

文章编号: 1001-4888(2024)02-0158-10

基于偏振投影与空域耦合的两步相移测量方法*

梁妍¹, 尹卓异², 何小元², 王澄非¹

(1. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏南京 210096; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏南京 211189)

摘要: 栅线投影测量是一种被广泛采用的非接触、高精度三维形貌测量方法。然而由于时间相移技术不能在同一时刻采集相移图像, 导致这一技术在工业在线检测中难以发挥应有的作用, 因此本文结合偏振相机技术, 提出了一种基于双偏振投影校正的空间相移测量方法。该方法通过在投影镜头前加装偏振方向正交的线偏振片, 并采用本文提出的投影仪自校正方法, 将具有恒定相移量、但偏振方向不同的相移栅线图案投影到待测物体表面, 利用偏振相机单帧采集即可获得不同偏振方向的 2 幅相移图像, 从而实现空间两步相移。实验结果表明, 该方法对于非消偏振表面具有很好的测量效果, 2 幅相移图像的采集时间与相机曝光时间相同, 可以用于在线测量。

关键词: 栅线投影技术; 偏振; 两步相移; 三维测量

中图分类号: TN911.73; TB391.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-071

0 引言

随着工程领域对于测量需求的不断增长, 以视觉为媒介的光测实验力学技术由于其高精度、非接触等优点得到飞速发展^[1-2]。以栅线投影技术为代表的测量方法, 由于其测量过程中不会影响被测物体的力学行为, 无需对物体表面制备纹理图案, 且可以逐像素独立获取深度信息, 因此在形貌和初始缺陷检测、应变及位移监测等场景得到广泛应用。

栅线相位提取是栅线投影方法的关键环节之一, 其计算的准确性将直接影响到高度计算的准确性。目前主流的相位提取方法主要有 2 种: 傅里叶变换轮廓术^[3-4]和相移轮廓术^[5-6]。其中傅里叶变换轮廓术仅需 1 幅图像即可进行相位分解, 因此被广泛应用于高速实时测量和动态测量, 但由于物体表面高度同时存在频率信息, 在测量非平面物体时会发生频率混叠而导致精度丢失。相移轮廓术则是通过获取多幅相移栅线图来构成超定方程组, 将方程线性化进而利用最小二乘法求解相位信息。相移法计算相位时采用单点计算, 每个像素的相位计算结果不会影响其他像素点的结果, 因此精度较高, 但耗时较长。而两步相移方法是傅里叶变换法和相移法之间相互制衡的一种方法, 该方法利用局部特征解决方程欠定问题^[7-10], 平衡了测量速度与测量精度。

传统光学成像技术利用光的强度信息实现对物体的识别和测量。与强度和波长一样, 偏振作为光波的重要特性之一也能够提供丰富的信息。偏振成像在高反光、透明、表面无纹理的物体测量中发挥着重要作用, 在天文、遥感及水下探测成像、工业检测、医学成像等领域也得到广泛应用^[11-12]。金仁成等^[13]将偏振光传感器与惯导系统相结合, 针对传统导航系统易受攻击和诱导的问题, 提出一种偏振光辅助的无人机航姿优化解算方法, 该方法不仅提高了航姿解算的精度和鲁棒性, 而且对非重力加速度有

* 收稿日期: 2023-04-09; 修回日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11532005); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX220233)

通信作者: 王澄非(1965-), 副教授, 硕士生导师。研究领域为视觉检测与图像处理。Email: seufei@qq.com

良好的抑制作用。刘杰^[14]将偏振成像引入双目立体视觉中,解决了特殊目标的三维信息获取问题,为平面图像目标的识别提供了新方案。熊志航等^[15]提出了一种基于线偏振成像增强金属对比的方法,通过搭建2种多波长偏振图像采集系统,从而实现了在复杂场景对金属和非金属进行快速识别和分类。高晨栋等^[16]提出了一种基于双层多指标优化的水下偏振成像方法,该方法可以有效增强图像细节、平衡图像质量评价指标,从而提升复原图像的质量。

偏振空间可以被分解为独立的偏振分量,且由于其波动正交的物理特性,产生的通道串扰远小于RGB传感器,故本文提出了一种基于栅线投影技术的偏振空间相移方法。该方法利用光的偏振特性,为不同相移的栅线图片提供独立的通道。首先2台投影仪通过自校正的方式,同时将2个具有不同相移的正弦条纹图案平行投影到待测物体上,其次由偏振相机采集待测物体表面的变形条纹,最后采用任意步长的两步相移算法提取相位,并利用这些相位重建出物体的三维形貌。实验结果表明,该方法可以有效地测量物体三维形貌,且仅需要采集1张图像,解决了精度与速度之间的平衡问题,因此可应用于工业在线测量场景。

1 系统设计

本文提出了一种基于偏振的空间相移方法,并搭建出一套基于偏振相机的结构光三维测量系统。在现有的物体三维测量技术中,偏振光主要被应用于克服过饱和问题。本文将偏振用于一个不同的目的,为具有不同相移的条纹图提供独立的通道,这种方法仅需使用偏振相机拍摄1张图像即可实现两步相移测量。

