

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于光流像素匹配的扫描显微相位测量轮廓术

王思远, 刘元坤, 于馨

引用本文:

王思远, 刘元坤, 于馨. 基于光流像素匹配的扫描显微相位测量轮廓术[J]. *光电工程*, 2024, 51(11): 240194.

Wang S Y, Liu Y K, Yu X. A scanning micro phase measuring profilometry based on optical flow pixel matching[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(11): 240194.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240194>

收稿日期: 2024-08-19; 修改日期: 2024-09-25; 录用日期: 2024-09-26

相关论文

Physics-informed deep learning for fringe pattern analysis

Wei Yin, Yuxuan Che, Xincheng Li, Mingyu Li, Yan Hu, Shijie Feng, Edmund Y. Lam, Qian Chen, Chao Zuo

Opto-Electronic Advances 2024, 7(1): 230034 doi: [10.29026/oea.2024.230034](https://doi.org/10.29026/oea.2024.230034)

基于离焦二值显示和条纹投影的复合表面三维测量方法

邵金凤, 倪育博, 孟召宗, 高楠, 高宇森, 杨泽青, 张国锋, 尹伟, 赵洪伟, 张宗华

光电工程 2024, 51(4): 240024 doi: [10.12086/oe.2024.240024](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240024)

基于多视角融合的手眼协同超视野目标测量与3D重建

张波涛, 李正强, 华超豪, 谢佳龙, 吕强

光电工程 2024, 51(10): 240180 doi: [10.12086/oe.2024.240180](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240180)

结构光投影三维面形测量及纹理贴图方法

向卓龙, 张启灿, 吴周杰

光电工程 2022, 49(12): 220169 doi: [10.12086/oe.2022.220169](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220169)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

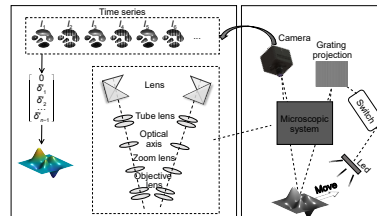
DOI: 10.12086/oe.2024.240194

CSTR: 32245.14.oe.2024.240194

基于光流像素匹配的扫描 显微相位测量轮廓术

王思远, 刘元坤*, 于馨

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065



摘要: 在扫描相位测量轮廓术中, 需要先将不同位置的物体匹配到同一点, 再根据相移算法提取相位信息, 而像素匹配精度与相移算法均会影响测量精度。为此, 采用显微系统, 根据其远心光路特性实现物体移动量与像素移动量的等量转换; 通过交替采集白场图像和条纹图像, 由白场图像通过光流法实现精确的像素匹配, 再根据物体匀速运动特点实现条纹图像的精确像素匹配; 根据初始条纹周期选择基本符合满周期的 N 幅条纹图, 由任意步数相移方法计算出截断相位分布, 再通过概率密度函数搜索最佳条纹周期, 进而得到准确的相位信息, 完成物体形貌测量。实验表明, 所提方法有效提高了测量精度, 相移算法也适用于任意 $N(N \geq 3)$ 幅图, 在模拟工业流水线场景中物体的三维测量时, RMSE (均方根误差) 可达 0.008 mm 左右。

关键词: 扫描测量; 光流法; 显微系统; 概率密度函数; 任意 N 步相移

中图分类号: TP391; O438

文献标志码: A

王思远, 刘元坤, 于馨. 基于光流像素匹配的扫描显微相位测量轮廓术 [J]. 光电工程, 2024, 51(11): 240194

Wang S Y, Liu Y K, Yu X. A scanning micro phase measuring profilometry based on optical flow pixel matching[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(11): 240194

A scanning micro phase measuring profilometry based on optical flow pixel matching

Wang Siyuan, Liu Yuankun*, Yu Xin

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chendu, Sichuan 610065, China

Abstract: In scanning PMP, it is essential to first match different positions of the object to the same point, and then extract phase information using phase-shifting algorithms. Both pixel-matching accuracy and phase-shifting algorithms influence measurement precision. To address this, a microscopic system is employed, leveraging its telecentric optical path characteristics to achieve equal conversion between object displacement and pixel displacement. By alternately capturing white-field and fringe images, precise pixel matching is realized through optical flow in the white-field images, followed by accurate pixel matching of the fringe images based on the object's uniform motion. A set of N fringe images, closely matching a full cycle based on the initial fringe period, is selected to compute the truncated phase distribution using an arbitrary step phase-shifting method. The optimal fringe period is then identified through a probability density function, leading to the accurate extraction of phase information and the completion of the object morphology measurement. Experimental results demonstrate that the proposed method significantly enhances measurement accuracy, with the phase-shifting algorithm applying to any $N \geq 3$

收稿日期: 2024-08-19; 修回日期: 2024-09-25; 录用日期: 2024-09-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF0712902)

*通信作者: 刘元坤, lyk@scu.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

images, making it particularly suitable for 3D measurements of objects in industrial production lines, achieving an RMSE measurement accuracy of about 0.008 mm.

