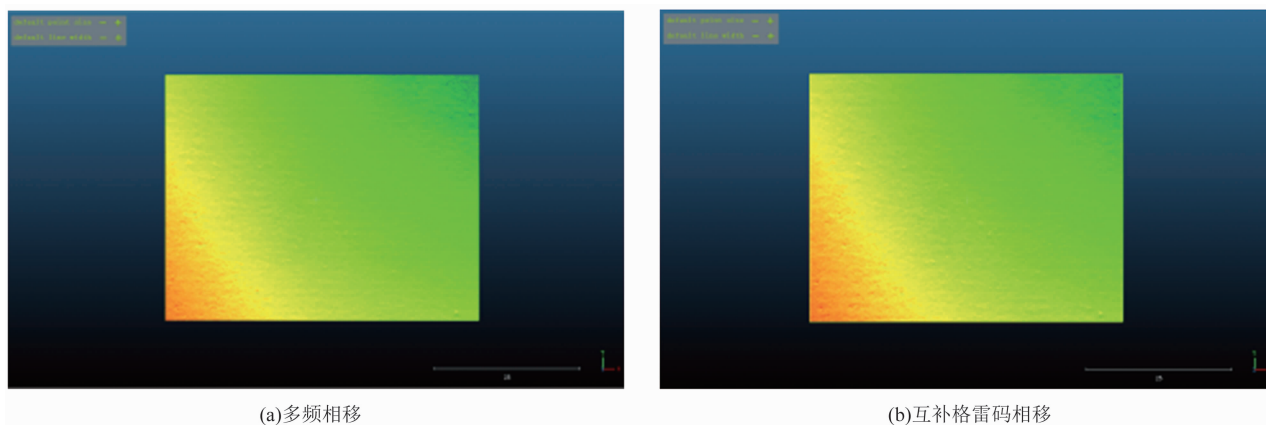


图 11 标准陶瓷平面重建结果

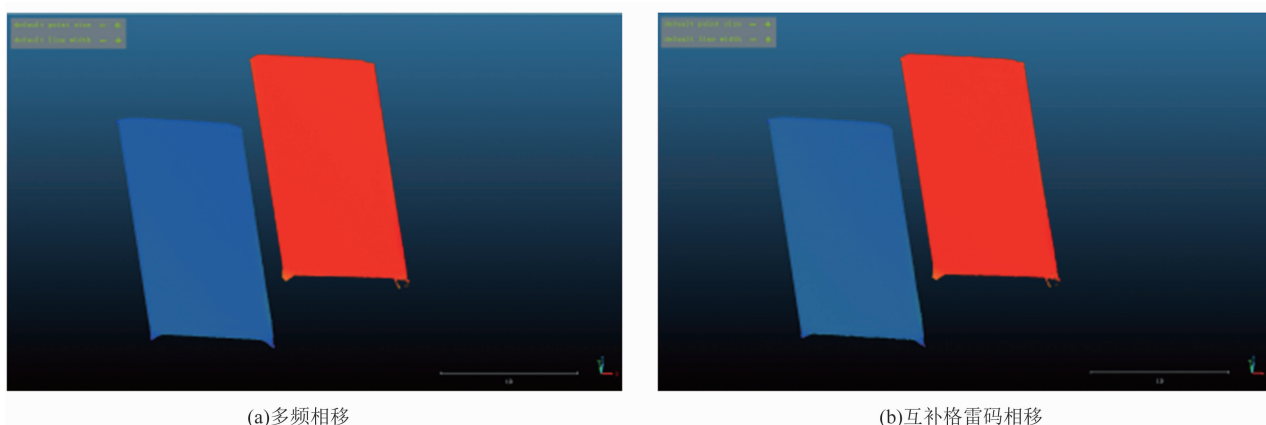


图 12 标准陶瓷台阶重建结果

使用的反向格雷码二值化方法能够更好地区分出图像中的阴影区域、亮条纹区域、暗条纹区域以及无法判断的遮挡部分。滤除普通二值化方法中由物体间反光、物体间遮挡产生阴影等情况造成的解码错误,使得通过格雷码图像解出的相位级次更加准确。

下面分别从平面度和高度差两个方面分析系统的测量精度。将标准陶瓷平面和标准陶瓷台阶分别置于待检测空间内的任意 10 个位置,然后计算重建出来的标准陶瓷平面拟合的均方根值(Root Mean Square, RMS)以及标准陶瓷两个台阶之间的高度差。标准陶瓷平面的重建结果如图 11 所示,标准陶瓷台阶的重建结果如图 12 所示。表 2 和表 3 列出了计算得到的 10 组测量结果。

