

基于相移轮廓术的多核异构三维测量系统

方智慧^{1,2}, 陈彬^{1,2*}, 伍世虔^{1,2}

¹武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081;

²武汉科技大学机器人与智能系统研究院, 湖北 武汉 430081

摘要 在充分兼顾嵌入式三维测量系统对高效性、集成性、通用性以及灵活性等需求的基础上,设计了一种由3个异构核心构成的结构光三维测量系统架构。该多核异构架构层次清晰、结构灵活、通用性强,能兼容多种通用接口的光学器件(相机、投影仪等)。在此架构基础上,结合现场可编程门阵列并行流水优化方法,设计并实现了一种涵盖相位解调、解包裹以及相位深度映射等模块的全流程结构光三维测量系统。实验结果表明,所提方法在测量精度与传统PC平台相当的情况下,大大提高了测量效率,处理13幅1280×800分辨率的图像仅需12 ms,是同类算法在传统PC平台上的11倍。

关键词 测量; 多核异构; 结构光; 相移轮廓术; 互补格雷码

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222073

Multi-Core Heterogeneous Three-Dimensional Measurement System Based on Phase-Shift Profilometry

Fang Zhihui^{1,2}, Chen Bin^{1,2*}, Wu Shiqian^{1,2}

¹School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China;

²Institute of Robotics and Intelligent Systems, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China

Abstract A structured light 3D measurement system architecture consisting of three heterogeneous cores is proposed based on phase-shift profilometry to achieve an embedded 3D measurement system for efficiency, integration, versatility, and flexibility. The multi-core heterogeneous architecture has a clear hierarchy, flexible structure, and strong universality and can work with optical devices (cameras, projectors, etc.) possessing a variety of universal interfaces. A full process-structured light 3D measurement system covering phase demodulation, unwrapping, and phase depth mapping modules is designed and constructed based on this architecture along with the parallel pipelining optimization approach of the field-programmable gate array. The experimental findings demonstrate that the proposed approach significantly enhances the measurement efficiency, it only takes 12 ms to process 13 images of 1280×800 resolution when the measurement accuracy is equivalent, which is 11 times that of similar algorithms on standard PC platforms.

Key words measurement; multi-core heterogeneous; structured light; phase-shift profilometry; complementary Gray-code

1 引言

相移轮廓术^[1-4]是一种基于结构光的非接触式三维测量技术,被广泛应用于工业测量、医学影像、机器人等领域^[5-8]。相移轮廓术是指由投影设备将编码的正弦相移条纹投影到被测物体上,由相机捕获被物体表面调制后的变形条纹图像,并以此获得被测物体表面的三维信息。目前,利用相移轮廓术设计的测量系

统大多基于通用PC平台^[8],此类测量系统受限于PC平台部署灵活性不足、便携性差等缺点,在众多领域的应用受到限制。此外,相移轮廓术需要处理大量数据,难以在普通CPU上高速实现。因此,研究人员为实现基于相移轮廓术测量设备的小型化、集成化、高速化开展了许多相关工作。

文献[9]在CPU+GPU平台上设计了基于相移轮廓术的三维测量系统,该系统能以45 frame/s的速度

收稿日期: 2022-07-14; 修回日期: 2022-08-16; 录用日期: 2022-09-05; 网络首发日期: 2022-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(61775172)

通信作者: *chenbin@wust.edu.cn

进行高质量三维重建。虽然 GPU 已被证明是一个有吸引力的加速平台,但 GPU 的实现往往依赖于 PC 的支持,缺乏部署灵活性。此外,由于 GPU 的高功耗,将其部署到小型嵌入式设备时存在散热问题,因此 GPU 不适用于紧凑型三维测量系统。

相较于 GPU,现场可编程门阵列(FPGA)在功耗方面具有显著优势,并且不依赖于 PC 支持,部署更为灵活。正是因为 FPGA 具有 GPU 不可替代的优势,研究人员对在 FPGA 平台上实现基于相移轮廓术的三维测量给予了更多关注。文献[10]设计了用于相移轮廓术的全流水线架构,并实现了基于多频外差算法的三维测量,该架构处理 12 幅分辨率为 1024×768 的相移图耗时 21 ms。文献[11]利用 FPGA 并行性和流水线的特点,基于多频外差算法对相关模块进行重新设计,每秒可测量 32 个 800×600 的分辨率场景。使用 FPGA 加速基于多频外差解包裹的相移轮廓术已经被充分证明是可行的,然而如果直接使用多频外差原理解包裹会存在跳跃误差^[12-13]。基于此,文献[12]提出一系列约束条件提高解包裹的准确率,文献[13]使用全频解相法减少约束条件,改进后的多频外差法取得了更高的三维测量精度,但增加了算法复杂程度。为避免上述算法的局限,采用原理简单、鲁棒性好的互补格雷码辅助解包裹算法。

在全面考虑系统高效性、集成性、通用性以及灵活性等要求的基础上,本文设计了一种 CPU(Linux)+CPU(Bare Metal)+FPGA 的多核异构三维测量系统架构,并以此架构设计并实现了一种基于相移轮廓术结合互补格雷码算法的结构光三维测量系统。系统的核心部分即三维测量算法利用 FPGA 进行硬件加速以提高测量效率,基于全流水线和并行原理,设计并实现了相位解调、解包裹和相位深度映射模块。该架构以 CPU(Linux)为主要控制单元负责系统流程调度,利用 Linux 完备、灵活的设备与接口驱动库兼容多种接口相机,并为上层应用提供灵活便捷的访问接口,而 CPU(Bare Metal)则提供了一个灵活、可扩展、可定制的 IP 核调用框架,提高系统的灵活性。

2 相移轮廓术与系统架构设计

2.1 相移轮廓术

相移轮廓术是基于相位调制的条纹投影结构光技术,具有非接触、精度高、全场测量的优点。相移轮廓术测量系统由一个投影仪和一个相机组成,如图 1 所示。

投影仪投射相移光栅条纹到被测物体上,相机从不同角度捕获经待测物体调制的变形条纹图案。以 N 步相移^[4]为例,投影仪会连续向待测物体投射 N 幅相移光栅。相应地,相机将捕获 N 幅图像,而第 i 幅图像 I_i 在点 $[x, y]^T$ 处的亮度可表示为