Keywords: scanning measurement; optical flow method; microscopic system; probability density function; arbitrary N -step phase-shifting

1 引言

随着科技的进步与工业生产自动化的普及, 对物体三维形貌的测量需求也越来越大。而光学三维测量技术由于具有高精度、非接触和无损等优势, 被广泛应用于三维测量中^[1-5]。目前常用的三维测量方法有傅里叶变换轮廓术 (Fourier transform profilometry, FTP)^[6]、相位测量轮廓术 (phase measuring profilometry, PMP)^[7]、线激光扫描 (line laser scanning, LLS)^[8] 和双目立体视觉 (stereo vision, SV)^[9] 等。其中, PMP 由于其精度高而备受重视, 但 PMP 需要至少三帧相移图像才能完成相位计算, 而要提高测量精度, 又往往需要采用更高步数相移技术, 导致测量速度受限^[10]; 若将 PMP 与流水线上物体在线扫描测量场景相结合, 以物体移动替换条纹相移实现 PMP 扫描测量^[11-12], 就能充分发挥 PMP 优势。

PMP 扫描三维测量中, 由于物体移动, 使得不同时刻拍摄的物体图像位置也不同, 要计算出物体轮廓引入的相位信息, 首先需要将不同时刻图像中的物体匹配到同一位置, 这过程称为像素匹配, 是 PMP 扫描测量的关键之一^[13-15]。由于条纹图像具有周期性, 无法直接基于条纹图像实现像素匹配, 为此, Yu 等^[16] 通过增设标志物, 实现了像素匹配, 但是这需要对流水线场景进行额外改装; Zheng 等^[17] 则提出了一种调制度层析的方法来确定像素匹配, 但需投影高频条纹, 基于滤波的调制度信息提取方法会造成物体轮廓信息失真, 进而降低匹配量的获取精度; Xu 等^[18] 提出了基于相位预测的在线三维测量方法, 但又存在匹配时间较长, 展开起始点不一致的问题; Wu 等^[12] 对调制度匹配方法进行改进, 提出一种改进网格运动特征的方法, 提高了匹配的速度, 但也需要投影高频条纹, 并且精度受制于滤波的选择。而光流法已广泛应用于机器视觉中, 通过帧间图像变化, 即可计算出图像移动量, 特别适用于解决像素匹配问题。

本文提出一种基于光流法的扫描显微 PMP 方法, 将 PMP 与流水线上物体在线扫描测量场景相结合, 以物体移动替换条纹相移。通过交替条纹场与白场,

使得相机所采集的图像中, 条纹图和白场图均匀交替出现, 白场图像用于完成基于光流的像素匹配, 条纹图用于计算相位; 同时实验中采用显微系统实现远心光路成像, 并通过相位概率密度曲线来计算出准确的帧间相移量, 从而实现了高精度的扫描三维面形测量。

2 测量原理

2.1 扫描 PMP 测量原理

扫描 PMP 原理如图 1 所示, 通过显微系统的一条光路将正弦光栅投射到随生产线运动的待测物体表面, 包含了物体高度信息的条纹图像经由另一条光路被相机记录, 显微系统的远心光路特性使得物体移动过程中, 不同高度部分在相机所采集的图像中具有相同的像素移动量, 进而转换为相同的条纹相移量, 即已知像素移动量, 就能计算出相移量。

一般情况下静态 PMP 采集的 N 步相移条纹图 $I_n(x, y)$ 如下:

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \phi(x, y) + \delta_n \right],$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (1)$$

其中: $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为条纹调制度, p 为条纹周期, $\phi(x, y)$ 为物体的相位, δ_n 为 N 步等间隔相移量, (x, y) 为物体坐标。

而对于扫描 PMP 来说, 条纹图像的相移并不来自光栅的移动, 而是物体运动到不同位置被不同的条纹调制的结果。因此理想情况下, 不同时刻采集的经过物体高度调制的变形条纹图 $I'_n(x, y)$ 表示如下:

$$I'_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\frac{2\pi(x + \Delta x_n)}{p} + \phi(x, y) \right],$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (2)$$

其中: Δx_n 为像素移动量, 表示不同时刻物体相对起始位置的像素距离, 该像素移动量就对应着 PMP 相移量。若不同时刻图像中运动前后的物体已通过像素匹配精确对应, 并也已知准确相移量, 就能根据相移算法计算出截断相位。假设投影条纹均匀, 则不同帧

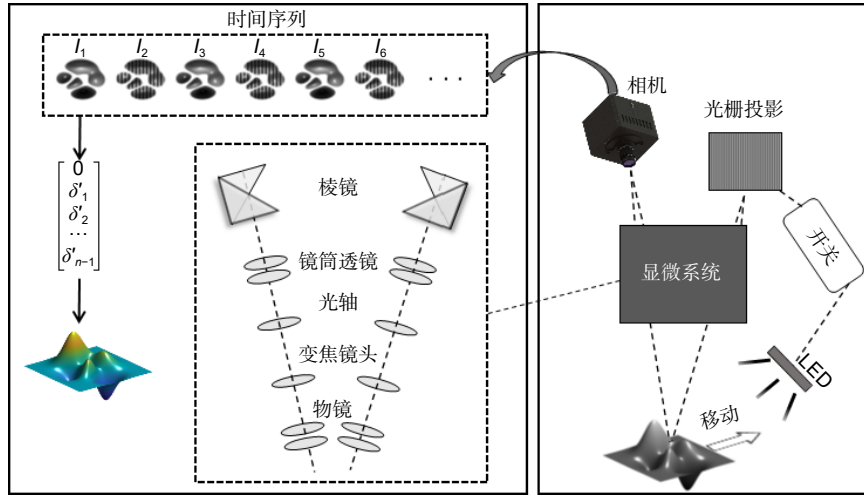


图 1 扫描 PMP 原理图

Fig. 1 The schematic of scanning PMP

间的相移量可表示为

$$\delta'_n = \frac{2\pi\Delta x_n}{p}, \quad (3)$$

其中: δ'_n 为 Δx_n 对应的相移量。进一步, 由于像素移动量与条纹周期通常不满足倍数关系, 使得参与计算的 N 帧图像通常不能构成准确的满周期相移, 因此选用任意 N 步相移公式计算截断相位。首先省略 (x, y) , 并将式 (2) 改写为

$$I'_n(x, y) = A + B \cos \delta'_n \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \phi(x, y) \right] - B \sin \delta'_n \sin \left[\frac{2\pi x}{p} + \phi(x, y) \right]. \quad (4)$$

