

DOI: 10.12382/bgxb.2025.0927



基于结构光的高速运动目标三维互补测量技术¹

邓文波¹, 孔筱芳^{1*}, 夏言¹, 弯港¹, 万敏杰^{2,3}, 罗红娥^{1**}

(1.南京理工大学 瞬态物理全国重点实验室, 江苏 南京 210094; 2.南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; 3.南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 高速动态目标的三维重建技术在军事领域被广泛应用, 针对高速运动目标三维重建中传统傅里叶变换轮廓术(Fourier Transform Profilometry, FTP)在目标边缘及破损区域因条纹混叠导致的相位解算失效问题, 提出一种以 FTP 重建主体面形为主、以双目交会补全边缘关键特征点空间坐标为辅的异构互补测量方法, 面向高速运动且可能存在局部破损的目标场景, 提升瞬态形貌测量中边缘尺寸的检测精度。构建多视角协同测量系统, 采用三台高分辨率相机捕捉高速运动目标; 目标主体形貌通过 FTP 技术重建, 边缘及破损区域通过双目交会原理解算其空间坐标; 采用奇异值分解算法实现双目点云与 FTP 数据的刚性配准。实验结果表明, 相较于传统 FTP 方法, 新方法将部分边缘特征点检测精度误差降低至 2% 以内, 验证了高速场景下高速目标形貌的测量稳定性。

关键词: 高速运动目标; 傅里叶变换; 双目交会; 三维重建; 奇异值分解

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2026)08-250927-XXX

3D Complementary Measurement for High-speed Moving Targets

Based on Structured Light

DENG Wenbo¹, KONG Xiaofang^{1*}, XIA Yan¹, WAN Gang¹, WAN Minjie^{2,3}, LUO Hong'e^{1**}

(1. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 2. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Visual Sensing and Intelligent Perception, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China.)

Abstract: The three-dimensional reconstruction technology for high-speed dynamic targets has been widely applied in the military field. The conventional Fourier transform profilometry (FTP) fails to resolve the phase due to fringe aliasing in the target edges and the damaged regions during the 3D reconstruction of high-speed moving targets. To address this issue, a heterogeneous complementary measurement method is proposed, which employs FTP as the primary means for reconstructing the main surface morphology and the binocular intersection as an auxiliary means for recovering the spatial coordinates of key edge feature points. The method is aimed to improve the detection accuracy of edge sizes in transient surface measurements for the high-speed moving targets with potential local damage. A multi-view cooperative measurement system which uses three high-resolution cameras to capture the high-speed moving target is established. The primary surface morphology of target reconstructed using FTP, and the spatial coordinates of edge and damaged areas are computed based on binocular vision principles. Rigid registration between the binocular point cloud and FTP data is achieved via the singular value decomposition (SVD) algorithm.

收稿日期: 2025-10-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62571245); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (62201260); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (30925020226、30924010941); 江苏省自主科研基金项目 (2025-JSS-LB-034-14); 重点实验室基金项目 (2024-CXPT-GF-JJ-095-10)

*通信作者邮箱: xiaofangkong@njust.edu.cn

**通信作者邮箱: luohe@njust.edu.cn

Experimental results demonstrate that, compared to traditional FTP method, the proposed method decreases the detection precision error of specific edge feature points to less than 2%. The results validate the robustness of the proposed method in high-speed scenarios.

Keywords: high-speed moving target; Fourier transform profilometry; binocular intersection; three-dimensional reconstruction; singular value decomposition

0 引言

在运动力学与弹道学所研究的动态过程中,高速运动目标的三维面形直接反映了其结构、形变及烧蚀等关键物理状态。因此,实现三维面形的瞬时精密测量,是相关科研与工程领域的核心需求。在此背景下,基于结构光照明的主动光学三维测量方法,为实现这一目标提供了高精度的有效解决方案。

常见的结构光三维测量方法包括傅里叶变换(Fourier Transform Profilometry, FTP)轮廓术^[1-2]、相移(Phase Shifting Profilometry, PSP)轮廓术^[3]、小波变换(Wavelet Transform Profilometry, WTP)轮廓术^[4-5]等。其中,FTP轮廓术通过相位计算、相位展开和相位高度映射等步骤可重建物体的三维形貌,该方法具有数据处理量小、测量速度快的优势,在高速动态测量方面蕴含巨大潜力。然而,传统FTP方法对物体表面的光学特征完整性要求较高,在高速运动导致的光学特征缺失区域(如边缘、破损处)极易发生相位解算失效,限制了其在高动态场景下的鲁棒性。

针对上述问题,研究者从两条路径进行了改进。第一条路径是优化FTP自身的相位提取与展开算法。2018年,Zuo等^[6]提出了微傅里叶变换(Micro Fourier Transform Profilometry, μ FTP)轮廓术,通过优化相位展开误差补偿算法,显著提升了相位恢复精度,但处理速度较慢。2023年,游前等^[7]结合改进Goldstein枝切法与Kuhn-Munkres算法消除了相位展开孤岛现象,但计算复杂度较高。2024年,Seok等^[8]提出一种基于FTP的单帧校准方法来提升结构光系统鲁棒性,但相位误差对最终结果的影响较大。2025年,邓烨欢等^[9]利用窗口FTP实现单帧绝对相位获取和离面高精度测量,但测量区域受限,仍难以应对非连续形貌。魏鹏飞等^[10]提出基于快速迭代滤波的三频彩色条纹投影方法,实现了高精度动态测量,但对高度突变、强反射表面相位提取效果不足。上述改进的核心仍依赖于条纹相位解算,当边缘区域条纹信息因视角差异或表