基于偏振空间相移的测量系统如图1所示。与传统的条纹投影系统不同,该系统由2台相同的DLP投影仪和1台偏振相机组成。在2个投影仪镜头前,分别加装 0° 和 90° 偏振角度正交的线偏振滤光片。因为正交情况下其偏振分量相互独立,所以可以在没有混叠的情况下,将2个具有不同相移的正弦条纹图案平行地投影到被测物体表面上。然而用2个投影仪构建1个高精度的同轴系统的成本较高,且会引入新的系统误差,降低系统的可靠性。为了解决这个问题,本文提出一种基于几何反射的投影仪自校正方法,以相机靶面坐标系为基准,获取2个投影仪靶面坐标系到物面坐标系的透视变化矩阵,根据此矩阵修正2幅投影的条纹图像,以确保2个投影仪平行地投影条纹至待测物体表面,具体实现原理将在2.2节中进行阐述。

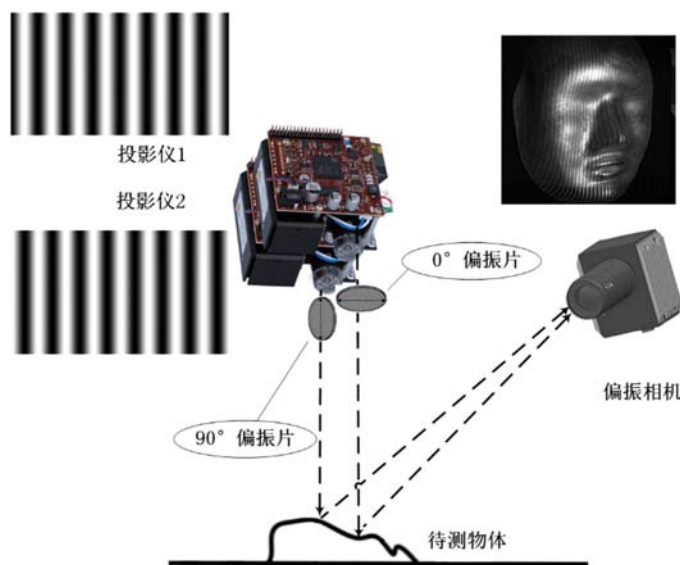


图1 测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

首先将校正后的栅线图案投影到待测物体表面;其次由偏振相机捕捉经物体高度调制后的栅线图像,得到1幅包含4个偏振角度信息的图像;然后从图像中提取出 0° 和 90° 的2张偏振角度正交的图像,

即2张相差 π 个单位的相移图像;最终通过任意两步相移的相位提取算法获取栅线相位图,原理将在2.1节具体阐述。此外,利用相位图重建物体表面深度的方法,与标准条纹投影技术所采取方法一致,故本节不再进行赘述。

2 测量原理

2.1 基于任意步长的两步相移

传统的相移方法需要至少3幅已知相移的图像。为了提高系统的鲁棒性,在实际测量中通常选择4个或4个以上的相移步骤,但是步数与单次测量时间成正比。两步相移法是一种很好的、能平衡测量时间和测量精度的折衷方法。为让两步相移法更广泛地适用于不同的测量系统,本文采用了一种适用于任意两步相移轮廓术的相位提取算法。该算法首先根据2幅变形栅线图的强度分布,建立目标函数,将相位恢复问题转化为求解非线性优化问题。然后通过对参数进行分组并指定一个需要非线性优化的参数,将相位解算过程降级为线性优化问题,从而能够提高算法的鲁棒性,显著减少计算时间。

2.1.1 目标函数

背景项、幅值和相位是两步相移法的主要求解参数。对于每个测点,基于2幅栅线图像只能建立2个方程。由于未知数多于方程数量,因此需要进一步建立参数间的新关系,详细过程如下。

对于任意步长的两步相移法,由物体表面高度调制得到的栅线强度可表示为

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= \Gamma(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos[2\pi fx + \varphi(x, y)]\} \\ I_2(x, y) &= \Gamma(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos[2\pi fx + \varphi(x, y) + \xi]\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: I_1 和 I_2 是2个相移步长差值为 ξ 的栅线图像; $\Gamma(x, y)$ 为物体表面的反射率; $A(x, y)$ 为投影仪光强和环境光强之和; f 为栅线的频率; $\varphi(x, y)$ 为由高度信息调制的相位; x 为沿栅线相位主方向变化的像素坐标; y 为垂直于 x 方向的像素坐标。

对物体表面的反射率项进行消除:

$$\frac{I_1(x, y)}{I_2(x, y)} = \frac{1 + \frac{B(x, y)}{A(x, y)} \cos[2\pi fx + \varphi(x, y)]}{1 + \frac{B(x, y)}{A(x, y)} \cos[2\pi fx + \varphi(x, y) + \xi]} \quad (2)$$

式中, $B(x, y)/A(x, y)$ 为栅线的对比度。为了简化书写,省略坐标 y ,并将对比度标记为 B_A ,将式(2)重写为

$$\frac{I_1(x)}{I_2(x)} = \frac{1 + B_A(x) \cos[2\pi fx + \varphi(x)]}{1 + B_A(x) \cos[2\pi fx + \varphi(x) + \xi]} \quad (3)$$