标准陶瓷平面 RMS 计算区域为全画幅区域。标准陶瓷台阶高度差计算是在两个台阶平

面中心截取相同的长方形区域,然后根据区域内的点云数据来拟合平面,并计算两个拟合平面之间的高度差。测量结果表明,两种方法测量出的标准陶瓷平面平均 RMS 以及标准陶瓷台阶的平均高度差非常相近,互补格雷码方法的精度略低于多频相移方法,表明解绝对相位的精度主要取决于解包裹相位部分使用多少步相移,与解相位级次时选择多频相移方法还是互补格雷码方法关系不大。采用多频相移方法测量标准陶瓷平面的平均 RMS 为 $9.431\ \mu\text{m}$,测量标准陶瓷台阶的平均高度差为 $3.00963001\ \text{mm}$,与标准的高度差 $3\ \text{mm}$ 相差 $9.63\ \mu\text{m}$ 。误差主要来源于测量表面的加工误差和相机的随机噪声。实验结果表明,该系统的视场区域的最高测量精度小于 $10\ \mu\text{m}$,可对小目标进行高精度三维几何重建。

表 2 精度测量结果 1

平面 RMS	多频相移	互补格雷码相移
1	0.00860 mm	0.00894 mm
2	0.00945 mm	0.00997 mm
3	0.00967 mm	0.00993 mm
4	0.00892 mm	0.00986 mm
5	0.00993 mm	0.01024 mm
6	0.01005 mm	0.01057 mm
7	0.00958 mm	0.01003 mm
8	0.00882 mm	0.00914 mm
9	0.01012 mm	0.01026 mm
10	0.00917 mm	0.00976 mm
平均	0.009431 mm	0.00987 mm

表 3 精度测量结果 2

高度差	多频相移	互补格雷码相移
1	2.97676 mm	2.98068 mm
2	2.99078 mm	3.04635 mm
3	3.02636 mm	2.96033 mm
4	3.0361 mm	2.98104 mm
5	3.0123 mm	3.03268 mm
6	2.98972 mm	3.04853 mm
7	3.02402 mm	3.00276 mm
8	3.02597 mm	2.98667 mm
9	3.00046 mm	3.0223 mm
10	3.01383 mm	3.06534 mm
平均	3.00963001 mm	3.01066799 mm

为了提升计算速度, 本文对算法进行重新编写, 使算法的解算转移到 GeForce RTX 3080 Ti 显卡上完成。表 4 列出了加速后与加速前算法计算时间的对比数据。可以看出, 利用显卡对算法进行加速后, 相较于原始 CPU 端串行计算, 速度提升了 218 倍。

表 4 计算时间结果

	CPU 串行	CPU 并行	GPU 并行
多频相移方法 (36 张)	56 s	24 s	256 ms
互补格雷码相 移方法(24 张)	35 s	15 s	133 ms

2.3 点云滤波方法

由于解相位错误、相机噪声、目标物体表面干扰以及随机噪声造成点云结果中出现很多噪声点, 本文根据结构光解相位原理提出一种相位滤波方法。该方法通过设置相位上限阈值 th_{up} 、相位下限阈值 th_{down} 、相位行间梯度变化阈值 th_{row} 、相位列间梯度变化阈值 th_{col} 四个参数阈值来对输出点云进行滤波。相位滤波公式如下:

$$\frac{|\phi(x, y) - B_{first}(x, y)|}{|B_{last}(x, y) - B_{first}(x, y)|} > th_{up} \quad (19)$$

$$\frac{|\phi(x, y) - B_{last}(x, y)|}{|B_{last}(x, y) - B_{first}(x, y)|} > th_{down} \quad (20)$$

$$|\phi(x, y) - \phi(x, y+1)| > th_{row} \quad (21)$$

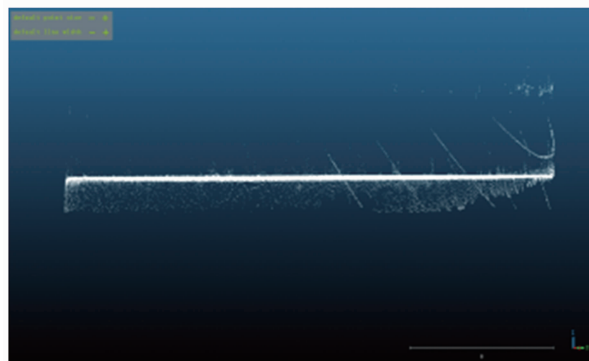
$$|\phi(x, y) - \phi(x-1, y)| > th_{col} \quad (22)$$