再令 $B_c = B \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \phi(x, y) \right]$, $B_s = B \sin \left[\frac{2\pi x}{p} + \phi(x, y) \right]$, 则任意 N 步相位计算公式为

$$\begin{bmatrix} 1 & \cos 0 & -\sin 0 \\ 1 & \cos \delta'_1 & -\sin \delta'_1 \\ 1 & \cos \delta'_2 & -\sin \delta'_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos \delta'_{n-1} & -\sin \delta'_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B_c \\ B_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'_1(x, y) \\ I'_2(x, y) \\ I'_3(x, y) \\ \dots \\ I'_n(x, y) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\phi(x, y) = \arctan \left(\frac{B_s}{B_c} \right) - \frac{2\pi x}{p} = \arctan \left(\frac{B_s}{B_c} \right) - \phi_0(x, y). \quad (6)$$

然后展开得到连续相位, 标定相位高度映射关系, 即可恢复物体的三维面形。

2.2 基于光流法的像素匹配

如前所述, 要计算相位, 首先需要完成准确的像素匹配, 若直接基于 CCD 相机所采集对应的变形条纹图进行像素匹配, 条纹调制物体边缘提取效果差, 限制了像素匹配精度。而基于光流法的物体匹配, 已

在机器视觉中广泛应用, 因而若能增加白场图像, 利用无条纹的白场图像将有利于物体像素匹配。为此采用了交替采集图像方式, 即假定第 1、3、5 和 $2k-1$ 幅奇数图为白场图, 第 2、4、6 和 $2k$ 幅偶数图为条纹图, k 表示正整数。白场图通过关闭条纹投影光, 打开环境照明光实现。由于物体匀速移动的特性, 通过白场所得到的像素移动量可直接作为条纹图的像素移动量。

光流法假定图像序列中物体的运动引起的像素强度变化连续且一致, 即光流一致性假设 (optical flow consistency assumption, OFCA)^[19], 可表示为

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + 1), \quad (7)$$

其中: $I(x, y, t)$ 表示 t 时刻图像在位置 (x, y) 的像素强度, $(\Delta x, \Delta y)$ 表示在 $t+1$ 时刻像素的位移矢量。存在光流约束方程 (optical flow constraint equation, OFCE)^[19]:

$$\nabla I \cdot \mathbf{v}(x, y) + \frac{\partial I}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

其中: $\nabla I = \left[\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y} \right]^T$ 是图像在点 (x, y) 的梯度, \cdot 表示向量的点积, $\mathbf{v}(x, y)$ 表示在 (x, y) 点的位移矢量, 其 x 方向上的分量则对应扫描的像素距离 Δx , 而 Δy 仅在像素匹配中定位物体, 与相移方向垂直, 因此不带来相移。

由于 \mathbf{v} 包含两个方向未知数 Δx 和 Δy , 因此仅通过式 (8) 无法唯一确定。针对本文场景, 在远心光路中帧与帧之间物体的大小和灰度保持不变, 表现为整体平动, 满足 Lucas-Kanade 算法假设。因此选取一个大小为 $w \times w$ ($w > 2$) 的区域 Ω , 即可得到 w^2 个方程,

此时最小二乘法求解该超定方程即可得到 Δx 和 Δy 。LK 光流法中 Ω 区域的平方和为

$$\sum_{(x,y) \in \Omega} \left(\nabla \mathbf{I} \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial I}{\partial t} \right)^2. \quad (9)$$

可用最小二乘法得到其解:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{v} = \mathbf{A}^T \mathbf{b}, \quad (10)$$

其中: $\mathbf{A} = (\nabla \mathbf{I}(x_1, y_1), \dots, \nabla \mathbf{I}(x_w, y_w))^T$, $\mathbf{b} = -\left(\frac{\partial I(x_1, y_1)}{\partial t}, \dots, \frac{\partial I(x_w, y_w)}{\partial t} \right)^T$ 。

最终, 可以得到 \mathbf{v} 表达式如下:

$$\mathbf{v} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (11)$$

通过采集均匀白场得到用于光流匹配的图像, 通过线性插值算法可以获取亚像素精度级的运动矢量, 实现像素匹配, 抑制由物体位置匹配不准带来的测量误差。

2.3 基于概率密度函数的条纹周期计算

通过光流法实现了精确的物体像素匹配, 尽管各帧图像可能还存在 y 方向的像素移动量 Δy , 但考虑到 y 方向不引入条纹图相移, 因此仅需将所得像素移动量 Δx 转换为准确的相移量 δ_n , 即可根据相移算法计算出精确相位。由式 (3) 可知, 要计算相移量, 还需已知实际条纹周期 p 。系统标定时可得到初始周期 p_0 , 但需要优化得到精确值 p 。为此采用概率密度函数 (probability density function, PDF)^[20] 这一工具来实现条纹周期准确搜索: 先由 p_0 选择基本符合满周期的 N 幅图, 再预设一系列在 p_0 附近的条纹周期, 按式 (5) 和式 (6) 计算对应的截断相位, 进而得到对应的 PDF 曲线, 选择 RMSE 最小的 PDF 曲线对应的条纹周期作为实际条纹周期, 进而得到精确相移量。相位 PDF 曲线的计算方法如下:

第一步: 剔除无效区域。

第二步: 由于截断相位值范围为 $(-\pi, \pi)$, 将其均匀分为若干子区间 (本文分为 48 子区间), 统计每个子区间的像素个数, 所得每个子区间相位值频度即为 PDF 曲线。

为进一步说明 PDF 原理, 图 2(a) 给出了本文方法中, 不同周期 p , 基于扫描三幅图像所解得的截断相位 PDF 曲线。可以看出, 曲线不平整度与周期偏差呈正相关, 即周期偏差越小, PDF 曲线越平直, 因此可将 PDF 曲线的平整度作为依据, 判断条纹周期