此外,还需要引入2个假设条件。在图像中选择大小为 $1 \times (2R+1)$ 的窗口区域,如果 R 的值很小,那么假设条件为:(1)窗口中像素对应的相位值是线性分布的。(2)窗口内像素对应的对比度为恒定值。用数学表达式表示,即:(1) $\partial\varphi(r)/\partial r$ 为常量;(2) $B_A(r)$ 为常量,其中 $r \in [-R, R]$, R 为窗口半径。

为了将假设条件引入式(3)中,将坐标 x 替换为坐标 r ,即

$$\frac{I_1(r)}{I_2(r)} = \frac{1 + B_A(r) \cos[\varphi_n + r\Delta\varphi]}{1 + B_A(r) \cos[\varphi_n + \xi + r\Delta\varphi]} \quad (4)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为与栅线频率 f 有关的线性变化参数,在周期性变化的栅线中可认为 $\Delta\varphi = 2\pi f$; φ_n 为窗口中心处的相位值; r 为窗口内以窗口中心为原点的相对坐标。

因为式(4)中包含3个未知参数,所以 r 必须大于等于1,这意味着至少需要引入3个像素点才能实现相位求解。式(4)可以转化为非线性优化问题,目标函数或约束可以表示为

$$\begin{aligned} \min_{B_A, \varphi_n, \Delta\varphi} \sum_{r=-R}^R \{ & I_1(r) [1 + B_A(r) \cos(\varphi_n + \xi + r\Delta\varphi)] - I_2(r) [1 + B_A(r) \cos(\varphi_n + r\Delta\varphi)] \}^2 \quad (5) \\ G(r) &= I_1(r) [1 + B_A \cos(\varphi_n + \xi + r\Delta\varphi)] - I_2(r) [1 + B_A \cos(\varphi_n + r\Delta\varphi)] \\ &= [I_1(r) - I_2(r)] \left\{ 1 + B_A \cos \left[\varphi_n + \frac{\xi}{2} + r\Delta\varphi \right] \cos \left(\frac{\xi}{2} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - [I_1(r) + I_2(r)] B_A \sin\left[\varphi_n + \frac{\xi}{2} + r\Delta\varphi\right] \sin\left(\frac{\xi}{2}\right) \\
& = \Gamma(r) \cos\left(\frac{\xi}{2}\right) B_A \cos\left[\varphi_n + \frac{\xi}{2} + r\Delta\varphi\right] - I^+(r) \sin\left(\frac{\xi}{2}\right) B_A \sin\left[\varphi_n + \frac{\xi}{2} + r\Delta\varphi\right] + \Gamma(r) \\
& = \Gamma(r) - \sqrt{\left[\Gamma(r) \cos\left(\frac{\xi}{2}\right)\right]^2 + \left[I^+(r) \sin\left(\frac{\xi}{2}\right)\right]^2} \\
& \quad \cdot B_A \cos\left\{\varphi_n + r\Delta\varphi + \frac{\xi}{2} - \arctan\left[\frac{\Gamma(r) \cos\left(\frac{\xi}{2}\right)}{I^+(r) \sin\left(\frac{\xi}{2}\right)}\right]\right\} \\
& = \Gamma(r) - I^*(r) B_A \cos[\varphi_n + r\Delta\varphi + \varphi^*(r)] \tag{6}
\end{aligned}$$

记

$$\begin{cases}
\Gamma(r) = I_1(r) - I_2(r) \\
I^+(r) = I_1(r) + I_2(r) \\
I^*(r) = \sqrt{\left[\Gamma(r) \cos\left(\frac{\xi}{2}\right)\right]^2 + \left[I^+(r) \sin\left(\frac{\xi}{2}\right)\right]^2} \\
\varphi^*(r) = \frac{\xi}{2} - \arctan\left[\frac{\Gamma(r) \cos\left(\frac{\xi}{2}\right)}{I^+(r) \sin\left(\frac{\xi}{2}\right)}\right]
\end{cases} \tag{7}$$

则目标函数式(5)可以表示为

$$\min_{B_A, \varphi_n, \Delta\varphi} \sum_{i=-R}^R \{\Gamma(r) - I^*(r) B_A \cos[\varphi_n + r\Delta\varphi + \varphi^*(r)]\}^2 \tag{8}$$

式(8)的形式比目标函数式(5)更加简洁,更有利于优化过程的建立。

2.1.2 优化方法

在相移法中,可以将非线性方程线性化,从而利用线性的最小二乘法求解。注意到目标函数与相移法目标函数的形式相似,则有

$$\begin{aligned}
& \Gamma(r) - I^*(r) B_A \cos[\varphi_n + r\Delta\varphi + \varphi^*(r)] = \\
& \Gamma(r) - I^*(r) B_A \cos[r\Delta\varphi + \varphi^*(r)] \cos(\varphi_n) + I^*(r) B_A \sin[r\Delta\varphi + \varphi^*(r)] \sin(\varphi_n) = \\
& \Gamma(r) - I^*(r) \cos[r\Delta\varphi + \varphi^*(r)] B_c - I^*(r) \sin[r\Delta\varphi + \varphi^*(r)] B_s \tag{9}
\end{aligned}$$