式中, $B_{last}(x, y)$ 和 $B_{first}(x, y)$ 代表标定最低平面对应像素的相位值和标定最高平面对应像素的相位值; $\phi(x, y+1)$ 代表当前像素点下一行像素位置的相位值; $\phi(x-1, y)$ 代表当前像素点前一列像素位置的相位值。滤除点云中满足式(19)~式(22)任一公式的点。图 13 为硬币重建点云相位滤波结果的对比图。其中, 图 13(a)所示为相位滤波之前的点云, 图 13(b)所

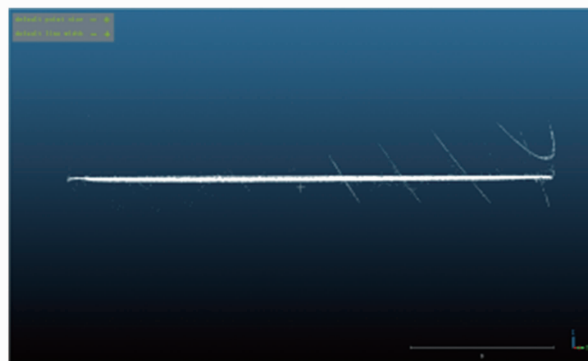
$$T_{2-1} = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0.000170 & 0.000069 & 0.017566 \\ -0.000170 & 1.000000 & 0.000989 & 0.031845 \\ -0.000069 & -0.000989 & 1.000000 & -0.121937 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$T_{3-1} = \begin{bmatrix} 1.000000 & -0.000136 & 0.000380 & -0.001120 \\ 0.000134 & 0.999992 & 0.004066 & -0.014452 \\ -0.000381 & -0.004066 & 0.999992 & -0.290804 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$T_{4-1} = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0.000144 & 0.000264 & -0.000631 \\ -0.000144 & 0.999999 & 0.001164 & 0.002990 \\ -0.000263 & -0.001164 & 0.999999 & -0.118317 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 \end{bmatrix} \quad (25)$$

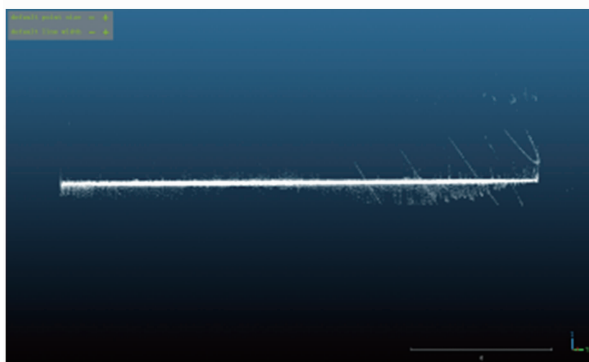


(a)相位滤波前

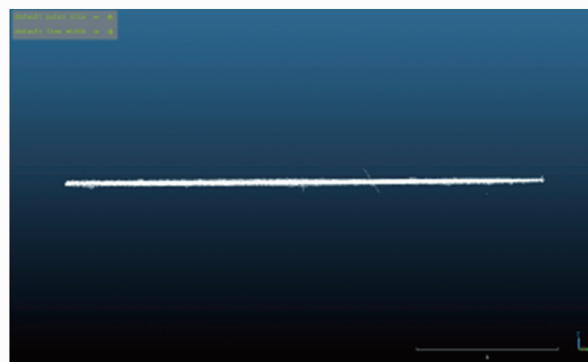


(b)相位滤波后

图 13 相位滤波结果对比图



(a)统计滤波前



(b)统计滤波后

图 14 统计滤波结果对比图

示为相位滤波之后的点云。可以观察到相位滤波滤除了超过标定范围的噪声点, 还滤除了与相邻点云之间的位置梯度变化大于限定阈值的噪声点。

相位滤波后会观察到点云中还存在部分的离群点或者由测量误差导致的粗差点。据此提出改进的统计滤波以滤除杂点。统计滤波原本是对每一个点的三维邻域进行统计分析, 计算所有临近点的平均距离。假设平均距离满足高斯分布, 那么将平均距离在此高斯分布的设定标准范围之外的点定义为离群点, 并将其从点云中去除。由于本文生成的点云是按照像素点有序分布的, 所以将统计滤波算法中的三维邻域简化为容易计算且符合本文点云特征的

2.5D 邻域。通过对该 2.5D 邻域内点的统计分析进行离群点去除。图 14 为改进的统计滤波结果对比图。其中, 图 14(a)所示为统计滤波之前的点云, 图 14(b)所示为统计滤波之后的点云。可以看出, 大部分的离群点被滤除。

2.4 点云融合

本系统使用 4 台投影仪分时对目标物体进行投影融合重建, 目的是解决单投影双目系统对投影盲区重建不全的问题。由于投影仪光轴与目标物体呈一定夹角, 待测物体某些部分被遮挡而无法被测量到, 因此就产生了投影盲区。但是由于系统硬件装配无法达到理想状态, 4 台投影仪光轴与相机光轴之间的夹角无法完全相等, 导致 4 个投影仪-相机分系统重