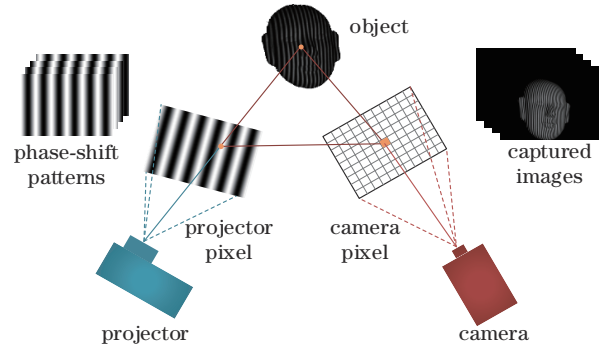


图 1 相移轮廓术测量系统

Fig. 1 Measurement system of phase-shift profilometry

$$I_i(x, y) = I_a(x, y) + I_b(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{2(i-1)\pi}{N} \right], i \in (1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

式中: $I_a(x, y)$ 表示点 $[x, y]^T$ 处背景光强; $I_b(x, y)$ 表示点 $[x, y]^T$ 处调制光强; $\varphi(x, y)$ 表示点 $[x, y]^T$ 处的包裹相位。利用相机捕获的 N 幅图像,可以计算点 $[x, y]^T$ 的包裹相位 $\varphi(x, y)$:

$$\varphi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \sin [2(i-1)\pi/N]}{\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \cos [2(i-1)\pi/N]}. \quad (2)$$

利用式(2)计算得到的相位经过解包裹后就能得到与投影仪像素坐标唯一对应的绝对相位,而后依据投影仪与相机的标定参数,结合三角测量原理即可实现待测物体表面的三维测量,其详细过程可参见文献[14]。

2.2 系统架构设计

依据第 2.1 节所描述的相移轮廓术原理,嵌入式三维测量系统需要包含 4 个主要功能模块:流程控制模块、IP 核控制模块、功能计算模块以及外围接口模块,系统的组成框图如图 2 所示。

其中,功能计算模块是整个嵌入式三维测量系统的核心,需要完成相位解调、解包裹、相位深度映射等步骤。相移轮廓术对一组图像中对应像素点的操作具有高度重复性,可以通过并行计算提高测量速度。GPU 和 FPGA 都具备并行计算的特点,然而 GPU 功耗高,集成在小型嵌入式设备中存在散热不良问题, FPGA 作为一种可定制的逻辑电路,具有低功耗、并行流水运算的优势,非常适合集成在小型嵌入式设备中。因此,所设计的嵌入式三维测量系统采用 FPGA 作为其核心功能计算模块的平台。

在具备功能计算模块基础之上,系统还需要一个流程控制模块以实现协调控制(如投影相移条纹图案、拍摄待测物体表面反射图像、调用相应的计算 IP 核心以及与用户通信等)。考虑到 FPGA 在流程控制以及接口驱动等方面的灵活性和通用性不如 CPU,因此所

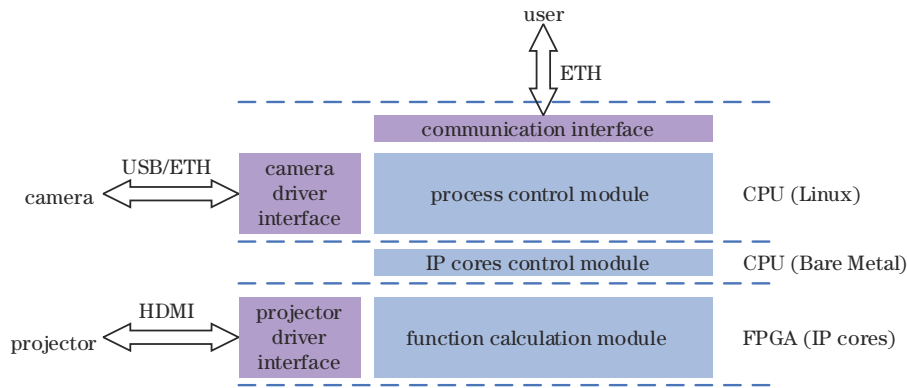


图 2 系统组成框图

Fig. 2 System composition block diagram

提系统采用 CPU+FPGA 异构硬件方案,并将流程控制模块部署于 CPU+Linux 平台上。需要指出的是,尽管采用 Linux 操作系统控制 IP 核是可行的,但由于操作系统会将物理地址映射为虚拟地址,而 IP 核访问的内存地址是未经映射的物理地址,因此需要在操作系统上为计算 IP 核编写相应的驱动程序。当对 FPGA 端的 IP 核心进行修改、更新后往往需要更新相应的驱动程序,涉及操作系统的重新交叉编译,过程比较繁复。为此,在流程控制模块与功能计算模块之间插入一个中间模块,即 IP 核控制模块,并使其工作于裸 CPU 模式。IP 核控制模块接收流程控制模块的调用请求,并根据请求对 FPGA 上相应的计算 IP 核心进行直接调用,最终将结果返回。

系统的外围接口模块主要包括投影仪驱动、相机驱动以及通信接口等。其中,投影仪可以利用 FPGA 直接驱动,而相机的驱动则需要考虑更多因素。目前,结构

光测量系统中使用的工业相机主要采用 USB、网络 (ETH) 两种常用接口。为了满足系统的通用性,若在 FPGA 平台上实现对以上两类接口相机的驱动则需耗费较多的可编程逻辑 (PL) 资源,相应地,系统核心模块-功能计算模块的设计将受到较大限制。因此,所提系统利用嵌入式 Linux 环境下丰富、完备的设备驱动库实现对 USB 和网络接口相机的控制。此外,利用嵌入式 Linux 也能较为方便地实现基于网络的通信接口设计。

在上述分析与设计基础上,选用 ARM+FPGA 多核异构的 Zynq-7000 SoC 系统作为嵌入式三维测量系统的硬件平台。Zynq-7000 SoC 由处理系统 (PS) 和 PL 等两部分构成,PS 端集成了双核 ARM Cortex-A9 处理器,而 PL 端为 Xilinx 7 系列的 FPGA,PS 与 PL 通过 Advanced eXtensible Interface (AXI) 总线进行数据交互^[15]。Zynq-7000 SoC PS 系统的双核 CPU (CPU0、CPU1) 可以工作在非对称多处理 (AMP) 模式下,即