面破损而物理缺失时,算法层面的优化难以从根本上恢复该区域的三维信息。

第二条路径是将FTP与其他方法相融合,以减少相位解算误差。2019年,Qian等^[11]将FTP与PSP相融合,在运动区域使用FTP、在静止区域使用PSP,部分解决了动态精度下降问题,但运动区域精度仍低于静态PSP。2023年,Lai等^[12]提出二维经验模态分解+主成分分析(Bidimensional empirical mode decomposition & Principal component analysis, BEMD-PCA)方法用来处理频谱混叠与参考图依赖问题,但计算复杂且速度较慢。2024年,Wang^[13]提出通过线聚类方法检测和校正FTP边界相位错误,但处理流程复杂。Han等^[14]提出了“归一化FTP(Background-normalized Fourier Transform Profilometry)+改进型相位编码”融合方案,但主要适用于静态或低速场景。这些方法仍难以兼顾高速动态场景的精度与通用性。

与此同时,基于视差原理的双目交会测试技术为动态三维测量提供了另一条技术路径。双目交会测试技术是基于双目视觉原理的非接触式三维空间坐标测量方法^[15-16],利用相机从不同视角同步采集目标图像,通过图像匹配与几何解算获取目标的三维坐标信息。这一技术不依赖于相位的连续性,计算复杂度不高,理论上对局部条纹缺失问题具有天然的鲁棒性。

2010年,汤一平等^[17]基于双目全景视觉传感器验证了双目交会在海上动态场景的应用潜力。2023年,邓宏亮^[18]基于激光散斑实现了对高速运动轮轨的高精度双目三维重建。近年来,也有研究开始尝试结构光+立体视觉的融合策略^[19-21],以提高测量的完整性与精度,但这些方案中结构光处于辅助地位,双目视觉承担整体三维重建任务,例如皮金柱等^[19]采用RGB格雷码辅助双目匹配,张聪等^[21]利用PSP条纹投影为立体匹配提供纹理信息,实现了中低速动态场景下的三维测量。然而在高速运动场景下,稠密双目匹配面临计算量大、纹理稀疏区域易失配等问题,难以满足瞬态测量对实时性和可靠

性的要求。

为了实现高精度、高可靠性的动态三维测量需求, 本文提出基于结构光的高速运动目标三维互补测量方法, 通过构建多视角协同测量系统, 结合结构光投影与立体视觉成像, 在保留 FTP 轮廓术主体形貌重建优势的基础上, 利用双目交会仅对边缘关键特征点进行高精度坐标求解与补偿, 从而提高目标边缘部分特征点检测精度, 适用于高速运动且可能存在局部破损的目标场景。本文的创新点主要有:

1) 构建多视角三维测量系统, 采用三台电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)高分辨率相机以 120°夹角环绕布局, 由时序控制器同步触发, 结合条纹激光照明, 使任一边缘特征至少能够被两个视角同时观测, 保证高速运动目标在单帧曝光条件下仍可获得完整、同步的多视角条纹图像。

2) 引入双目交会技术, 针对表面破损及边缘条纹噪声区域, 仅提取关键边缘点空间坐标, 通过奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法建立与 FTP 点云之间的坐标映射关系, 实现对目标边缘关键尺寸的补偿与修正。

1 基本原理

1.1 FTP 轮廓术

FTP 轮廓术光路设计如图 1 所示。图 1 中, H 为待测物表面测量点, A 为该测量点对应的光线延长交点, B 、 C 、 D 分别为投影光线和成像光线与参考面的交点, d 为投影系统到 CCD 的横向距离, O 为 CCD 光轴与参考面的交点, L 为 CCD 系统成像中心 E_c 入瞳到参考面的距离, $E'_c E_c$ 和 $E'_p E_p$ 分别为成像系统与投影系统的光轴, θ 为二者之间的夹角, 二者相交于参考平面上的点 O , E' 为投影系统形成的参考面条纹像的等效像点, $h(x, y)$ 为待测物体表面相对于参考面的高度分布。参考平面作为测量物体表面高度变化的参照面, 与成像系统光轴 $E'_c E_c$ 垂直。光栅的栅线垂直于平面 $E_p E_c O$, 经投影系统投射至被测物体表面。

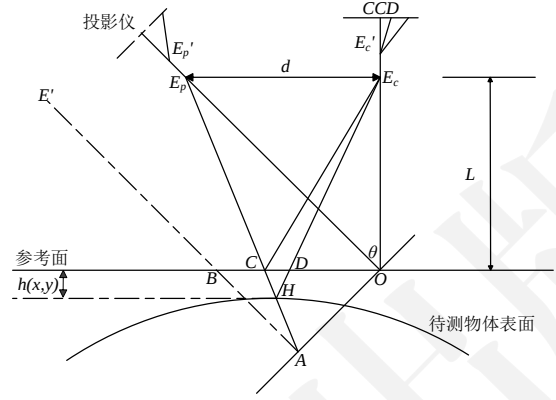


图 1 FTP 系统光路图

Fig. 1 Optical path figure of FTP system

相机获取的参考面条纹分布表达式为

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n r_0(x, y) \exp\{i[2\pi n f_0 x + n \varphi_0(x, y)]\} \quad (1)$$

式中: n 为傅里叶级数阶次; A_n 为傅里叶级数系数; $r_0(x, y)$ 为参考面的反射率; f_0 为光栅像的基频; $\varphi_0(x, y)$ 为参考面上的相位分布。

相机获取的待测物表面变形条纹分布表达式为

$$g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n r(x, y) \exp\{i[2\pi n f_0 x + n \varphi(x, y)]\} \quad (2)$$

式中: $r(x, y)$ 为待测物表面的反射率; $\varphi(x, y)$ 为由于待测物表面高度变化而引起的相位调制。对参考面条纹分布图和待测物表面变形条纹分布图进行 FTP 与频域滤波处理, 提取出包含待测物高度信息的基频分量, 经傅里叶逆变换后可得到包含相位信息的复数分量为

$$g'_0(x, y) = A_1 r_0(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \varphi_0(x, y)]\} \quad (3)$$

$$g'(x, y) = A_1 r(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)]\} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可以得到相位差为

$$\Delta\varphi(x, y) = \varphi(x, y) - \varphi_0(x, y) = 2\pi f_0 \overline{CD} \quad (5)$$