式中: $B_c = B_A \cos(\varphi_n)$; $B_s = -B_A \sin(\varphi_n)$ 。给定 $\Delta\varphi$ 的值,则 $I^*(r) B_A \sin[r\Delta\varphi + \varphi^*(r)]$ 和 $I^*(r) B_A \cos[r\Delta\varphi + \varphi^*(r)]$ 的值都是已知的,因此可以将 2 个非线性参数 B_A 和 φ_n 转化为线性的 B_s 和 B_c 。则对 B_s 和 B_c 的优化可表示为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix}
I^*(-R) \sin[(-R) \cdot \Delta\varphi + \varphi^*(-R)] & I^*(-R) \cos[(-R) \cdot \Delta\varphi + \varphi^*(-R)] \\
\vdots & \vdots \\
I^*(0) \sin[0 \cdot \Delta\varphi + \varphi^*(0)] & I^*(0) \cos[0 \cdot \Delta\varphi + \varphi^*(0)] \\
\vdots & \vdots \\
I^*(R) \sin[R \cdot \Delta\varphi + \varphi^*(R)] & I^*(R) \cos[R \cdot \Delta\varphi + \varphi^*(R)]
\end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_s \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma(-R) \\ \vdots \\ \Gamma(0) \\ \vdots \\ \Gamma(R) \end{bmatrix} \tag{10}$$

式(10)可以简写为

$$N_{[(2R+1) \times 2]} B_{[2 \times 1]} = I_{[(2R+1) \times 1]} \tag{11}$$

引入以下符号:

$$\begin{aligned}
I^*(r) \sin[r\Delta\varphi + \varphi^*(r)] &= I_s^*(r) \\
I^*(r) \cos[r\Delta\varphi + \varphi^*(r)] &= I_c^*(r) \tag{12}
\end{aligned}$$

根据线性最小二乘理论,窗口中心相位值的最优解可表示为

$$\varphi_n = \arctan \left[\frac{\sum_{r=-R}^R I_c^{*2}(r) \cdot \sum_{r=-R}^R I_s^*(r) \Gamma(r) - \sum_{r=-R}^R I_s^*(r) I_c^*(r) \cdot \sum_{r=-R}^R I_c^*(r) \Gamma(r)}{\sum_{r=-R}^R I_s^{*2}(r) \cdot \sum_{r=-R}^R I_c^*(r) \Gamma(r) - \sum_{r=-R}^R I_s^*(r) I_c^*(i) \cdot \sum_{r=-R}^R I_s^*(i) \Gamma(r)} \right] \quad (13)$$

相比传统两步相移算法步长固定的特点,本文提出的两步相移算法可以对任意步长的两步相移进行计算,为两步相移算法的求解提供了一种解决方案。虽然本文仅对步长为 π 的两步相移图像进行了计算,但作为偏振投影在两步相移测量法中的初步尝试已足以证明这一方案的可行性,后期可以对不同步长的两步相移图像计算出相位值进行比较,从而进一步提升精度。

2.2 投影仪自校正

本文所提出的测量系统基于双投影仪模型,然而2个投影仪存在难以构建一个精确的同轴系统的问题,故本文又提出一种投影仪自校正的对准方法,以解决这一问题。

由于本文搭建的基于偏振相移的三维测量系统中存在多个坐标系(2个投影仪靶面坐标系、相机靶面坐标系以及世界坐标系),因此可以视世界坐标系为基准,以相机靶面坐标系为媒介,建立物面坐标系,将投影仪的靶面坐标进行统一。投影仪靶面坐标系与世界坐标系的投影映射关系如下。

世界坐标系 $[X, Y, Z, 1]^T$ 与相机靶面坐标系 $[x, y, 1]^T$ 的投影映射关系可表示为

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: Z_c 为尺度修正系数; \mathbf{K} 为相机内参矩阵 (3×3); \mathbf{R} 为旋转矩阵 (3×3); \mathbf{T} 为平移矩阵 (3×1)。由于投影仪可被视为逆向的相机,其成像模型与相机一致,故可以类似得到两投影仪靶面坐标系 $[x_i, y_i, 1]^T$ ($i=1, 2$) 与相机靶面坐标系之间的关系:

$$Z_{c1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{T}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$Z_{c2} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_2 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2 & \mathbf{T}_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

由于两投影仪靶面坐标系与相机靶面坐标系的关系已知,因此可在此基础上设立标准的世界坐标系,即以相机坐标系为基准,建立投影仪和标准世界坐标系的对应关系。将 \mathbf{K}_i ($i=1, 2$) 末尾行补全 $[0, 0, 0, 1]$ 为标准 4×4 方阵,并将投影仪坐标系扩展为 $[x_1, y_1, 1, 1]^T$ 与 $[x_2, y_2, 1, 1]^T$, 则两投影仪靶面坐标系的关系可以表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} &= \frac{1}{Z_{c1}} \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{T}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\mathbf{K}_2 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2 & \mathbf{T}_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} Z_{c2} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{T}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2 & \mathbf{T}_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{K}_2^{-1} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{T}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2^{-1} & -\mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{T}_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{K}_2^{-1} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2^{-1} & -\mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{T}_2 + \mathbf{T}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{K}_2^{-1} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

即两者满足投影变换关系：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{21} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中, p_{ij} ($i=1,2,3; j=1,2,3$) 为投影变换矩阵的元素。

由于各投影仪实际状况未知,直接将一台投影仪像素向另一台映射可能会带来较大的偏差,故设立标准世界平面进行中间量传递。这一世界平面可以由标定板提供,基本流程如图 2 所示。