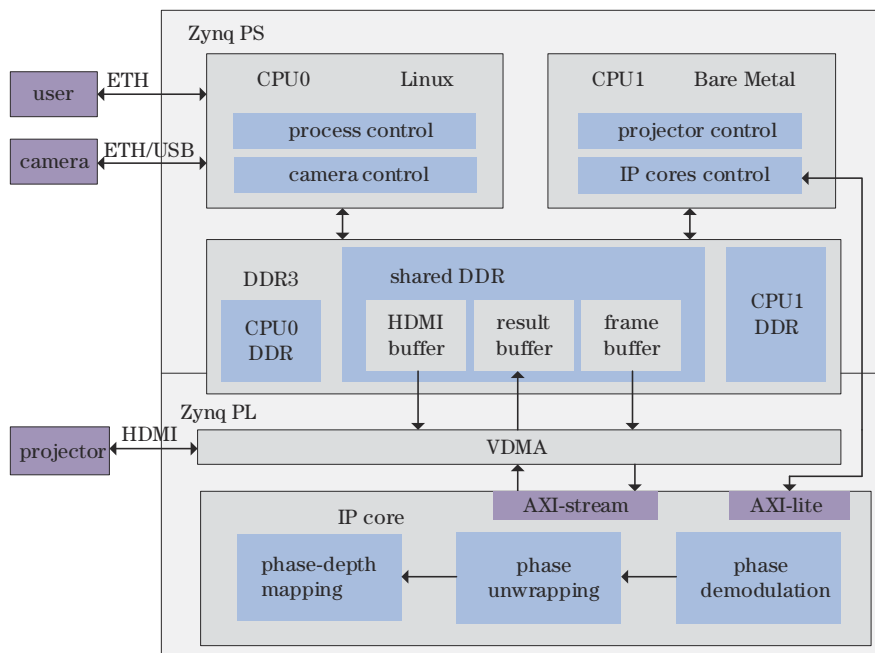


图 3 嵌入式三维测量系统架构

Fig. 3 Architecture of embedded 3D measurement system

CPU0、CPU1 两个核心相对独立地运行不同的任务。在 AMP 模式下, CPU0 与 CPU1 可通过一段共享内存空间进行数据的交换与共享。正是因为 Zynq-7000 SoC 平台这一特点, 大大简化了所提系统的复杂度, 同时降低了整个系统的成本。结合所设计的系统结构与 Zynq-7000 SoC 平台的硬件特点, 嵌入式三维测量系统的详细架构如图 3 所示。

3 相移轮廓术 IP 核设计

3.1 相位解调模块

参照式(1)所示的 N 步相移轮廓测量术的一般原理, 选用 4 步相移条纹作为测量的投影图像, 则相机可拍摄到的 4 幅待测物体反射后的条纹图像表示为

$$\begin{cases} I_1(x, y) = I_a(x, y) + I_b(x, y) [\cos \varphi(x, y)] \\ I_2(x, y) = I_a(x, y) + I_b(x, y) [\cos \varphi(x, y) + \pi/2] \\ I_3(x, y) = I_a(x, y) + I_b(x, y) [\cos \varphi(x, y) + \pi] \\ I_4(x, y) = I_a(x, y) + I_b(x, y) [\cos \varphi(x, y) + 3\pi/2] \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)所示的相位计算方法, 像素 $[x, y]^T$ 处的包裹相位为

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (4)$$

式(4)可以用四象限反正切函数 atan2 来求解, 解

得包裹相位的范围为 $(-\pi, \pi]$ 。在设计过程中可以发现, 浮点数计算会占用大量 PL 端资源, 为减少资源占用, 采用定点数代替浮点数的策略。图 4 为该模块原理图, 图中标注了每个节点定点数位数。其中, $\text{fixed} \langle W, I \rangle$ 和 $\text{ufixed} \langle W, I \rangle$ 分别表示有符号定点数和无符号定点数, W 表示定点数位数, I 表示整数部分和符号位的位数。

定点数位数的确定需要综合考虑精度与资源占用情况。输入图像 I_i 的位深为 8 位, 用 8 位无符号定点数存储。由式(4)可知, atan2 模块的输入参数是两幅图像的差值, 其取值范围为 $[-255, 255]$, 因此至少需要用 9 位有符号定点数存储。综合考虑 atan2 模块输入与输出定点数位数的一致性、计算精度以及资源占用情况, 选用 13 位有符号定点数存储。atan2 模块输出的取值范围为 $(-\pi, \pi]$, 用 13 位有符号定点数存储该模块的输出数据, 其中, 3 位为整数部分、10 位为小数部分。为方便将包裹相位解包裹成绝对相位, 将小于零的包裹相位加上 2π , 考虑定点数精度一致性, 数值 2π 选用 13 位无符号定点数来表示, 其中, 3 位表示整数部分、10 位表示小数部分。实验部分分析了定点数对测量精度的影响, 结果表明该模块定点数位数的选取对测量精度影响较小。图 5 为该模块解得的包裹相位, 图 5(a) 为捕获的相移图像, 图 5(b) 为全场包裹相位计算结果, 图 5(c) 为图 5(a) 600 行、400~600 列的像