是否准确。图 2(b) 则给出了标定得到的初始条纹周期和结果概率密度函数 PDF 搜索得到的最佳周期的 PDF 曲线差异, 采用接近满周期的 3 步扫描计算的结果。可以看到用标定得到的初始周期计算的 PDF 曲线中存在明显的非线性误差, 而搜索得到的结果大大降低了非线性误差, 得到了更准确的条纹周期。图 2(c) 为本系统基于周期偏差的 PDF 的 RMSE 曲线, 误差收敛在周期为 23.1 pixel 的点。与之对应, 图 2(d) 则给出了不同周期偏差下测量误差分布, 这里将静态的 12 步 PMP 为参考值, 计算 3 步扫描 PMP 测量结果的 RMSE。结果表明, 当设定条纹周期为 23.1 pixels 时误差最小, 约为 0.04 rad。为兼顾精确和计算效率, 我们进一步分析了以 0.01 pixel 作为条纹周期搜索间隔, 如图 2(d) 中子图所示, 可见以周期间隔为 0.1 pixel 就能满足相位计算精度。因此在实际的周期搜索过程中, 通过预设的一系列间隔为 0.1 pixel 的周期, 计算其 PDF 曲线, 将 PDF 的 RMSE 最小的条纹周期作为实际条纹周期。

本文方法通过白场得到不同图像间的运动矢量, 结合所提 PDF 方法计算出准确的条纹周期, 转换成准确的相移量。通过式 (3), 可将所有匹配后的 k 幅图像进行截断相位计算, 之后再展开得到连续相位, 结合标定的相位高度映射, 获得最终的三维面形。

3 实验结果与分析

本实验原理流程图如图 3 所示: 将不同时刻采集的白场图和条纹图按奇偶分组后:

第一步, 通过白场图光流法计算出图像间的像素移动量, 指导对应的条纹图做像素匹配。

第二步, 根据初始条纹周期值 p_0 , 选择接近满周期相移的 k 帧条纹图像。

第三步, 以 p_0 为中心选取一系列间隔为 0.1 pixels 的周期, 根据像素移动量并采用任意 N 步相移算法, 计算截断相位, 统计其概率密度分布, 选择 RMSE 值最小的截断相位对应的周期作为最佳周期 p , 由其所对应截断相位, 展开做相位高度映射, 即可获得准确的三维面形。

为了验证本文提出理论的可行性, 搭建实验装置验证如图 4 所示。

测量系统包括一个 CCD 相机 (IDS UI225xSE-M, 分辨率为 1600 pixel×1200 pixel), 一个投影仪 (GVD PDC03 分辨率为 1280 pixel×800 pixel, 投影仪投影单

帧固定条纹模拟物理光栅), 一个体视显微镜, 外加一个平移台 (PI M-406.62S) 和一个提供白场照明的光源 (显微镜自带)。测量物体为一枚硬币。平移台匀速地带着物体运动, 投影仪投影的光栅尽量垂直于平移台移动方向。

本文选择静态 12 步相移作为系统采集参考值。实验中交替采集条纹场和白场, 共获取 24 个不同时刻的位置图像, 其中变形条纹图和白场图各 12 幅。CCD 采集的白场图像, 选定一个有效区域, 通过光流法对一系列的白场图像追踪其像素匹配量。计算得到精确的像素匹配量 $(\Delta x_n, \Delta y_n)$ 之后, 将条纹图匹配并裁剪, 得到一系列的 I_k 。初步标定得到的条纹周期约为 22 pixel, 从中选取 10 幅 (前十幅图近似构成一个完整周期) 进行条纹周期的概率密度函数查找, 概率密度查找得到的周期为 23.1 pixel, 以此计算相移

矩阵。

表 1 为通过图 5(b) 白场光流得到的匹配量与相移量。由于平移台存在一定倾斜, 因此在 y 方向也存在需要匹配的量, 所有计算基于线性插值可以精确匹配到 0.1 pixel。由于 y 方向运动不带来相移, 因此计算相移量时仅需 x 方向匹配量计算。

图 6 为本文方法和静态测量的效果对比。可以看到, 由于本文使用了显微系统, 因此对硬币表面的微结构恢复得较为清楚, 可以清晰地分辨硬币上的字母细节。3 步的结果较差且存在明显周期性, 随着步数增加, 12 步扫描恢复的结果与静态非常靠近, 且基本不存在周期性误差。

图 6(a-c), 6(g-i) 为对美分硬币的不同位置进行测量的展开相位。图 6(c) 和图 6(g) 采用 12 步相移法测量静态美分作为检测的参考值。图 6(d-f), 6(j-l) 则为