式中: $g'_0(x, y)$ 为经频域滤波和逆傅里叶变换后得到的参考面基频复数分量; $g'(x, y)$ 为待测物表面基频复数分量; $\Delta\varphi(x, y)$ 为待测物高度变化引起的相位差; $\overline{CD}$ 为因物体高度引起的参考平面上的条纹偏移量。

根据图 1 中的几何关系, 可得待测物高度信息为

$$h(x, y) = \frac{L \Delta\varphi(x, y)}{2\pi d f_0 + \Delta\varphi(x, y)} \quad (6)$$

显然,要想获得物体完整的高度信息,条纹必须是连续的,周期性的。

然而,在高速运动的环境下,目标表面面形存在破损,以及由于相机和投影系统存在视角差异,使得相机捕获的目标条纹图像边缘存在交叠区域,这些都会导致相位难以正确解算。根据式(6)可知,相位的错误解算会导致待测物高度信息计算产生误差。本文利用双目交会原理获得目标边缘数据,将边缘数据作为利用 FTP 方法高速运动目标的三维图像的补充,提高目标边缘部分特征点检测精度。

1.2 双目视觉原理

双目视觉原理示意图如图 2 所示。图 2 中, $O_w X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系, $o_1 x_1 y_1 z_1$ 为左相机坐标系, $O_1 X_1 Y_1$ 为左相机图像坐标系, $o_2 x_2 y_2 z_2$ 为右相机坐标系, $O_2 X_2 Y_2$ 为右相机图像坐标系, $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 为空间中的任意一点, $P_1(u_1, v_1)$ 和 $P_2(u_2, v_2)$ 分别为左右相机中的对应的成像点, R_l, t_l 为左相机转换到世界坐标系的旋转矩阵和平移向量, R_r, t_r 为右相机转换到世界坐标系的旋转矩阵和平移向量; R 为旋转矩阵, t 为平移向量, 是两个相机间的外参。

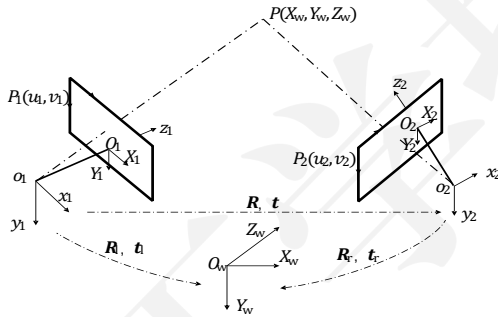


图 2 双目视觉原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of binocular vision

从而有如下关系成立:

$$\begin{cases} z_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx_1} & 0 & c_{x1} \\ 0 & \frac{1}{dy_1} & c_{y1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_l & t_l \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ z_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx_2} & 0 & c_{x2} \\ 0 & \frac{1}{dy_2} & c_{y2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_r & t_r \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} R_l & t_l \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_l & t_l \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中: dx_1 、 dy_1 为左相机水平和竖直方向径向畸变系数; dx_2 、 dy_2 为右相机水平和竖直方向径向畸变系数; f_1 、 f_2 为左右相机的焦距。

化简得到

$$\begin{cases} s_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = A_l \begin{bmatrix} R_l & t_l \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ s_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = A_r \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_l & t_l \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

式中: s_1 、 s_2 为分别为左右相机成像过程中的尺度因子; A_l 与 A_r 为左右相机的内参, 这些参数可通过标定得到。

假设左相机坐标系是世界坐标系的位置, 则此时左相机坐标系到世界坐标系的旋转矩阵 $R_l = I$ 为单位矩阵, 平移向量 $t_l = 0$ 。式(8)再次经过化简, 可得

$$\begin{cases} s_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = A_l \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ s_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = A_r \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

化简式(9), 如式(10)所示。

$$\begin{cases} s_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ s_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

式中： m_{ij}^1 和 m_{ij}^2 分别为左相机和右相机投影矩阵的元素， $i=1,2,3$ ， $j=1,2,3,4$ 。

通过最小二乘法求解式(10)，即可求出 P 的三维点坐标 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 。

2 高速运动目标三维互补测量方法

在利用双目视觉原理获得高速运动目标边缘数据后，需要将这些数据进行坐标变换，统一到利用 FTP 方法得到的数据的坐标系下。

为实现坐标系统一，本文选取目标空间分布满足非共线约束的 3 个特征点：头部特征点（弹头）、尾部特征点（弹尾截面边缘取两点，其连线与弹轴垂直），这 3 个点均为弹丸轮廓上曲率变化显著的几何突变点，具有较高的视觉显著性和定位确定性。如图 3 所示。

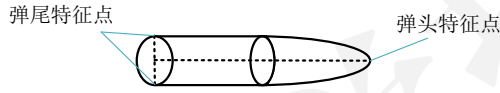


图 3 弹丸特征点图

Fig. 3 Feature points on the projectile

定义双目相机坐标系下的特征点集为

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \quad i=1,2,3 \quad (11)$$

通过 FTP 方法得到弹丸三维图像后，得到对应点在 FTP 三维坐标系下的点集为

$$P'_i = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix}, \quad i=1,2,3 \quad (12)$$

采用基于奇异值分解的最小二乘配准方法^[22]求解刚体变换矩阵，该方法通过最小化对应点集的加权残差平方和实现：

$$(\mathbf{R}_{\text{svd}}, \mathbf{t}_{\text{svd}}) = \arg \min_{\mathbf{R}_{\text{svd}} \in \text{SO}(3), \mathbf{t}_{\text{svd}} \in \mathbb{R}^3} \sum_{i=1}^3 \|(\mathbf{R}_{\text{svd}} \cdot P_i + \mathbf{t}_{\text{svd}}) - P'_i\|^2 \quad (13)$$