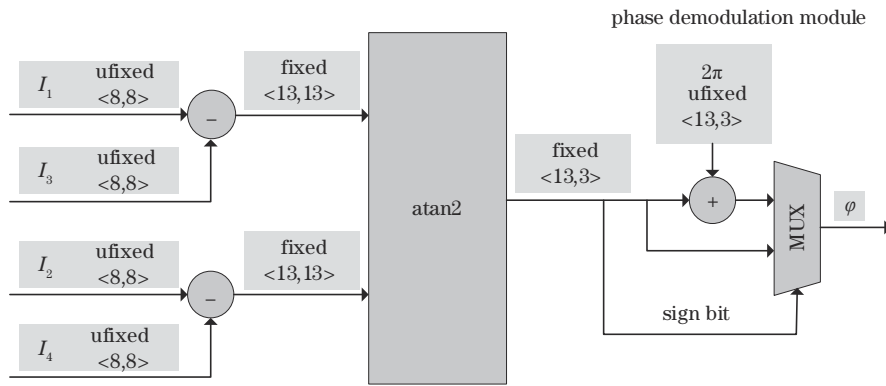


图 4 相位解调模块

Fig. 4 Phase demodulation module

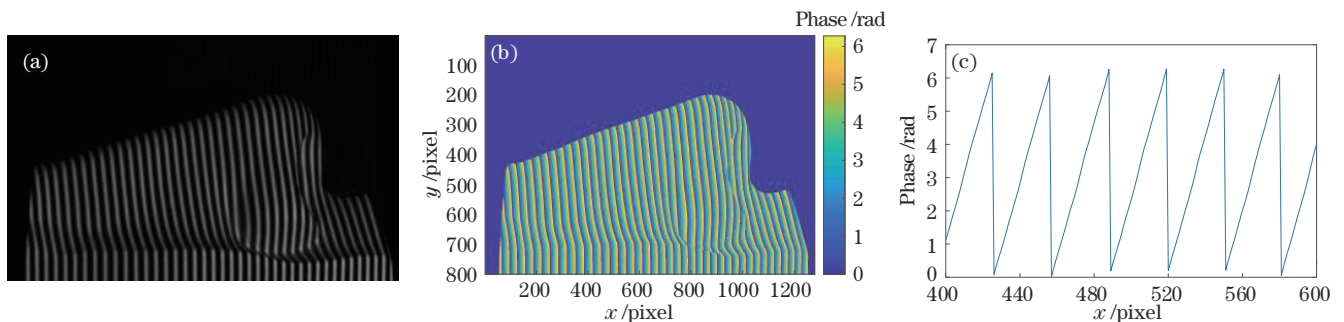


图 5 包裹相位计算结果。(a) 捕获的相移图像; (b) 全场包裹相位; (c) 局部包裹相位

Fig. 5 Calculation results of wrapped phase. (a) Captured phase shift image; (b) whole field wrapped phase; (c) local wrapped phase

素点的包裹相位值。

很明显,相位被包裹在区间 $[0, 2\pi)$ 范围内,存在歧义,不能唯一对应投影仪像素点坐标。要完成三维测量需要将包裹相位解包裹为无歧义的绝对相位。

3.2 解包裹模块

由相位解调模块解得的相位无法唯一确定投影仪像素坐标,需要将其展开为绝对相位。格雷码辅助确定条纹级的方法具有鲁棒性好、错误不向后传递的优点,已被广泛应用在工业检测领域。然而,传统格雷码编码方式会出现解码级次边沿和包裹相位边沿不匹配的情况,造成相位展开错误。造成错误的原因是相机捕获到格雷码图像黑白边界不是锐利截止的,在黑白之间存在灰色过渡区域。Zhang 等^[16-18]提出互补格雷码,解决了传统格雷码解级次错误的问题。为了便于描述,图 6 以相位周期数 8 为例说明互补格雷码原理^[16],编码 8 个相位周期需要 3 张传统格雷码编码图案 I_{G0} 、 I_{G1} 、 I_{G2} ,由这 3 张格雷码图案可以解得级次 k_1 ,在理想条件下级次 k_1 的边沿与包裹相位边沿是严格对齐的。然而在实际拍摄过程中,由于相机和投影仪低通滤波、图像噪声以及相机或投影仪位置的轻微变化等原因,级次 k_1 边沿与相位边沿错开若干个像素点,相位展开错误。通过额外投射互补格雷码图案 I_{G3} ,可以得到与级次 k_1 错开半个相位周期的级次 k_2 ,其优点在于, k_1 在一个包裹相位周期的中间区域保持平稳,而 k_2 在包裹相位跳变区域保持平稳。根据包裹相位的大小选择不同的级次进行解包裹,解决了传统格雷码级次边沿相位展开错误的问题,提高了三维测量精度。

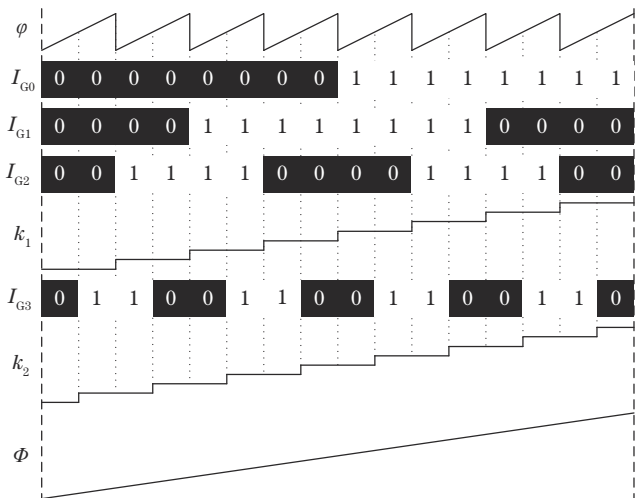


图 6 互补格雷码原理图

Fig. 6 Schematic diagram of complementary Gray-code

根据互补格雷码原理,包裹相位可展开为绝对相位^[16],具体如下:

$$\Phi(x, y) =$$

$$\begin{cases} \varphi(x, y) + 2\pi k_2(x, y), & 0 < \varphi(x, y) \leq \pi/2 \\ \varphi(x, y) + 2\pi k_1(x, y), & \pi/2 < \varphi(x, y) \leq 3\pi/2, \\ \varphi(x, y) + 2\pi k_2(x, y) - 2\pi, & 3\pi/2 < \varphi(x, y) \leq 2\pi \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Phi(x, y)$ 表示绝对相位; $k_1(x, y)$ 表示前 $n-1$ 幅格雷码解得的条纹级; $k_2(x, y)$ 表示 n 幅格雷码解得的条纹级。 $k_1(x, y)$ 、 $k_2(x, y)$ 的表达式为

$$\begin{cases} k_1(x, y) = f \left[\sum_{i=1}^{n-1} G_i(x, y) \times 2^{n-1-i} \right] \\ k_2(x, y) = \left\lfloor \frac{f \left[\sum_{i=1}^n G_i(x, y) \times 2^{n-i} \right] + 1}{2} \right\rfloor \end{cases} \quad (6)$$