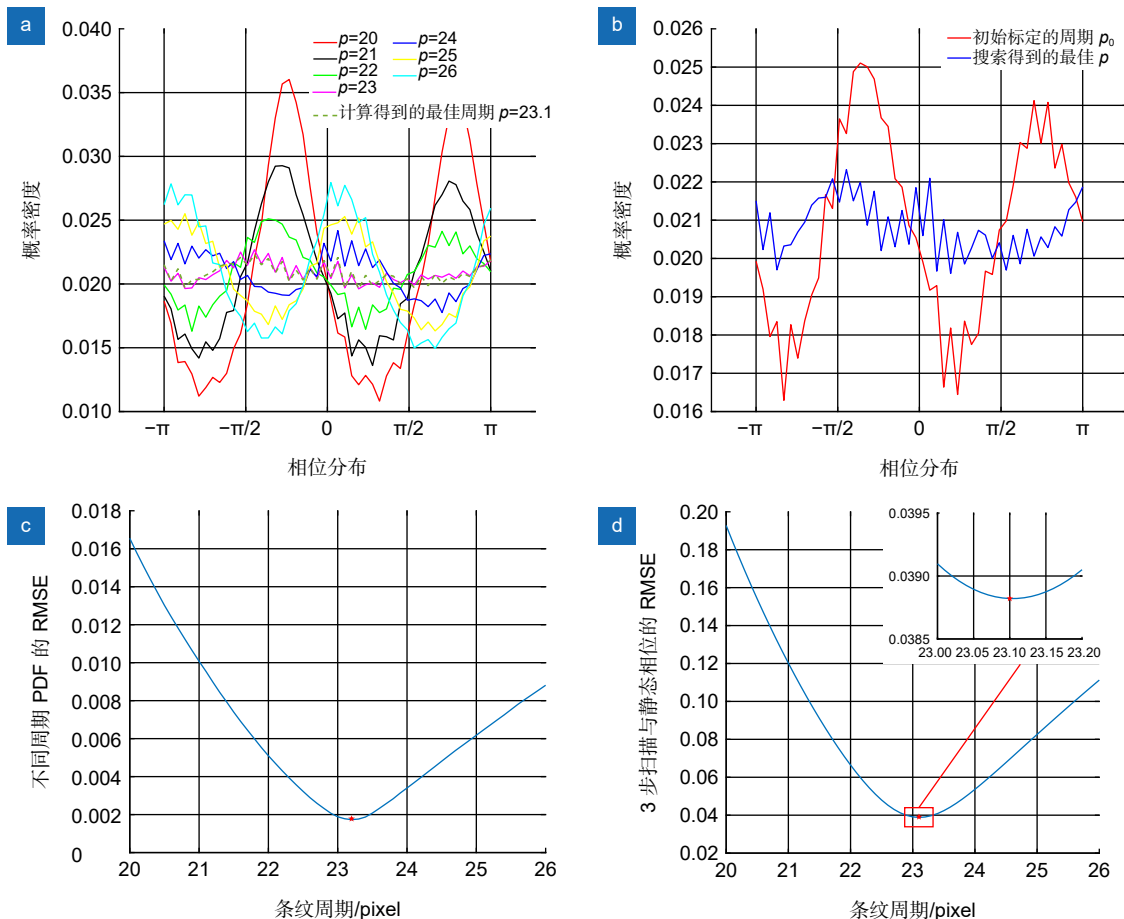


图 2 不同周期计算的截断相位 PDF 曲线及其 RMSE 曲线。(a) 不同周期计算的截断相位的概率密度分布; (b) 标定的初始周期和最佳周期计算的结果对比; (c) 不同周期计算结果的 RMSE 分布; (d) 不同周期计算的截断相位与静态 12 步相移的 RMSE

Fig. 2 PDF distribution with different phase shift errors and their error curves. (a) The PDF of the wrapped phase calculated at different periods; (b) Comparison of the results of the period of calibration and the optimal period calculation; (c) RMSE distribution of calculation results at different periods; (d) RMSE between wrapped phase and static 12-steps phase-shift calculated at different periods

表 1 光流法计算得到的匹配量与相移量

Table 1 The matching quantity and phase-shift quantity calculated by optical flow method

白场/第2k-1帧	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
匹配量/pixel	[0 0]	[2.4 0.1]	[4.6 0.1]	[7.2 0.2]	[9.4 0.2]	[11.6 0.2]	[14.2 0.2]	[16.5 0.2]	[18.7 0.2]	[21.3 0.3]	[23.5 0.3]	[25.8 0.3]
条纹场/第2k帧	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
相移量/rad	0	0.656	1.257	1.967	2.568	3.169	3.880	4.508	5.109	5.819	6.420	7.048