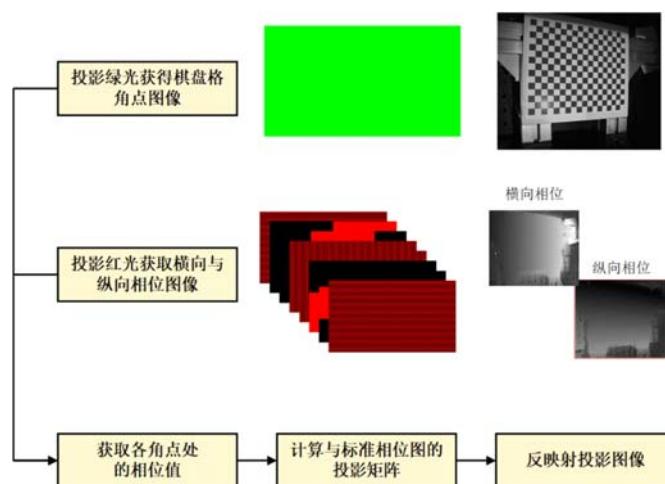


图 2 投影仪自校正流程图

Fig. 2 Flowchart of projector self-calibration

通过上述流程,可以利用相机采集的像素信息为媒介,将各投影仪的原始相位图强制映射至定义于标定板上的标准相位图中,实现投影仪的自校正。

3 实验验证

为了验证本文提出的方法,搭建如图 3 所示的实验系统,对人脸面具模型进行测量。考虑到实际应用和仪器成本,系统采用 FLIR 的 BFS-U3-51S5P-C(mono) 型号偏振相机,相机采用 Sony IMX250MZR CMOS 全局曝光偏振感光芯片,四向偏振器从 4 个不同角度(0° 、 45° 、 90° 、 135°) 测量线偏振光强,从而得到最终的偏振图像。相机分辨率为 $2448\text{pixel} \times 2048\text{pixel}$,在全分辨率下最大帧率为 75fps。投影模块由 2 个 DLP 投影仪和 2 个偏振片组成,投影仪型号为德州仪器公司的 DLP230npevm,分辨率为 $1920\text{pixel} \times 1080\text{pixel}$;偏振片直径 25mm,波长为 $380\text{nm} \sim 760\text{nm}$ 。

投影仪自校正的效果如图 4 所示。图 4(a) 是校正前 2 个投影仪合成投影到标定板上的效果图,图 4(b) 是校正前 2 个投影仪的投影图片——标准的栅线图。可以从图 4(a) 的标定板上观察到,2 个投影仪投影至标定板上的栅线与棋盘格均不平行且相互交错。图 4(c) 是校正后 2 个投影仪合成投影到标定板上的效果图,图 4(d) 是校正后 2 个投影仪的投影图片——校正后的栅线图。可以从图 4(b) 的标定板上观察到,2 个投影仪投影至标定板上的栅线与棋盘格均平行,两投影栅线之间也相互平行且间隔 π 个单位,以此可判定完成了投影自校正。

在完成校正的基础上,利用偏振相机采集图像,采集与分离结果如图 5(a) 所示。取图 5(a) 左图中第 225 行绘制出 0° 和 90° 偏振分量的曲线,通道曲线图如图 5(b) 所示。从图 5(b) 可以观察到,两正交通道明显存在 180° 的相移角,这一结论从实验角度验证了本文方法的有效性。此外还观察到图 5(b) 中相移误差逐渐变大,这是由于本文仅采用了 1 张标定图像进行标定,而未对多张图像进行全局标定,因此会导致旋转矩阵的计算结果具有一定偏差,这种偏差在距离图像中心(光心)的远端处会较为明显,但从本文的解算结果来看,这一偏移量引入的测量误差较小,并非影响测量准确性的主要因素,因此可忽略。