式中: f 表示格雷码到自然二进制码的映射; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整; $G_i(x, y)$ 表示第 i 幅二值化后的格雷码图像。从解码原理可知,格雷码图像二值化正确与否直接关系到解包裹模块计算结果的正确与否。在实际三维测量过程中,由于环境光变化以及被测物体表面各点反射系数不同,若是全场使用同一个二值化阈值,一些像素点特别是相邻码元边界附近的像素点二值化错误,而这些像素点二值化错误会直接导致相位级次信息求解错误,极大影响测量精度。为解决这一问题,额外投射一场全白图像和一场全黑图像,将两场图像对应像素点亮度的均值作为二值化的阈值,提高系统鲁棒性。此外,在搭建三维测量系统时,选用黑色幕布作为背景。投射全白图像时,待测物体亮度较高,背景的亮度较低;投射全黑图像时,待测物体与背景的亮度均很低。根据这一特征,将黑白两场图像对应像素点的亮度值相减,待测区域像素点亮度差值较大、背景区域差值较小,将差值与给定阈值(mask threshold)比较以确定待测物体区域,减少背景噪声的影响。图 7 为解包裹模块原理图,其中, $f_0, f_1, \dots, f_i, \dots, f_{127}$ 表示格雷码 i 对应的自然二进制码。为提高解码效率,格雷码到自然二进制码的转换可通过查表的方式实现。

图 8 展示的是图 5 包裹相位解包裹后的结果,该图表明通过上述模块解包裹后的相位是连续、无歧义的绝对相位。由绝对相位即可确定投影仪像素坐标,而后根据三角测量原理得到待测物体的深度信息。

3.3 相位深度映射模块

求得绝对相位后,结合投影仪与相机的标定参数就能还原物体三维形状信息^[19-21]。需要标定的参数有投影仪坐标系与相机坐标系间的旋转矩阵 R 、平移矩阵 T 、相机内参矩阵 K^C 和投影仪内参矩阵 K^P :

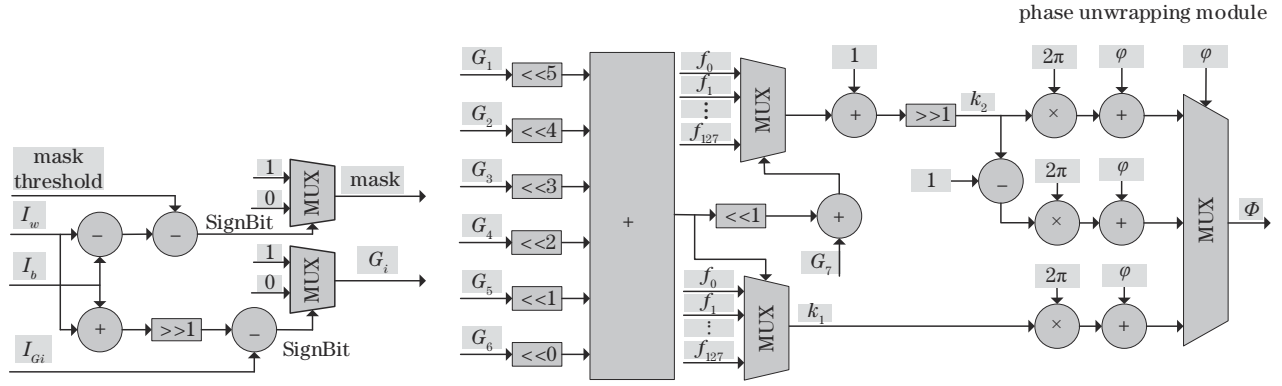


图7 解包裹模块

Fig. 7 Phase unwrapping module

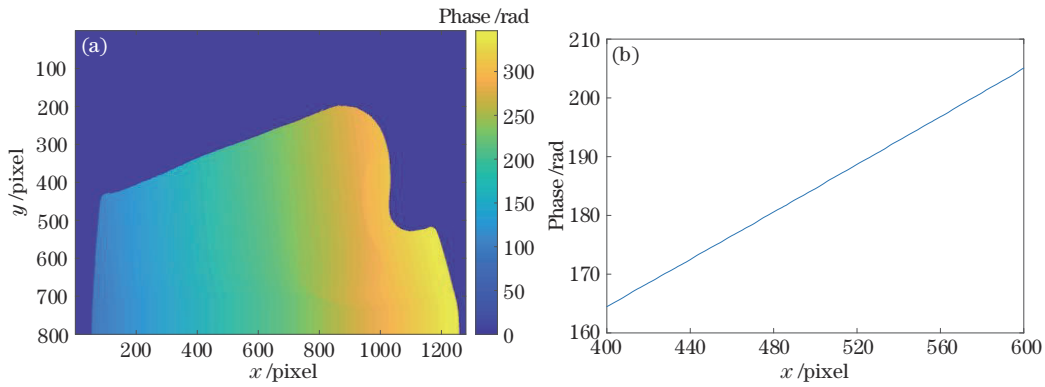


图8 绝对相位计算结果。(a)全场绝对相位;(b)局部绝对相位

Fig. 8 Calculation results of unwrapped phase. (a) Whole field unwrapped phase; (b) local unwrapped phase

$$\begin{cases}
 \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K}^C = \begin{bmatrix} f_u^c & 0 & u_0^c \\ 0 & f_v^c & v_0^c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K}^P = \begin{bmatrix} f_u^p & 0 & u_0^p \\ 0 & f_v^p & v_0^p \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: f_u^c, f_v^c 和 f_u^p, f_v^p 分别为相机和投影仪的像素焦距; (u_0^c, v_0^c) 和 (u_0^p, v_0^p) 分别为相机和投影仪像素坐标系下的主点坐标。

假设待测点 P 在相机坐标系下的坐标 $\mathbf{M}^C = [X^C \ Y^C \ Z^C]^T$, 在投影仪坐标系下的坐标 $\mathbf{M}^P = [X^P \ Y^P \ Z^P]^T$, 则 \mathbf{M}^C 和 \mathbf{M}^P 满足关系式:

$$\mathbf{M}^P = \mathbf{R}\mathbf{M}^C + \mathbf{T}, \quad (8)$$

展开为

$$\begin{cases}
 X^P = r_{11}X^C + r_{12}Y^C + r_{13}Z^C + t_1 \\
 Z^P = r_{31}X^C + r_{32}Y^C + r_{33}Z^C + t_3
 \end{cases} \quad (9)$$