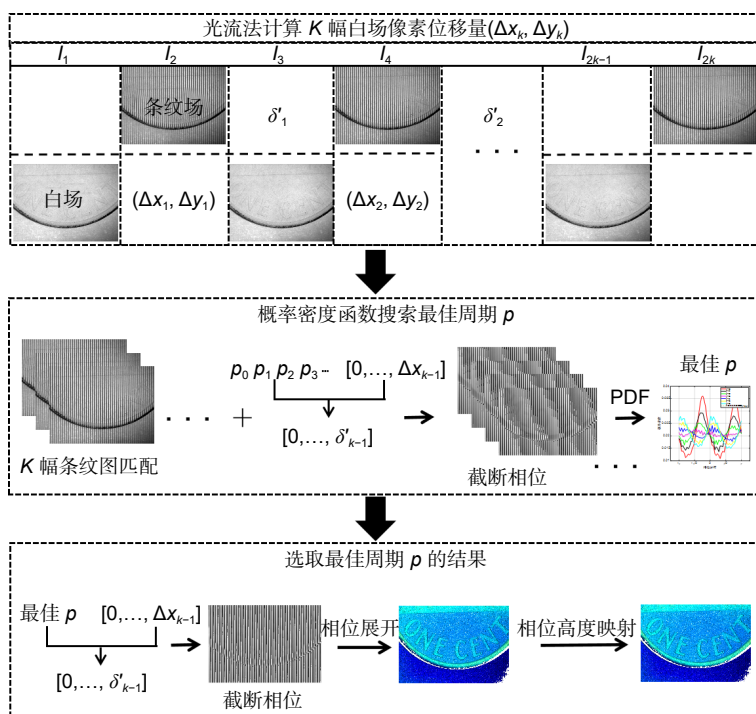


图 3 所提方法流程图

Fig. 3 Flowchart of the proposed method

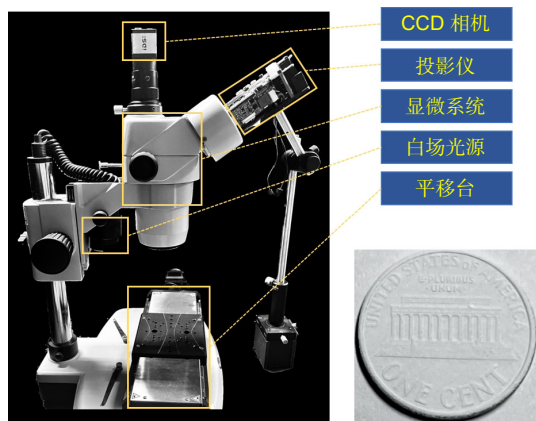


图 4 实验系统与待测对象

Fig. 4 The experimental system and object

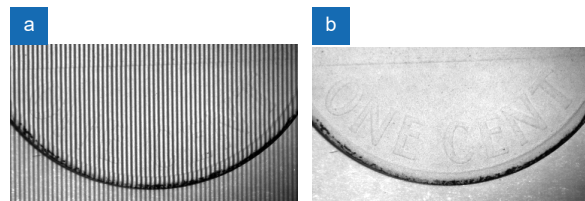


图 5 采集图像, (a) 条纹场; (b) 白场

Fig. 5 The fringe and the white field are collected

使用本文提出的扫描方法, 为了与静态统一, 选取静态的第一帧条纹位置为起始点, 运动中拍摄 12 个位置的条纹图。尽量同步速度使得 12 个位置能大致构

成一个有满周期的相移矩阵。选取第 2、8 和 16 三帧变形条纹图匹配后计算得到 3 步扫描的结果, 可以看出, 3 步扫描中存在显著的周期性误差量。该误差随着扫描图像数的增加逐渐减小。图 6(e) 和图 6(k) 为 6 步扫描的结果, 其周期性误差已经显著降低。图 6(f) 和图 6(l) 展示的 12 步扫描的结果已经基本和静态 PMP 的结果相当。图 6 的不同扫描步数条纹图像选择情况如表 2 所示。

其误差的对比图如下所示:

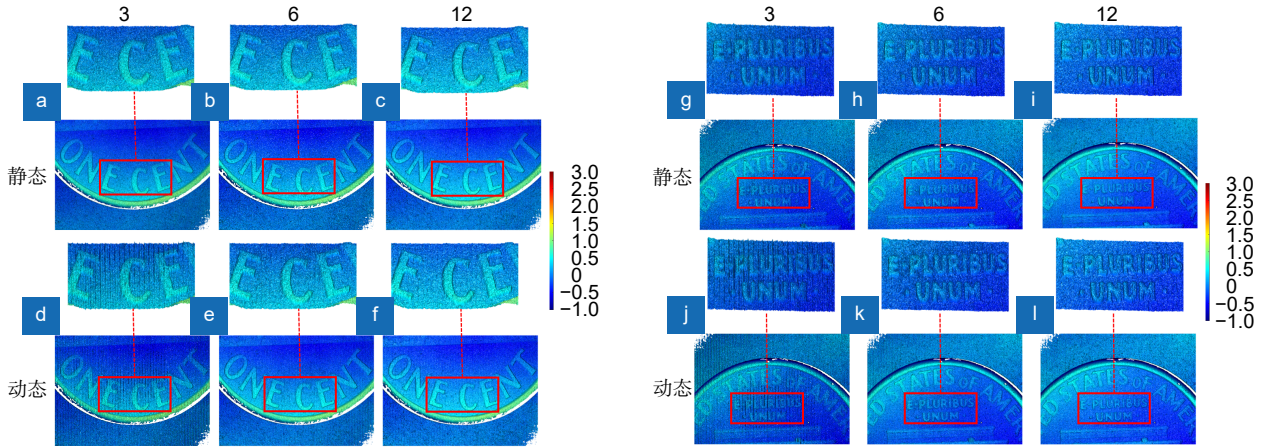


图 6 硬币测量结果。(a, g),(b, h),(c, i) 静态 3、6 和 12 步相移; (d, j) ,(e, k),(f, l) 所提方法 3、6 和 12 步扫描相移结果
 Fig. 6 The measurement result of a coin. (a, h),(b, i),(c, j)3, 6, 12-step of classic phase shift; (d, k),(e, l),(f, m) Proposed method 3, 6, 12-step scanning phase shift

表 2 不同步数扫描截断相位
 Table 2 RMSE of different steps scan wrapped phase

扫描步数	参与计算的图像序号	硬币位置1	硬币位置2
3步	2, 8, 16	0.0457	0.0386
6步	2, 4, 6, 10, 14, 18	0.0319	0.0289
12步	全部	0.0296	0.0262

其中硬币位置 1 为图 6(a) 所示, 硬币位置 2 为图 6(g) 所示。从 3 步到 12 步进行任意 N 步扫描的相位计算, 选取不同位置原则上按照尽可能的选取 12 幅位置中的满周期。如 5 步扫描选择图像为第 2、6、10、14 和 18 帧进行计算。图 7 表明了本文方法的收敛情况, 在 7 步开始趋于稳定。由于尽可能地使采集的图像经过一个完整的周期, 实际上在 11 幅图的位置已经移动 23.5 pixel, 超过一个条纹周期 23.1 pixel, 图像数量增长带来的精度提高有限, 且图像变多引起的匹配误差增加, 因此 11 步计算的误差甚至小于 12 步。

为了对本系统精度进行验证, 通过四平面标定, 选择了 0.4 mm、1.2 mm 和 2 mm 平面进行精度验证,

采用测量结果的均值 m 和均方根误差 RMSE 进行分析说明。如表 3 所示, m_1 和 $RMSE_1$ 为静态情况下 PMP 12 步测量的结果, m_2 和 $RMSE_2$ 为本文所提扫描方法测量的结果, 可以看到本文所提方法精度与非静态接近静态, 本系统达到了 0.008 mm 左右的精度, 具有较高的可靠性和精度。