式中： $P=\{P_i\}$ 和 $P'=\{P'_i\}$ 分别为双目坐标系和

FTP 坐标系下的对应点集， $\mathbf{R}_{\text{svd}}$ 、 $\mathbf{t}_{\text{svd}}$ 为使点从双目坐标系变换到 FTP 三维坐标系的旋转矩阵和平移向量。求解得到 $\mathbf{R}_{\text{svd}}$ 和 $\mathbf{t}_{\text{svd}}$ 后将所有双目点经过以下刚体变换后映射至 FTP 三维坐标系下，实现坐标系统一。

$$P' = \mathbf{R}_{\text{svd}} \cdot P + \mathbf{t}_{\text{svd}} \quad (14)$$

3 实验结果与分析

3.1 实验布设

使用不同规格的高速运动弹丸作为实验对象，参数如表 1 所示。搭建高速运动目标三维面形多视角测量系统。多视角测量系统包括 3 个型号相同的 CCD 高分辨率数字相机、时序控制器、脉冲激光器、光栅投影装置、正六面体总体支架、转接支架，如图 4 所示。其中正六面体总体支架由 6 根长度一致的金属杆通过角件以螺栓紧固连接，构成标准正六面体框架，在 3 个间隔面的中心位置设有安装基板，安装基板上预先加工有多个均匀分布的安装孔，每台 CCD 高分辨率数字相机通过转接支架与安装基板连接，三台相机呈 120° 环形布局，相机参数如表 2 所示，脉冲激光器参数如表 3 所示。构建 25-26、26-27 两对双目坐标系（标注格式 a-b 为双目视觉坐标系命名规则，连接符“-”仅用于分隔组成双目测量系统的两台相机编号，26-27 坐标系为 26 号、27 号相机构成的双目坐标系）和由 FTP 方法得到的数据所在的世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ ，示意图如图 5 所示。

表 1 弹丸参数

弹丸种类	弹丸长度/mm	弹尾直径/mm	瞬时速度/(m·s ⁻¹)
7.62 mm 弹丸	26.80	7.92	734.59~736.22
12.7 mm 弹丸	64.60	13.01	762.16~795.68

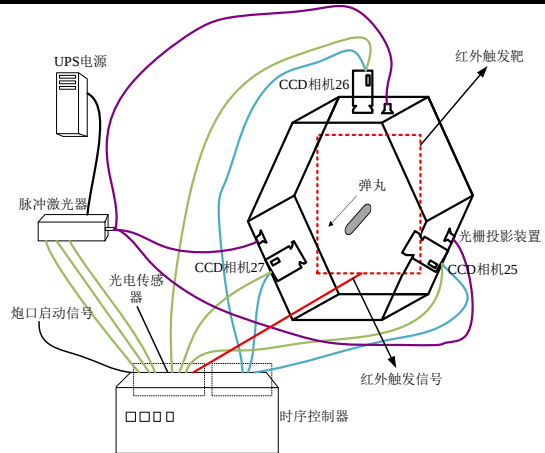


图 4 系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the system

表 2 高分辨率相机主要参数
Table 2 Main parameters of high-resolution camera

参数	数值
分辨率	9 344×7 000
像元尺寸/ μm	3.2×3.2
焦距/mm	50
动态范围/dB	66
信噪比/dB	40
帧频/(帧·s ⁻¹)	17.2
曝光时间/ μs	18

表 3 脉冲激光器主要参数
Table 3 Main parameters of pulse laser

参数	数值
工作波长/nm	532
脉冲半宽度/ns	20
脉冲功率/mJ	50

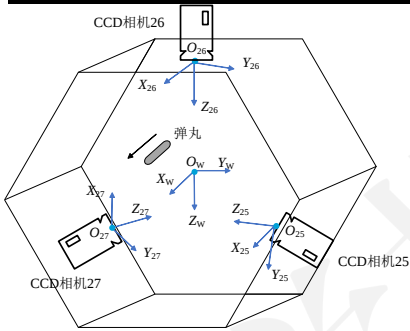


图 5 系统坐标系构建示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the system coordinate frame construction

当高速运动弹丸穿过红外触发靶时，会产生一个电信号传输到时序控制器，经过一个固定延时后，弹丸到达正六边形框架中心，时序控制器会产生两路触发信号，一路触发信号同时

触发 3 个相机，另一路触发信号启动激光器产生输出脉宽为 20 ns 脉冲激光。系统采用时序控制器进行统一触发，其时间控精度为 50 ns。对于飞行速度约 800 m/s 的高速弹丸，同步误差所对应的空间偏差约为 0.04 mm，因此可以认为三台相机与激光器之间实现了严格同步。激光脉冲经一进三出导光光纤传输后，分别导入 3 个 20 lp/mm 光栅投影装置，产生照明整个照相视场的结构光。条纹分布的照明光投射到照相视场中的飞行体表面上，由于成像主要由 20 ns 脉冲激光决定，弹丸在有效成像时间内的位移仅约 0.02 mm，对应图像上的运动模糊不超过 0.1 个像素，可忽略不计。因此相机可捕捉得到多个视角下清晰的高速运动弹丸条纹图像。

3.2 相机标定

使用单个方格大小为 25 mm×25 mm 的棋盘格进行标定，相机两两组合对同一棋盘格进行同时拍摄，通过改变棋盘格的姿态和位置，共拍摄了 18 组不同姿态和位置的标定图片，并使用双目相机标定工具对标定图片进行角点检测和参数计算，得到 3 个相机的内参矩阵、相机两两之间的外参矩阵，如表 4、表 5 所示。其中， $Cam_{25,26}$ 表示相机 26 相对于相机 25 的外参， $Cam_{26,27}$ 表示相机 27 相对于相机 26 的外参。

表 4 相机外部参数矩阵
Table 4 Camera extrinsic parameter matrix

外参	旋转矩阵 R	平移向量 t
$Cam_{25,26}$	$\begin{bmatrix} 1.00 & 0.01 & 0.01 \\ 0.02 & -0.48 & -0.88 \\ -0.01 & 0.88 & -0.48 \end{bmatrix}$	$[-6.03, 469.05, 760.79]^T$
$Cam_{26,27}$	$\begin{bmatrix} 1.00 & -0.003 & 0.002 \\ -0.0002 & -0.51 & -0.86 \\ 0.004 & 0.86 & -0.51 \end{bmatrix}$	$[-4.39, 456.02, 759.84]^T$