根据相机模型,有

$$\begin{cases}
 u_{\text{norm}}^c = \frac{u^c - u_0^c}{f_u^c} = \frac{X^C}{Z^C} \\
 v_{\text{norm}}^c = \frac{v^c - v_0^c}{f_v^c} = \frac{Y^C}{Z^C}, \\
 u_{\text{norm}}^p = \frac{u^p - u_0^p}{f_u^p} = \frac{X^P}{Z^P}
 \end{cases} \quad (10)$$

式中: (u^c, v^c) 为相机像素坐标; u^p 为投影仪水平像素坐标; $(u_{\text{norm}}^c, v_{\text{norm}}^c)$ 为归一化的相机图像坐标; u_{norm}^p 为归一化的投影仪水平图像坐标。投影仪水平像素坐标 u^p 与绝对相位 $\Phi(x, y)$ 之间是一一映射的关系, 两者的映射关系为

$$u^p = \frac{\Phi(x, y)W}{2\pi N_P}, \quad (11)$$

式中: W 为投影图案水平像素点个数; N_P 为投影正弦条纹图案的条纹数。联立式(9)、(10)可以算出 P 点的深度为

$$Z^C = \frac{t_1 - t_3 u_{\text{norm}}^p}{u_{\text{norm}}^p (r_{31} u_{\text{norm}}^c + r_{32} v_{\text{norm}}^c + r_{33}) - (r_{11} u_{\text{norm}}^c + r_{12} v_{\text{norm}}^c + r_{13})} \quad (12)$$

相机和投影参数标定采用离线标定的方式, 将标定好的参数通过 AXI 总线传递给 PL 端。在高层次综

合设计时,使用数组来存储标定参数;在不指定综合指令时,会默认将数组综合为RAM。作为RAM实现时,内存端口的数量会限制对数据的访问,限制读写密集型算法的吞吐量,这往往是限制性能提升的瓶颈。因此,采取数组分割策略对数组按其独立元素进行拆分,完全拆分后的数组会被解析为寄存器,增大数据读写吞吐量、改善带宽。考虑到实际应用场景下,在测量

不同距离物体时往往需要调整相机与投影仪的焦距甚至更换镜头,使得标定参数变化、难以量化定点位数,因此该模块使用浮点数据类型进行计算。浮点数据类型在进行复杂计算时对PL端资源开销较定点数会大很多,如计算反正切,而对简单的加减乘除计算产生的开销是可接受的。图9为该模块的示意图,该模块由坐标归一化和三角测量两个模块构成。

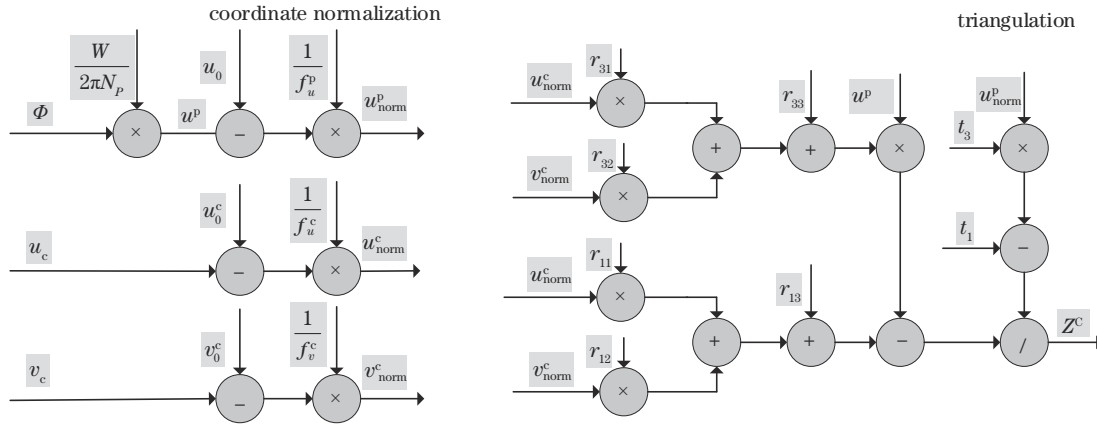


图9 相位深度映射模块

Fig. 9 Phase-depth mapping module

3.4 流水线化

在完成相位解调、解包裹以及相位深度映射等模块设计后,需要将各模块整合,遍历处理图像每个像素点。图10展示了无流水线化的遍历过程,可以看出像素点是被串行依次处理的,即后一个像素点需要等待

当前像素点处理完成后才开始处理。在这种遍历流程下,两个像素点的启动间隔为处理单个像素点所需的时钟周期。一幅高分辨率图像像素点数量往往以百万计,倘若不对遍历过程进行优化,FPGA将无法发挥其优势,导致测量效率低下。

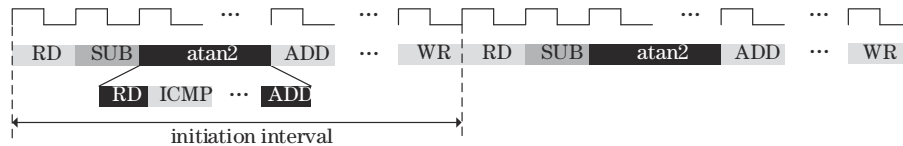


图10 无流水线化

Fig. 10 Without pipelining

考虑到相移轮廓术结合格雷码算法对每个像素点的操作完全一致,并且对每个像素点的处理完全独立,即当前像素点的处理不依赖于之前像素点的计算结果,因此可以将像素点的处理并行化,使用PIPELINE指令对遍历过程流水线化。图11展示了流水线化后像素点的遍历过程。为了便于描述,假定每条指令的执行周期均为1,在流水线化后,后一个像素点无需等待

前一个像素点处理完毕后才开始处理,像素点间的启动间隔减小为1个时钟周期。

需要指出的是,事实上并非所有指令的执行周期均为1个时钟周期,因此在实际过程中,启动间隔应为执行周期最长的指令所需的时钟周期。为进一步验证流水线化对性能的影响,表1对比了处理1280 pixel×800 pixel图像时有无流水线化所需的时钟周期。可以看出,流水线优化后所需时钟周期减少为优化前的1/94.6,极大提升了测量效率。