为了检验本文提出的空域偏振两步相移算法的精度,将本文提出的方法、时域偏振两步相移与时域

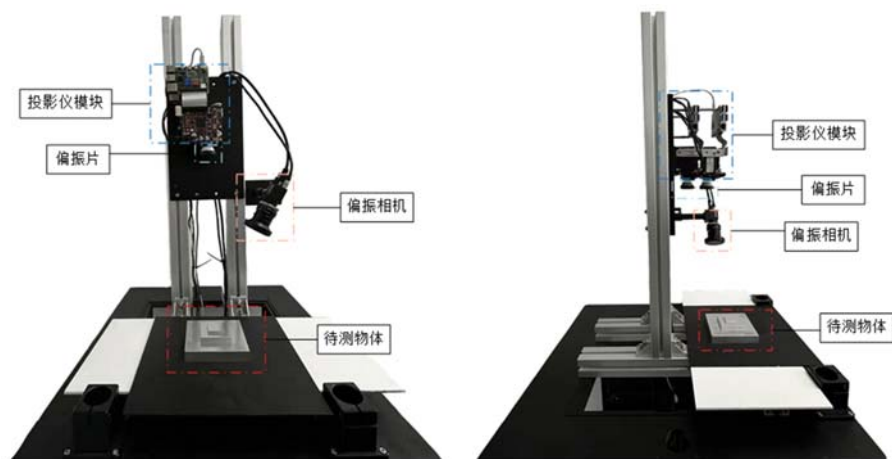


图3 实验装置图

Fig. 3 Scheme of experiment

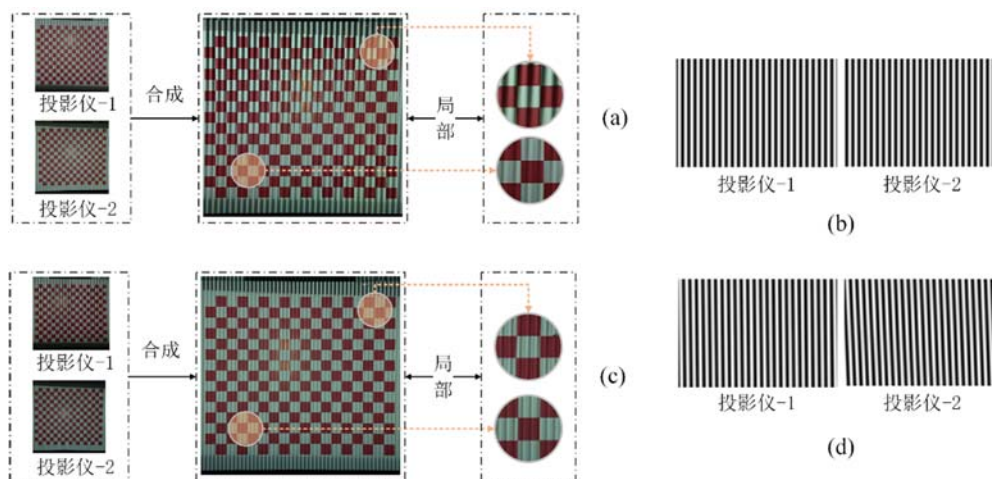


图4 投影仪校正前后对比:(a)校正前投影效果;(b)校正前投影图片;(c)校正后投影效果;(d)校正后投影图片

Fig. 4 Comparison of before and after projector calibration: (a) projection effect before calibration;

(b) projected picture before calibration; (c) projection effect after calibration; (d) projected picture after calibration

偏振十二步相移进行对比。本文提出的空域偏振方法利用2台投影仪加装偏振片投影2幅栅线相移图案,而时域偏振方法仅用其中1台投影仪加装偏振片投影所需的栅线相移图案。在时域偏振方法中,时域偏振十二步相移由于步数足够多,可认为其结果为真值。空域与时域两步相移算法的计算结果如图6所示,图6(a)是空域偏振两步相移方法计算出的相位值,图6(b)、(c)分别是时域偏振两步相移和十二步相移方法计算出的相位值。将空域偏振两步相移和时域偏振两步相移分别与时域偏振十二步相移进行对比,可以得到如图6(d)所示的相位误差。从图6(d)可以明显观察到,除相位阶跃处相位信息进一步混叠导致相位计算的精度下降以外,其余区域误差整体位于 0.1rad 以内。

为了进一步验证本文所提出的偏振两步相移方法的测量精度,进行了传统两步相移法和偏振两步相移法的静态重复对比实验,实验结果见表1。由于存在底噪,传统两步相移法的测量平均绝对误差为 0.0305rad ,而偏振两步相移法的平均绝对误差为 0.0299rad 。从图6(d)和表1可以看出,本文提出的空域偏振两步相移算法与时域偏振两步相移算法的精度结果基本一致。

本文所提出的方法在保证测量精度的前提下,由1张图像来获得两步相移的所需数据,且采集时间与相机曝光时间(微秒级)相同,同时避免了多步相移采集图像过程中因为物体运动带来的相位误差。此外本文采用的偏振相机帧率为 75fps ,最快曝光时间为 $6\mu\text{s}$,如果用高速相机想要达到同样的效果,则帧率需至少达到 100000fps 。