表 5 相机内部参数矩阵
Table 5 Camera intrinsic parameter matrix

相机 25	相机 26	相机 27
$\begin{bmatrix} 11815.92 & 0 & 4668.16 \\ 0 & 11809.42 & 3540.31 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 11844.85 & 0 & 4746.94 \\ 0 & 11846.75 & 3457.08 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 11848.15 & 0 & 4707.28 \\ 0 & 11860.98 & 3586.55 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

3.3 FTP 与双目交会测量

运行多视角测量系统，获取弹丸 3 个视角上的条纹分布图像，如图 6 所示。利用 FTP 方法得到弹丸三维重建图像。



(a) 相机 25 (b) 相机 26 (c) 相机 27
(a) Camera 25 (b) Camera 26 (c) Camera 27
图 6 条纹分布图

Fig. 6 Fringe pattern diagram

为了获取弹丸边缘的三维坐标，并为后续作为 FTP 在轮廓区域的异常数据的补充提供高精度空间基准，在相机 26 拍摄的弹丸条纹图像上，沿弹丸轮廓均匀标注 11 个特征点（记为点 1~11），记录其像素坐标。由于三相机呈 120°环

形布局，同一物理点在不同相机视图中的投影位置沿弹丸高度方向存在偏移：相机 25 的弹丸上边缘投影对应相机 26 的特征点 6~11，其编号

设为 6'~11'；相机 27 的弹丸上边缘投影对应相机 26 的特征点 1~5，其编号设为 1'~5'，弹丸边缘编号结果如图 7 所示。

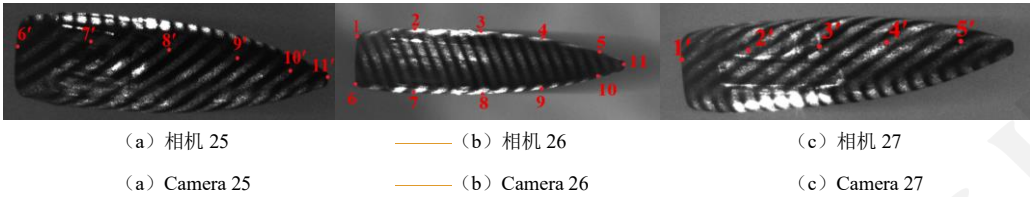


图 7 弹丸边缘编号

Fig. 7 Projectile edge number

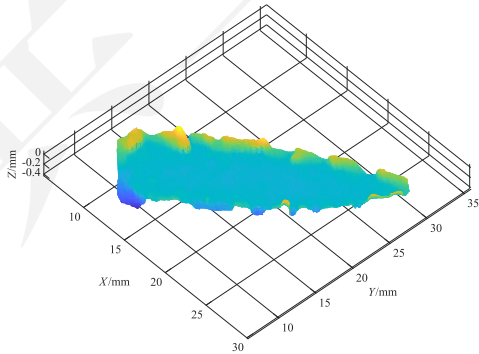
应用双目视觉原理，分别计算点 1~5 在 26-27 坐标系下和点 6~11 在 25-26 坐标系下的空间坐标，并通过坐标变换，将点 1~5 统一到 25-26 坐标系下。计算 1 点和 6 点的中心点坐标，记

为弹尾，用于计算弹丸长度。最终得到 1~11 点、弹尾在 25-26 坐标系下的空间坐标，这些坐标即为弹丸条纹图像的边缘数据。边缘特征点空间坐标及坐标系统一结果如表 6 所示。

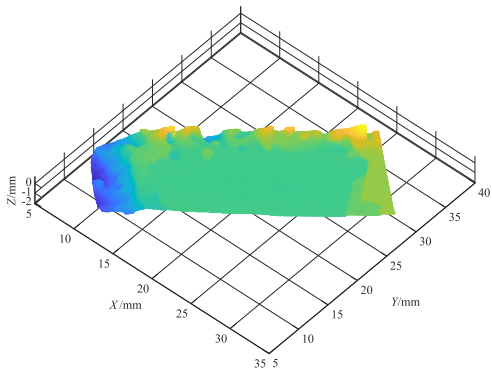
表 6 边缘特征点空间坐标及坐标系统一结果

Table 6 Spatial coordinates of edge feature points and coordinate system unified results mm			
点号	初始坐标系	初始坐标 (X,Y,Z)	25-26 坐标系坐标 (X,Y,Z)
1	26-27 坐标系	(-28.77,10.52,479.39)	(-29.79,-27.69,536.94)
2		(-25.33,9.63,480.35)	(-26.37,-26.37,537.31)
3		(16.72,9.93,480.66)	(-17.76,-26.11,537.01)
4		(-10.80,10.79,480.38)	(-11.82,-26.69,536.48)
5		(-4.58,12.72,479.03)	(-5.55,-28.71,535.52)
6	25-26 坐标系	(-28.83,-31.56,532.59)	(-28.83,-31.56,532.59)
7		(-25.02,-31.23,531.01)	(-25.02,-31.23,531.01)
8		(-15.96,-30.99,530.85)	(-15.96,-30.99,530.85)
9		(-10.05,-30.33,531.21)	(-10.05,-30.33,531.21)
10		(-4.45,-28.97,532.54)	(-4.45,-28.97,532.54)
11		(-2.38,-28.12,533.58)	(-2.38,-28.12,533.58)
弹尾		(-29.31,-29.62,534.76)	(-29.31,-29.62,534.76)

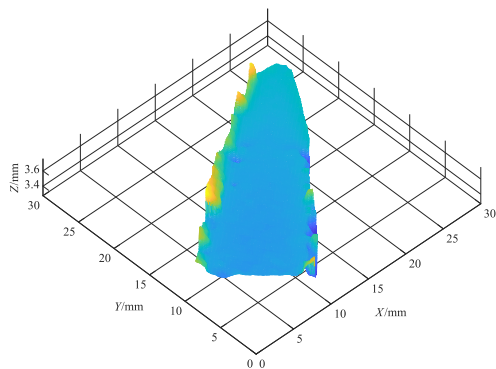
加载 FTP 相位测量重建的弹丸表面三维点云，得到的弹丸重构图像如图 8 所示。由图 8 可以看到中心区域点云连续，条纹解析度高，但边缘存在噪声，表明 FTP 在边缘的相位解算存在误差，精度下降。