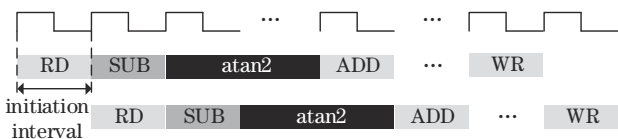


图11 流水线化

Fig. 11 With pipelining

表1 有无流水线化时钟周期对比

Method	Without pipelining	Pipelining
Clock cycle	105492012	1115212

4 实验及分析

为验证所提架构的有效性,搭建了嵌入式结构光三维测量系统,如图 12 所示。该系统由一个 DLP 投影仪、一个工业相机、一块主控为 Zynq-7000 SoC 的开发板组成。

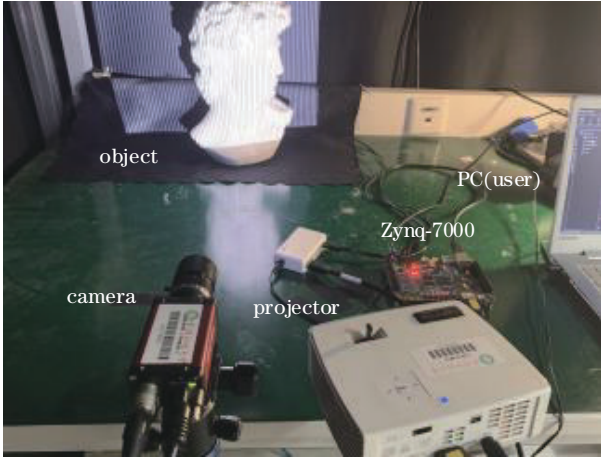


图 12 嵌入式结构光三维测量系统

Fig. 12 Embedded structured light 3D measurement system

投影仪型号为 acerK137i;工业相机型号为 Manta G-125,分辨率配置为 1280×800;配置 Zynq-7000 SoC 的 PL 端主频为 100 MHz,PS 端主频为 667 MHz。该系统进行三维测量需要投射 13 幅图像,投射全白、全黑 2 幅图案确定二值化阈值,投射 4 幅条纹数为 64 的相移图案获得包裹相位,投射 7(6+1)幅格雷码图案来区分条纹级。为充分验证设计的可行性,在该系统上测量多组待测物体,图 13 为待测物体以及测量结果的点云展示。

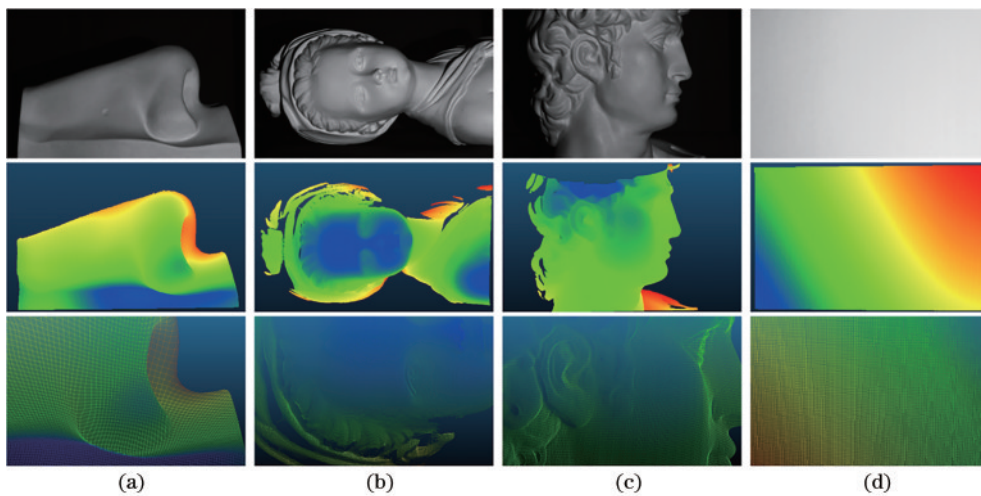


图 13 测量结果。(a)鼻子模型;(b)人像模型 I;(c)人像模型 II;(d)平板

Fig. 13 Measurement results. (a) Nose model; (b) portrait model I; (c) portrait model II; (d) plane

如上所述,所提系统采用 13 位定点数以减少资源占用、提高计算效率,相较于浮点数运算,这势必会带

来测量精度上的损失。以 Matlab 双精度浮点数对平板测量的结果作为基准,图 14 为所提方法较 Matlab 测

表 2 资源利用率
Table 2 Resource utilisation

Resource	Utilization	Available	Utilization / %
LUT	40692	53200	77.00
LUTRAM	3771	17400	21.67
FF	52099	106400	48.97
BRAM	67	140	47.86
DSP	33	220	15.00

为评估上述架构的性能和测量精度,分别在 Visual Studio 2019 和 Matlab R2018a 上实现相应的软件程序,在 Visual Studio 2019 上使用 C++ 作为编程语言,编译选项配置为 Release x64。处理器为 Intel (R)Core (TM) i5-7200U,主频为 2.7 GHz,内存为 16 GB 的 DDR4 SDRAM,操作系统为 Windows 10。将该系统捕获到分辨率为 1280×800 的多组图像分别在 Visual Studio 2019 和 Matlab R2018a 上进行三维测量,每组图像各测量 10 次,计入各组图像的平均处理时间。表 3 对比了软件平台与该系统测量不同待测物体所需的计算时间。实验结果表明,软件平台的处理速度与有效点个数有关,有效点数越多处理时间越长,在该架构上处理相同分辨率图像所用时间是相同的,与有效点个数无关。综上所述,有效像素点越多,该系统较软件实现优势越大。

表 3 各平台三维测量速度对比

Table 3 Comparison of 3D measurement speed of each platform

Measured object	Number of valid points	R2018a /ms	Visual Studio 2019 /ms	Proposed method /ms
Nose model	540704	383	83	12
Portrait model I	586429	396	89	12
Portrait model II	605715	421	91	12
Plane	1024000	589	133	12