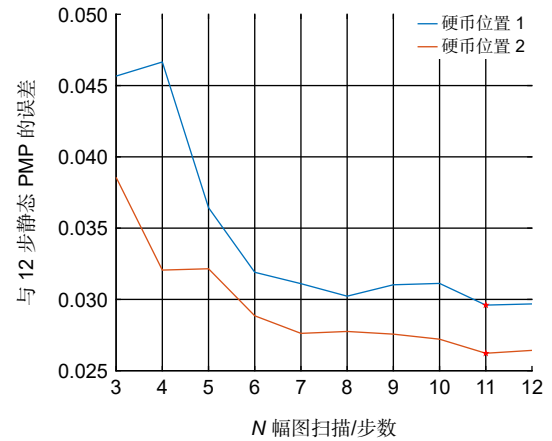


图 7 不同扫描步数与静态相移的相位误差
 Fig. 7 Phase error of different scanning steps and static phase shift

表 3 不同高度平面的误差分析
 Table 3 Error analysis of planes with different heights

	0.4 mm	1.2 mm	2 mm
m_1/mm	0.3973	1.2002	1.9936
m_2/mm	0.3967	1.1937	1.9907
$RMSE_1/mm$	0.0095	0.0099	0.0087
$RMSE_2/mm$	0.0120	0.0114	0.0116

4 结论

本文提出一种基于光流匹配的扫描 PMP 方法, 将 PMP 与流水线上物体的在线扫描测量场景相结合, 以物体移动替换条纹相移。通过交替条纹场与环境白场光, 使得相机所采集的图像中, 条纹图和白场图均匀交替出现, 白场图像用于完成基于光流的像素匹配, 条纹图用于计算相位; 同时实验中采用显微系统实现远心光路成像, 并通过相位概率密度曲线来计算出准确的不同帧之间的相移量, 从而实现高精度的扫描三维面形测量。选择合适的扫描步数, 对应采集图像移动位置, 接近满周期相移, 得到了与静态测量结果相近的结果。测量精度的 RMSE 达到了 0.008 mm 左右, 完成了面向流水线场景的显微高精度测量。

参考文献

- [1] Chu D Y, Zhang G H, Song R J, et al. Priori knowledge assisted dynamic 3D shape measurement with fringe projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(8): 210449.
楚冬娅, 张广汇, 宋仁杰, 等. 先验知识辅助的条纹投影动态三维形貌测量[J]. *光电工程*, 2022, **49**(8): 210449.
- [2] Xiang Z L, Zhang Q C, Wu Z J. 3D shape measurement and texture mapping method based on structured light projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(12): 220169.
向卓龙, 张启灿, 吴周杰. 结构光投影三维面形测量及纹理贴图方法[J]. *光电工程*, 2022, **49**(12): 220169.
- [3] Ying X L, Yao J Y, Zhang X S, et al. Fringe projection based three-dimensional measurement system by the light-source-stepping method using LD[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(11): 210298.
应晓霖, 姚建云, 张晓松, 等. 采用 LD 的光源步进条纹投影三维测量系统[J]. *光电工程*, 2021, **48**(11): 210298.
- [4] Shao J F, Ni Y B, Meng Z Z, et al. Three-dimensional shape measurement of composite surface based on defocused binary display and fringe projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(4): 240024.
邵金凤, 倪育博, 孟召宗, 等. 基于离焦二值显示和条纹投影的复合表面三维测量方法[J]. *光电工程*, 2024, **51**(4): 240024.
- [5] Peng Y F, He J K, Huang X P, et al. Ultra-precision grinding and polishing processing technology research and equipment development[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(4): 220097.
彭云峰, 何佳宽, 黄雪鹏, 等. 光学元件超精密磨抛加工技术研究与装备开发[J]. *光电工程*, 2023, **50**(4): 220097.
- [6] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Opt Lasers Eng*, 2001, **35**(5): 263–284.
- [7] Wu H T, Cao Y P, An H H, et al. Ultrafast spatial phase unwrapping algorithm with accurately correcting transient phase error[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(24): 6091–6094.
- [8] Wu K H, Wang W J. Detection method of obstacle for plant protection UAV based on structured light vision[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(4): 170613.
吴开华, 王文杰. 植保无人机结构光视觉的障碍物检测方法[J]. *光电工程*, 2018, **45**(4): 170613.
- [9] Dai Z X, Yang G H, Gao Y H, et al. Research on large displacement measurement method based on servo 3D vision[J]. *Acta Opt Sin*, 2024, **44**(19): 1912002.
戴子旭, 杨国辉, 高艺恒, 等. 基于随动三维视觉的大位移测量方法研究[J]. *光学学报*, 2024, **44**(19): 1912002.
- [10] Wang Q J, Liu Y K, Wei Z D, et al. Adaptive fringe projection algorithm based on region mapping for high-reflectivity surfaces[J]. *Laser J*, 2024, **45**(5): 34–40.
王启江, 刘元坤, 魏振东, 等. 面向高反物体的区域映射自适应条纹投影方法[J]. *激光杂志*, 2024, **45**(5): 34–40.
- [11] Zhai A P, Cao Y P, Huang Z F. On-line phase measuring profilometry based on a single frame of deformed pattern[J]. *Optik*, 2012, **123**(14): 1311–1315.
- [12] Wu H T, Cao Y P, Li Y, et al. Online three-dimension measurement based on improved grid motion statistical features[J]. *Acta Photonica Sin*, 2021, **50**(1): 0112002.
吴海涛, 曹益平, 李洋, 等. 基于改进网格运动统计特征的在线三维测量[J]. *光子学报*, 2021, **50**(1): 0112002.
- [13] Wu Y C, Cao Y P, Lu M T, et al. An on-line phase measuring profilometry based on modulation[J]. *Opt Appl*, 2012, **42**(1): 31–41.
- [14] Peng K, Cao Y P, Wu Y C, et al. On-line three-dimensional measurement method based on low modulation feature[J]. *Chin J Lasers*, 2013, **40**(7): 0708006.
彭旷, 曹益平, 武迎春, 等. 基于低调制度特征的在线三维测量方法[J]. *中国激光*, 2013, **40**(7): 0708006.
- [15] Zhang W X, Luo Y H, Liu Y Q, et al. Image super-resolution reconstruction based on active displacement imaging[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(1): 230290.
张文雪, 罗一涵, 刘雅卿, 等. 基于主动位移成像的图像超分辨率重建[J]. *光电工程*, 2024, **51**(1): 230290.
- [16] Yu R Z, Cao Y P. A three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP[J]. *Acta Photonica Sin*, 2008, **37**(6): 1139–1143.
喻睿智, 曹益平. 一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1139–1143.
- [17] Zheng X, Cao Y P, Li K. An on-line 3D measurement method based on modulation delamination[J]. *Acta Opt Sin*, 2010, **30**(9): 2573–2577.
郑旭, 曹益平, 李坤. 基于调制度层析的在线三维测量方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2573–2577.
- [18] Xu X F, Cao Y P, Peng K. Pixel matching method in on-line three-dimensional measurement based on phase prediction[J]. *Acta Opt Sin*, 2016, **36**(6): 0612005.
许幸芬, 曹益平, 彭旷. 基于相位预测的在线三维测量像素匹配方法[J]. *光学学报*, 2016, **36**(6): 0612005.