(a) 7.62 mm 弹丸边缘噪声图
(a) Edge noise of 7.62 mm projectile



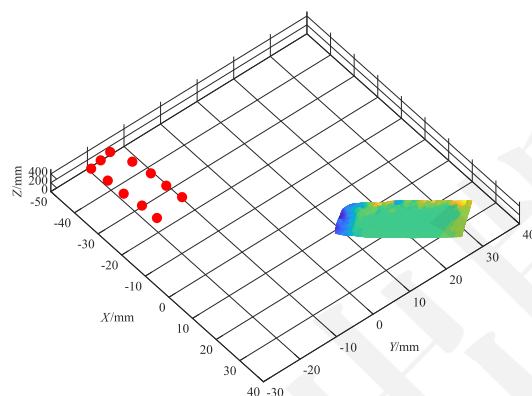
(b) 12.7 mm 弹丸左半边边缘噪声图
(b) Edge noise of the left side of 12.7 mm projectile



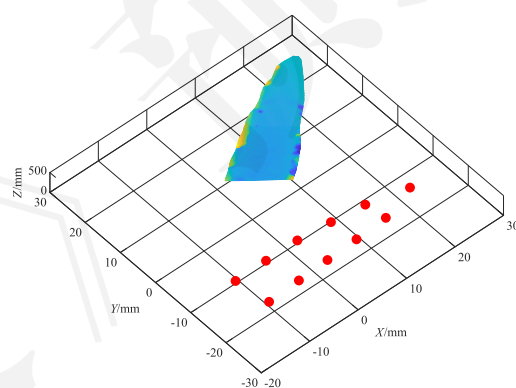
(c) 12.7 mm 弹丸右半边边缘噪声图
(c) Edge noise of the right side of 12.7 mm projectile
图 8 弹丸边缘噪声图

Fig. 8 Edge noise of projectile

将弹丸条纹图像的双目边缘数据导入并以红色实心圆点作为标记，如图 9 所示。由图 9 可知，由于双目与 FTP 数据存在坐标系未对齐问题，空间分布呈现显著偏差。利用奇异值分解方法将用双目视觉原理计算得到的点对齐到 FTP 点云的刚性变换矩阵，用双目视觉原理计算得到的点经过该变换后映射至傅里叶坐标系下，实现坐标系统一。最终的图像如图 10 所示。由图 10 可以看出，双目边缘数据基本贴合 FTP 所得图像边缘，可用双目数据作为 FTP 边缘数据的补充。



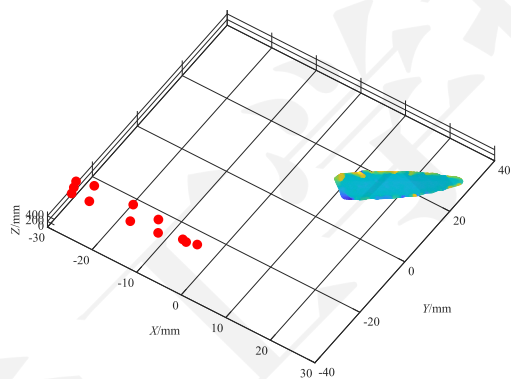
(b) 12.7 mm 弹丸左半导入双目数据图
(b) Importing binocular data of the left side of 12.7 mm projectile



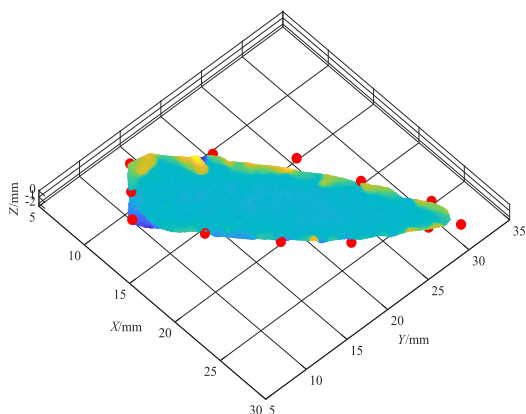
(c) 12.7 mm 弹丸右半导入双目数据图
(c) Importing binocular data of the right side of 12.7 mm projectile

图 9 导入双目数据后图像

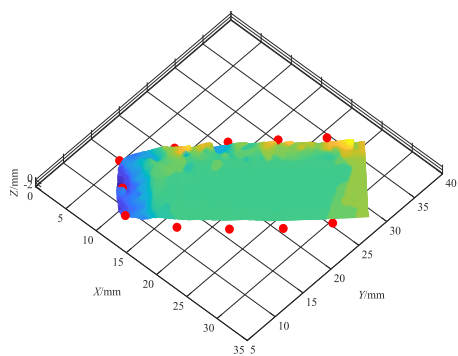
Fig. 9 Visualization after importing binocular data



(a) 7.62 mm 弹丸导入双目数据图
(a) Importing binocular data of 7.62 mm projectile

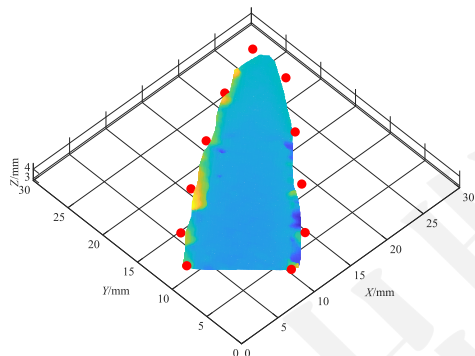


(a) 7.62 mm 弹丸数据贴合图
(a) Fused data diagram of 7.62 mm projectile



(b)12.7 mm 弹丸左半弹丸数据贴合图

(b) Fused data diagram of the left side of 12.7 mm projectile



(c)12.7 mm 弹丸右半弹丸数据贴合图

(c) Fused data diagram of the right side of 12.7 mm projectile

图 10 弹丸数据贴合图

Fig. 10 Fused data diagram

为验证双目边缘特征点补充测量的有效性，将基于 FTP 点云得到的弹丸长度、弹尾直径，与基于双目特征点计算得到的对应尺寸进行对比。实验结果如表 7、表 8 所示。由表 7、表 8 可知，互补方法在不同类型弹丸的三维测量中均展现出显著的精度提升，最终测量误差保持在 2%以内。