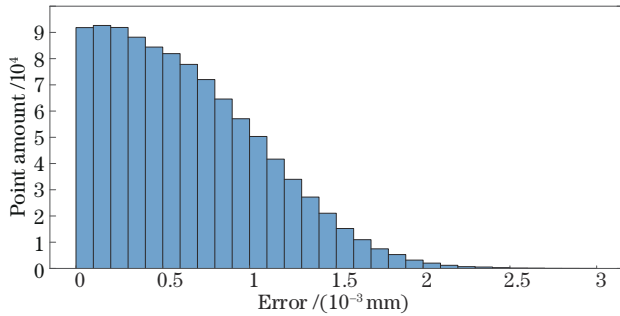


图 14 所提方法与 Matlab 测量结果偏差直方图

Fig. 14 Histogram of error between measurement results of the proposed method and that of Matlab

量结果的误差直方图。结果表明,所提方法与 Matlab 测量结果的最大绝对误差为 0.00306 mm、平均绝对误差为 0.00065 mm、均方根误差为 0.00079 mm,能够满足实际测量精度要求。

为了评估该系统测量精度,将测量平板的点云进行平面拟合。图 15 为拟合偏差,矩形平面为拟合后的平面,中间区域为测量平板的点云与拟合平面的偏差,平板点云与拟合平面的均方根误差为 0.06752 mm。

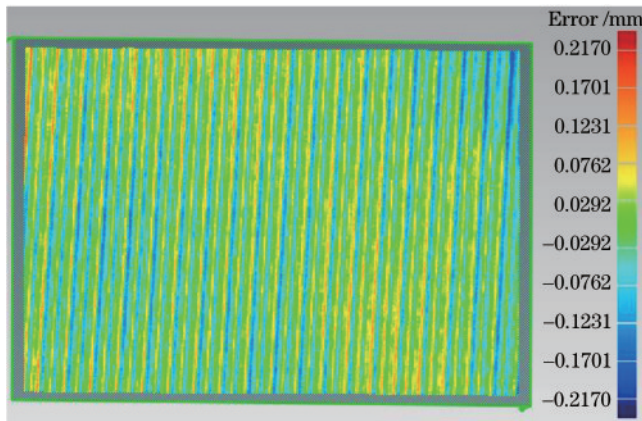


图 15 平面拟合误差

Fig. 15 Error in plane fitting

5 结 论

提出一种用于相移轮廓术的灵活高效的嵌入式解决方案,即 CPU(Linux)+CPU(Bare Metal)+FPGA 的多核异构架构。在 FPGA 上设计互补格雷码辅助解包裹的相移轮廓术算法的全过程,包括相位解调模块、解包裹模块以及相位深度映射模块,提高三维测量

效率。最后搭建一个嵌入式相移轮廓术三维测量系统来验证该方案的可行性。在实验部分给出该设计方案的资源利用率和功耗数据,并与主流 PC 处理同一组图像所需的时间进行对比,此外,通过平面拟合方式评估该系统的三维测量精度。实验结果表明,该系统处理 13 幅 1280×800 分辨率的图像所需时间为 12 ms、平面拟合的均方根误差为 0.06752 mm,满足结构光三维测量设备速度快、精度高、部署灵活的需求。

参 考 文 献

- [1] 浦婷婷, 吴周杰, 张启灿. 基于格雷码和相移算法的动态三维测量技术[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0512001.
Pu T T, Wu Z J, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional measurement technology based on gray code and phase-shifting algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0512001.
- [2] 詹瑜, 胡丹, 刘凯. 面向高反光区域的自适应结构光[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 1612001.
Zhan Y, Hu D, Liu K. Adaptive structured light for high-reflective areas[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 1612001.
- [3] 李杰, 陈彬, 曾欣怡, 等. 基于条纹级次编码与调制的结构光相位展开算法[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0912005.
Li J, Chen B, Zeng X Y, et al. Phase unwrapping algorithm for structured light based on fringe-order encoding and modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0912005.
- [4] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.
Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001.
- [5] Zhong K, Li Z W, Zhou X H, et al. Enhanced phase measurement profilometry for industrial 3D inspection automation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(9): 1563-1574.
- [6] Das A J, Valdez T A, Vargas J A, et al. Volume estimation of tonsil phantoms using an oral camera with 3D imaging[J]. Biomedical Optics Express, 2016, 7(4): 1445-1457.
- [7] Hong D, Lee H, Kim M Y, et al. Sensor fusion of phase measuring profilometry and stereo vision for three-dimensional inspection of electronic components assembled on printed circuit boards[J]. Applied Optics, 2009, 48

- (21): 4158-4169.
- [8] Mei Q, Gao J, Lin H, et al. Structure light telecentric stereoscopic vision 3D measurement system based on Scheimpflug condition[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 86: 83-91.
- [9] Nguyen H, Nguyen D, Wang Z Y, et al. Real-time, high-accuracy 3D imaging and shape measurement[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(1): A9-A17.
- [10] Zhan G M, Tang H W, Zhong K, et al. High-speed FPGA-based phase measuring profilometry architecture [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10553-10564.
- [11] Liu D M, Pan Y F, Lu R S. FPGA-assisted high-precision, high-speed 3D shape measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 315: 112366.
- [12] 陈松林, 赵吉宾, 夏仁波. 多频外差原理相位解包裹方法的改进[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0412004.
Chen S L, Zhao J B, Xia R B. Improvement of the phase unwrapping method based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0412004.
- [13] 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): 011202.
Liu F, Li J X, Lai J L, et al. Full-frequency phase unwrapping algorithm based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011202.
- [14] Feng S J, Zuo C, Zhang L, et al. Calibration of fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106622.
- [15] Silva J, Sklyarov V, Skliarova I. Comparison of on-chip communications in Zynq-7000 all programmable systems-on-chip[J]. *IEEE Embedded Systems Letters*, 2015, 7(1): 31-34.
- [16] Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, et al. 3-D shape measurement based on complementary Gray-code light[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(4): 574-579.
- [17] Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303004.
- [18] 孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1947-1951.
Sun X Z, Su X Y, Zou X P. Phase-unwrapping based on complementary structured light binary code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1947-1951.
- [19] Moreno D, Taubin G. Simple, accurate, and robust projector-camera calibration[C]//2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, October 13-15, 2012, Zurich, Switzerland. New York: IEEE Press, 2012: 464-471.
- [20] Li Z W, Shi Y S, Wang C J, et al. Accurate calibration method for a structured light system[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(5): 053604.
- [21] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 083601.