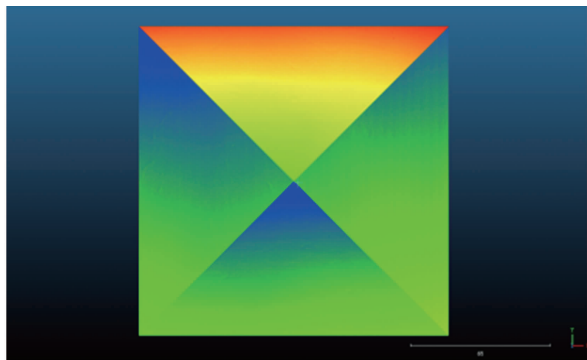


图 15 分系统重建结果

表 5 标准陶瓷平面 RMS

	标准陶瓷平面 RMS
转换前平均融合	0.090941086 mm
单个投影仪-相机系统重建	0.01179183088 mm
转换后平均融合	0.00978381466 mm

建出来的 4 个点云无法完全重合。图 15 展示了 4 个分系统对标准陶瓷平面重建的结果。可以看出, 4 个重建平面之间无法完全重合, 存在细微的夹角。为了提高 4 个点云的融合精度, 此处使用点云配准的算法来计算其他三个点云与第一台投影仪得到的点云之间的转换矩阵。计算出的 3 个转换矩阵如式(23)~式(25)所示。

转换前后通过平均融合得到的平面 RMS 以及单个投影仪-相机系统重建的平面 RMS 如表 5 所示。可以看出, 通过匹配转换之后的融合点云精度更高。

3 结束语

本文根据小目标工业检测精度高、效率高、全方位等需求, 使用 4 个数字投影仪与双远镜头相机, 设计搭建了一套基于结构光照明的全方位高精度三维形貌测量系统。本文对比分析了多频相移和互补格雷码相移两种解相位方法, 针对特定点云噪声提出了相位滤波方法和优化的统计滤波方法。最后, 为了解决多投影点云重建因装调误差出现的融合误差问题, 提出了匹配融合算法。实验结果表明, 系统应针对高精度、高效率等不同使用场景选用不同的相位解算方法。与单投影双目重建系统相比, 本系统可以获得待测物体全貌且测量精

度在 $10\ \mu\text{m}$ 以下。在 GPU 加速后, 系统测量速度为原来的 218 倍, 满足高精度工业测量的精度高、效率高等要求。后期工作中, 应进一步优化互补格雷码相移法中的二值化问题, 在保证高效率的同时, 提高阴影部分及陡峭边缘处的点云重建正确率。

参考文献

- [1] Malamas E N, Petrakis E G M, Zervakis M, et al. A survey on industrial vision systems, applications and tools [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(2): 171-188.
- [2] Ford K R, Myer G D, Hewett T E. Reliability of landing 3D motion analysis: implications for longitudinal analyses [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2007, **39**(11): 2021-2028.
- [3] Robert S, Jakub K, Grzegorz M. Archiving shape and appearance of cultural heritage objects using structured light projection and multispectral imaging [J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(2): 021115.
- [4] Xiong Z, Zhang Y, Wu F, et al. Computational depth sensing: toward high-performance commodity depth cameras [J]. *IEEE Signal Process Mag* 2017, **34**(3): 55-68.
- [5] 王永红, 张倩, 胡寅, 等. 显微条纹投影小视场三维表面成像技术综述 [J]. *中国光学*, 2021, **14**(3): 447-457.
- [6] 艾佳, 刘守起, 刘元坤, 等. 利用三频外差实现的小视场三维测量系统 [J]. *光电工程*, 2016, **43**(9): 39-44.
- [7] 张贵姣. 基于多频外差原理的相位测量关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [8] Payeur P, Desjardins D. Structured light stereoscopic imaging with dynamic pseudo-random patterns [C]. Halifax: 6th International Conference on Image Analysis and Recognition, 2009.
- [9] 高兴宇, 陈朋波, 李明枫, 等. 大视场宽景深双远心系统的设计 [J]. *激光技术*, 2017, **41**(2): 182-186.
- [10] 吴加凤. 基于编码结构光的三维测量技术研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.

- [11] 李中伟. 面结构光三维测量技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2012.
- [12] Yi X, Daniel A. Robust pixel classification for 3D modeling with structured light [C]. Montreal: Graphics Interface 2007 Conference, 2007.
- [13] Nayar S K, Krishnan G, Michael D, et al. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2006, **25**(3): 935–944.
- [14] 张启灿, 吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术 [J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(3): 78–90.