表 7 7.62 mm 弹丸三维测量误差

Table 7 Quantitative analysis of 3D measurement error for 7.62 mm projectiles

方法	长度/mm	长度相对误差/%	弹尾直径/mm	弹尾直径相对误差/%
纯像素提取	27.35	2.06	7.62	3.77
FTP	26.42	1.40	7.61	3.95
WTP	26.51	1.08	8.22	3.75
互补方法	26.99	0.72	8.06	1.82

表 8 12.7 mm 弹丸三维测量误差

Table 8 Quantitative analysis of 3D measurement error for 12.7 mm projectiles

方法	长度/mm	长度相对误差/%	弹尾直径/mm	弹尾直径相对误差/%
纯像素提取	72.54	12.29	14.49	11.35
FTP	58.38	9.63	11.61	10.72
WTP	59.24	8.30	12.40	4.67
互补方法	64.28	0.50	13.25	1.83

由于当前方法采用人工标注弹头及弹尾关键点，特征点提取误差会对后续双目交会及 SVD 配准产生影响。为评估该影响，

本文对所选特征点分别施加 ± 1 px 与 ± 2 px 的人为扰动，并重新计算配准后的长度和弹尾直径，如表 9 所示。

表 9 扰动影响

Table 9 Perturbation effect

扰动特征点	扰动大小/px	弹丸长度误差变化范围/mm	弹尾直径误差变化范围/mm
弹头点	± 1	0.05	0
弹头点	± 2	0.1	0
弹尾点	± 1	0.02~0.03	0.03~0.06

由表 9 可知,在 ± 1 px 范围内,长度与尾径误差变化均较小,表明本文方法对少量人工选点误差具有一定鲁棒性。当扰动增大至 ± 2 px 时,弹头点误差主要影响长度测量,而弹尾点误差主要影响弹尾直径测量。

综上,相较于传统 FTP 技术,互补方法展现出对弹丸关键尺寸的精准捕获能力,尤其在轴向长度检测维度表现出卓越的稳定性,提高了由边缘特征点得到的关键尺寸精度,为高速运动目标的精密测量提供了新的技术方案。

3.4 系统误差分析

本文测量系统的最终精度受多种误差源的综合影响,以下对主要误差源进行简要分析。

1)相机标定残差。相机内外参数的标定精度直接影响双目交会的三维坐标解算结果。标定残差将传递至双目交会计算,导致边缘特征点的三维坐标产生系统性偏移。根据表 9 的扰动分析, ± 1 px 的像素级误差对弹丸长度的影响约为 0.05 mm,对弹尾直径的影响约为 0.03~0.06 mm,表明系统对标定残差具有一定的容忍度。

2)光线散射与杂散光。脉冲激光经光栅投影后在弹丸表面形成结构光条纹,弹丸表面的镜面反射可能引起局部光强异常,降低条纹对比度,影响 FTP 相位提取精度,尤其在弹丸边缘区域更为显著。本文通过采用窄脉宽(20 ns)激光照明和环境光抑制措施,在一定程度上缓解了该问题。

3)振动与机械稳定性。弹丸发射时产生的冲击波和振动可能导致相机支架发生微小位移,进而影响标定参数的有效性。本系统采用正六面体金属框架通过螺栓紧固连接,具有较高的结构刚度。由于成像由纳秒级脉冲激光完成,振动在单帧曝光时间内引起的相机位移极小,对测量结果的影响有限。

综上所述,在现有实验条件下,标定残差和光线散射是影响测量精度的主要因素,而振动的影响在可控范围内。

4 结论

本文提出了一种基于 FTP 轮廓术和双

目交会的高速运动目标瞬态三维重构方法。得出如下主要结论:

1)通过双目视觉数据作为 FTP 方法获得的目标三维图像边缘数据的补充,成功将部分边缘特征点检测精度误差降低至 2%以内,显著提高了弹丸边缘区域的测量精度。

2)基于三相机 120°环形布局,构建多视角测量系统,系统在高速环境下有效地采集到目标的变形条纹图像,并利用 FTP 方法有效地实现了高速运动目标三维轮廓测量,为弹道分析、振动监测等工程场景提供高可靠性三维重建方案。

3)针对 FTP 方法在目标边缘及局部破损区域存在相位解算失效的问题,利用双目交会获取边缘关键特征点空间坐标,并通过 SVD 方法实现双目数据与 FTP 点云的坐标统一,实现了两种方法的优势互补。

4)通过不同规格弹丸的实验验证了方法的有效性,结果表明该方法在高速动态条件下能够稳定获取目标瞬态三维形貌,为高速运动目标非接触式三维重构提供了新的技术方案。

本文通过将 FTP 轮廓术与双目视觉原理相结合,实现了对高速运动目标的三维重建。然而,本文工作仍存在一定的局限性,主要体现在以下两个方面:

1)当前边缘关键点需人工标注,算法实时性不足,精度不够。当目标表面纹理发生变化时,人工选点易遗漏真实边缘或产生定位偏差。未来将探索基于强化学习的特征点动态提取算法,提高效率。

2)当前研究对象均为规则圆柱形结构,对于破片、异形弹药等非对称及复杂纹理高速目标的适用性尚缺乏充分验证,可能因目标形态差异导致测量误差。未来将扩展实验对象与场景条件,验证互补方法在各类目标上的普适性。