- [19] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [20] Liu Y K, Yu X, Xue J P, et al. A flexible phase error

compensation method based on probability distribution functions in phase measuring profilometry[J]. *Opt Laser Technol*, 2020, **129**: 106267.

作者简介



王思远 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学三维传感与机器视觉方面的研究。
E-mail: 2716514923@qq.com



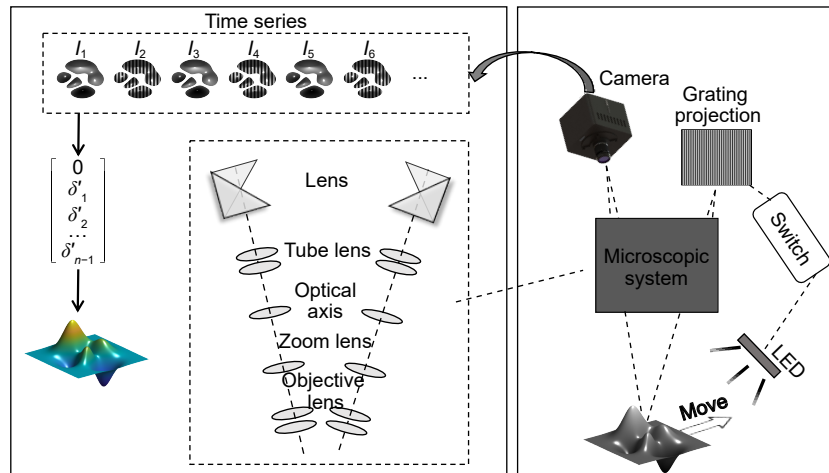
【通信作者】刘元坤 (1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学三维传感方面的研究。
E-mail: lyk@scu.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

A scanning micro phase measuring profilometry based on optical flow pixel matching

Wang Siyuan, Liu Yuankun*, Yu Xin



The schematic of the proposed scanning PMP

Overview: In recent years, fringe projection profilometry has emerged as a powerful tool for measuring and inspecting the three-dimensional (3D) morphology of objects. Among them, phase measurement profilometry (PMP) has garnered significant attention due to its high precision. Traditionally, at least three deformed fringe images are required for phase retrieval. To achieve higher precision, even more deformed fringe images are typically needed. In industrial applications, such as inspections on production lines where new samples continuously flow in and out, or to measure large samples with a set of small fields of views for high precision. This necessitates a motion scheme to complete the inspection process. Therefore, it will be promising to integrate the phase-shifting process of PMP with lateral motion. This type of lateral scanning process has been validated in white light interferometry and structured illumination microscopy. This paper proposes a scanning microscopic PMP that combines phase shifting with object translation, reducing measurement complexity and enhancing measurement efficiency. In this design, the measuring unit is fixed and the measuring object is moved along the translation stage. The camera is synchronized with the translation stage and the switching of the white light and structured light illuminations. Then sequential images will be captured with one deformed image and one white light image continuously. The phase drilling process consists of two main steps. The first step is pixel matching, which is used to align the images captured at different positions. The white light images are used to find the amount of pixel shift by optical flow methods, which can reach a sub-pixel level precision via linear interpolation. Then the pixel matching of the fringe images will be fulfilled while we assume the translation is consistent. The second step is to decipher the phase with these matched fringe images. Here, an arbitrary N -step phase-shifting technique is adopted instead of the classical N -step phase-shifting approach. Moreover, a telecentric optical path system is employed to ensure consistency between the actual object movement and pixel shift. The initial phase shift is determined by the offset pixels and the initially estimated fringe period, which is optimized through a probability density function. The experiments in this paper compare static and dynamic results, with the static position fixed as the starting point for dynamic measurements to ensure consistent comparison. The results demonstrate the feasibility of the proposed method, achieving measurement accuracy comparable to traditional PMP systems, with a maximum measurement accuracy of 0.008 mm in planar validation experiments.

Wang S Y, Liu Y K, Yu X. A scanning micro phase measuring profilometry based on optical flow pixel matching[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(11): 240194; DOI: [10.12086/oe.2024.240194](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240194)

Foundation item: Project supported by National Key Research and Development Program of China (2022YFF0712902)

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chendu, Sichuan 610065, China

* E-mail: lyk@scu.edu.cn