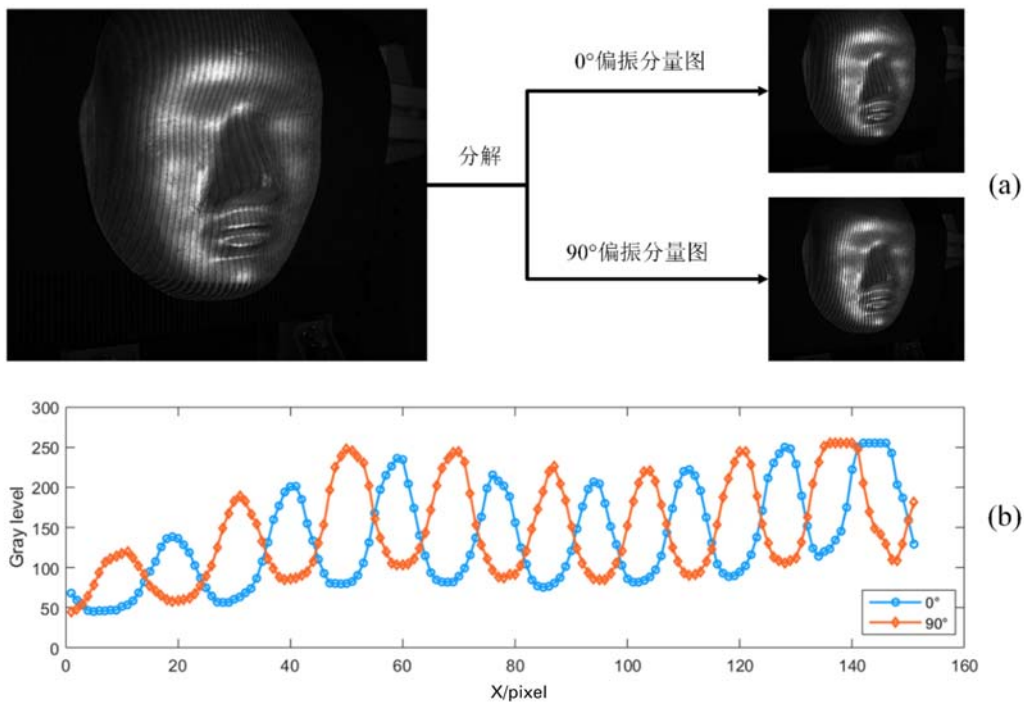


图 5 (a)偏振分解图像;(b)0°和 90°通道曲线图

Fig. 5 (a)decomposed images after polarization;(b) diagram of 0° & 90° channel

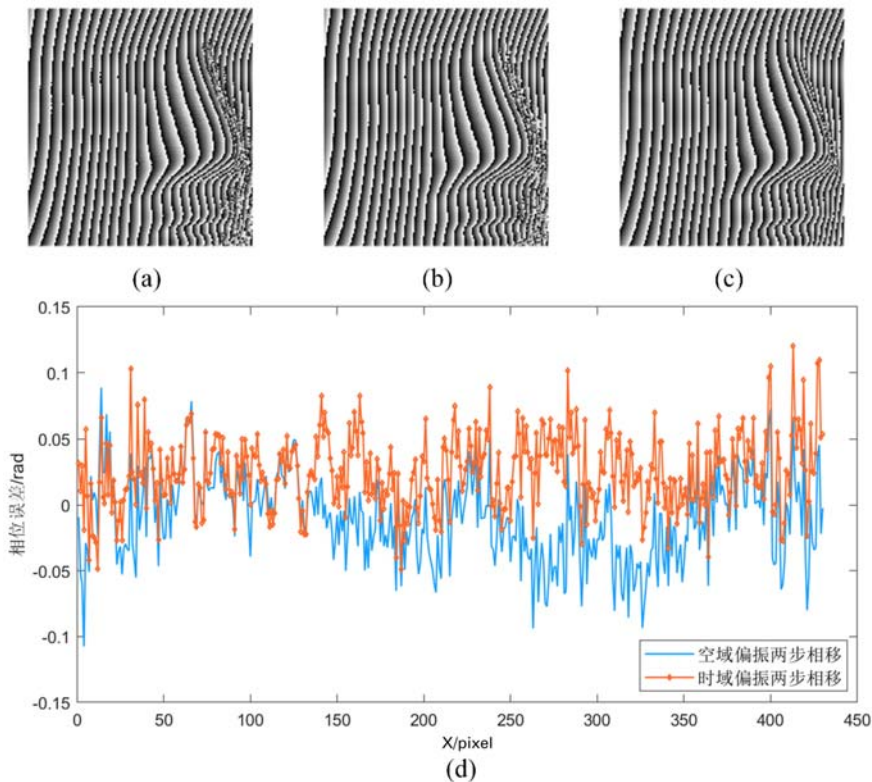


图 6 (a)空域偏振两步相移的相位;(b)时域偏振两步相移的相位;

(c)时域偏振十二步相移的相位;(d)空域和时域的错误对比

Fig. 6 (a) phase of two-step phase-shifting of spatial polarization; (b) phase of two-step phase-shifting of temporal polarization; (c) phase of twelve-step phase-shifting of temporal polarization; (d) error comparison in spatial and temporal domains

表1 不同相移法的对比
Tab.1 Comparison of different phase-shifting methods

方法对比	传统两步相移方法	偏振两步相移方法
平均绝对误差/rad	0.0305	0.0299

4 结论

本文提出了一种基于偏振投影和空域耦合的两步相移测量方法。该方法通过投影仪自校正技术,结合适用于任意两步相移轮廓术的相位提取算法,可精确解调出物体的相位信息。通过理论分析及实验测量,验证了本方法的精度和有效性。相比两步时间相移方法,本文通过条纹的偏振信息物理解耦可以同时获取2种测量图像,在空间上实现了条纹相移。同时将2幅相移图像的采集时间缩减至与相机曝光时间相同,可达微秒级,因此可应用于高速动态的测量场景中。此外,本文还通过投影仪图像自校正的方法,分离了多投影仪之间的严格几何约束关系,利用后标定来重定向几何模型,进一步提升了方法应用的便捷性。

参考文献:

- [1] 魏康, 员方, 董志强, 等. 基于标志点的多相机数字图像相关方法精度分析及土木工程中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(2):219-226 (WEI Kang, YUAN Fang, DONG Zhiqiang, et al. Precision analysis and civil application of multi-camera digital image correlation method based on encoded targets[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2021, 51(2):219-226 (in Chinese))
- [2] 何沐, 刘聪, 尹卓异, 等. 用于高精度离面位移测量的相机阵列栅线投影测量技术[J]. 实验力学, 2021, 36(5):609-616 (HE Mu, LIU Cong, YIN Zhuoyi, et al. Fringe projection profilometry with camera array for high-precision out-of-plane displacement measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(5):609-616 (in Chinese))
- [3] 王邺, 陈文静, 韩梦奇. 基于傅里叶变换的改进圆形条纹投影轮廓术[J]. 光学学报, 2022, 42(13):89-99 (WANG Ye, CHEN Wenjing, HAN Mengqi. Improved circular fringe projection profilometry based on fourier transform[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(13):89-99 (in Chinese))
- [4] LIU Y, FU Y, ZHUAN Y, et al. High dynamic range real-time 3D measurement based on Fourier transform profilometry[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138:106833.
- [5] YAO J, XIONG C, ZHOU Y, et al. Phase error elimination considering gamma nonlinearity, system vibration, and noise for fringe projection profilometry[J]. Optical Engineering, 2014, 53(9):094102.
- [6] 刘达, 雷振坤, 姜昊, 等. 条纹投影法中考虑伽马非线性影响的相移编码去包裹方法[J]. 实验力学, 2021, 36(3):287-298 (LIU Da, LEI Zhenkun, JIANG Hao, et al. Phase-shift encoded unwrapping method considering the gamma nonlinear influence in fringe projection profilometry[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(3):287-298 (in Chinese))
- [7] 尹卓异, 刘聪, 赖立钊, 等. 任意步长两步相移法的鲁棒高精度相位解算方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8):255-262 (YIN Zhuoyi, LIU Cong, LAI Lizhao, et al. Robust high-precision phase solution method based on two-step phase-shifting method with arbitrary step length[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8):255-262 (in Chinese))
- [8] 康新, 何小元. 两步相移实现投影栅相位测量轮廓术[J]. 光学学报, 2003, 23(1):75-79 (KANG Xin, HE Xiaoyuan. Two-step phase-shifting technique for phase measurement profilometry by grating projection[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1):75-79 (in Chinese))
- [9] YIN Z, DU Y, SHE P, et al. Generalized 2-step phase-shifting algorithm for fringe projection[J]. Optics Express, 2021, 29(9):13141-13152.
- [10] YANG F, HE X. Two-step phase-shifting fringe projection profilometry: intensity derivative approach[J]. Applied Optics, 2007, 46(29):7172-7178.
- [11] 李智渊, 翟爱平, 冀莹泽, 等. 光学偏振成像技术的研究、应用与进展[J]. 红外与激光工程, 2023(9):298-313

- (LI Zhiyuan, ZHAI Aiping, JI Yingze, et al. Research, application and progress of optical polarization imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023(9):298–313 (in Chinese))
- [12] 罗海波, 曹军峰, 盖兴琴, 等. 基于偏振成像的工业视觉及其关键技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(14):44–52 (LUO Haibo, CAO Junfeng, GAI Xingqin, et al. Industrial vision based on polarization imaging and its key technologies[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(14):44–52 (in Chinese))
- [13] 金仁成, 孙庆飞, 刘忱, 等. 偏振光辅助微惯导的航姿优化解算方法[J]. *信息技术*, 2023, 47(6):1–7 (JIN Rencheng, SUN Qingfei, LIU Chen, et al. Optimal attitude solution method for micro inertial navigation assisted by polarized light[J]. *Information Technology*, 2023, 47(6):1–7 (in Chinese))
- [14] 刘杰. 基于偏振成像的双目立体视觉应用技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2021 (LIU Jie. Research on application technologies of binocular stereo vision based on polarization imaging[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2021 (in Chinese))
- [15] 熊志航, 廖然, 曾亚光, 等. 利用偏振成像在复杂现场快速识别金属碎屑(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6):18–23 (XIONG Zhihang, LIAO Ran, ZENG Yaguang, et al. Rapid identification of metal debris in complicated scenes by using polarization imaging(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6):18–23 (in Chinese))
- [16] 高晨栋, 赵明琳, 卢德贺, 等. 基于双层多指标优化的水下偏振成像技术[J]. *物理学报*, 2023, 72(7):197–206 (GAO Chendong, ZHAO Minglin, LU Dehe, et al. Underwater polarization imaging based on two-layer multi-index optimization[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(7):197–206 (in Chinese))

Two-step phase-shifting method based on polarization projection and spatial coupling

LIANG Yan¹, YIN Zhuoyi², HE Xiaoyuan², WANG Chengfei¹

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: Fringe projection profilometry is a widely used non-contact, high-precision three-dimensional shape measurement method. However, due to the inability of temporal phase-shifting technology to capture phase-shifted images at the same time, it is difficult for this technology to play its due role in industrial online detection. Therefore, this paper proposes a spatial phase-shifting measurement method based on dual-polarization projection calibration in combination with polarization camera technology. In this method, linear polarization filters with orthogonal polarization directions are installed in front of a pair of projector lenses, and the proposed projector self-calibration method is used to project the fringe pattern with constant phase-shifting but different polarization directions onto the surface of the object to be measured. Consequently, two phase-shifted images with different polarization directions can be obtained to achieve spatial two-step phase-shifting in single-shot. The experimental results show that this method has a good measurement effect on non-depolarized surfaces, and the acquisition time of the two phase-shifted images is the same as the exposure time of the camera, which can be used for online measurement.

Keywords: fringe projection profilometry; polarization; two-step phase-shifting; three-dimensional measurement