通过上述研究方向的扩展,期望能够进一步完善高速运动目标三维重建方法,为瞬态形貌精密测量领域提供更可靠和高效的解决方案。

参考文献 (References)

- [1] 陈星宇,白星,余展,等. 高效的基于傅里叶单像素成像的亚像素级边缘检测技术[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(4):26-33.
CHEN X Y, BAI X, YU Z, et al. Efficient sub-pixel edge detection technique based on Fourier single-pixel imaging[J]. Optics & Optoelectronic Technology,2023,21(4):26-33. (in Chinese)
- [2] XU Y Z, YANG J F, DONG Y Q, et al. Direct fringe projection profilometry based on the spatial frequency distribution function in optical 3D imaging[J].Optics & Laser Technology,2024,174:110695.
- [3] VINNICHENKO N A, PUSHTAEV A V, RUDENKO Y K, et al. Background-oriented schlieren with image processing based on phase-shifting profilometry[J]. Experiments in Fluids, 2025,66(3):47.
- [4] HAN M Q, CHEN W J. Dual-angle rotation two-dimensional wavelet transform profilometry [J]. Optics Letters,2022,47(6):1395-1398.
- [5] 张瑞华, 祁媛, 姚文军. 空间频率估计在傅里叶变换轮廓术中的应用[J]. 南通职业大学学报,2023,37(2):76-80.
ZHANG R H, QI Y, YAO W J. Application of spatial frequency estimation in fourier transform profilometry[J]. Journal of Nantong Vocational University,2023,37(2):76-80. (in Chinese)
- [6] ZUO C, TAO T Y, FENG S J, et al. Micro fourier transform profilometry(μ FTP): 3D shape measurement at 10,000 frames per second[J]. Optics and Lasers in Engineering,2018,102:70-91.
- [7] 游前, 翁慧, 赵江, 等. 基于改进 Goldstein 枝切法的傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2023, 43(5):78-87.
YOU Q, WENG H, ZHAO J, et al. Fourier transform profilometry based on improved goldstein branch-cut algorithm[J]. Acta Optica Sinica,2023,43(5):78-87. (in Chinese)
- [8] SEOK J H, AN Y T, HYUN J S. Single-shot calibration method based on Fourier transform profilometry[J]. Optics Letters, 2024, 49(17):4987-4990.
- [9] 邓烨欢, 陈文静, 张启灿. 基于窗口傅里叶变换的圆形条纹投影轮廓术[J]. 光学与光电技术,2025,23(1):67-78.
DENG Y H, CHEN W J, ZHANG Q C. Circular fringe projection profilometry based on windowed fourier transform[J]. Optics & Optoelectronic Technology,2025,23(1):67-78. (in Chinese)
- [10] 魏鹏飞, 杜虎兵, 朱倩, 等. 基于快速迭代滤波的单帧彩色条纹投影轮廓术[J]. 中国光学(中英文),2025,18(5):1097-1110.
WEI P F, DU H B, ZHU Q, et al. Single-frame color stripe contour technique based on fast iterative filtering[J]. Chinese Optics,2025, 18(5):1097-1110. (in Chinese)
- [11] QIAN J M, TAO T Y, FENG S J, et al. Motion-artifact-free dynamic 3D shape measurement with hybrid fourier-transform phase-shifting profilometry[J]. Optics Express, 2019, 27(3):2713-2731.
- [12] LAI X, CHEN X. An optimal principal component analysis method for carrier removal in Fourier transform profilometry[J]. Journal of Modern Optics,2023,70(10):603-612.
- [13] WANG Z Z. Single-shot 3D reconstruction by fusion of fourier transform profilometry and line clustering[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2024,18(3):325-335.
- [14] HAN Y H, FU Y J, TIAN S Y, et al. An improved Fourier transform profilometry and phase coding for 3D shape measurement[J]. Optical Review, 2025,32(3):486-496.
- [15] SHI W X, ZHANG Q, XIE H M, et al. A binocular vision-based 3D sampling moiré method for complex shape measurement[J]. Applied Sciences,2021,11(11):5175.
- [16] WANG Z X, YUE J, HAN J, et al. Regional fuzzy binocular stereo matching algorithm based on global correlation coding for 3D measurement of rail surface[J]. Optik,2020,207:164488.
- [17] 汤一平,王庆,庞成俊,等. 全景立体视觉在海上靶标中的应用[J]. 兵工学报,2010,31(11):1438-1443.
TANG Y P, WANG Q, PANG C J, et al. Application of panorama stereo vision on

- maritime target scoring[J]. *Acta Armamentarii*,2010,31(11):1438-1443. (in Chinese)
- [18] 邓宏亮. 运动目标激光散斑高精度双目三维重建算法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2023.
- DENG H L. Research on high-precision binocular 3D reconstruction algorithm based on laser speckle for moving object[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023. (in Chinese)
- [19] 皮金柱, 梁艳阳, 何宏森. 高效 RGB 格雷码与相移法结合的三维重建技术[J]. *传感器与微系统*,2019,38(5):59-62,70.
- PI J Z, LIANG Y Y, HE H S. Three-dimensional reconstruction technology combined high-efficiency RGB gray-code with phase-shift method[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*,2019,38(5):59-62,70. (in Chinese)
- [20] 行文轩, 王振洲. 基于四色结构光线图案的主动立体视觉匹配算法[J]. *兵器装备工程学*报,2024,45(11):310-320.
- XING W X, WANG Z Z. Active stereo vision matching algorithm based on four color structured light line pattern[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(11):310-320. (in Chinese)
- [21] 张聪. 基于高帧率相移正弦条纹投影的高速三维面形测量方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2023.
- ZHANG C. Research on high-speed three-dimensional surface shape measurement method based on high frame rate phase shift sinusoidal fringe projection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
- [22] SORKINE-HORNUNG O, RABINOVICH M. Least-squares rigid motion using SVD[EB/OL]. (2017-01-16)[2025-10-22]. https://igl.ethz.ch/projects/ARAP/svd_rot.pdf.