

基于Transformer-FPGA协同特征建模的光电坐标高精度定位技术

王仕杰, 武锦辉*, 刘吉, 杨雪娇, 张孟海

(中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

摘要: 针对光电坐标检测系统中传统算法在复杂遮挡场景下定位精度不足的问题, 本文提出了一种基于Transformer模型的弹丸着靶坐标检测算法。该算法结合FPGA进行信号采集与预处理, 利用Transformer强大的特征提取能力, 优化了光电坐标检测精度。系统采用由窄波束红外发射单元SFH 4550和PIN型光电二极管阵列组成的1 m×1 m测量光幕, 通过捕捉弹丸遮挡光束产生的光电信号, 构建了“信号采集-特征建模-坐标预测”的完整算法模型。通过线性投影和位置编码将8位二进制传感器状态转化为高维特征, 并在Transformer的多头注意力机制中进行处理, 从而有效地捕捉不同传感器之间的空间关系。通过FPGA对信号的采集与预处理, 以及Transformer模型的特征建模与坐标预测, 系统实现了精确的坐标计算。实验结果表明, 在单点遮挡和多点遮挡的场景下, 所提算法具有较高的定位准确率, 预测坐标的误差范围控制在±1.5 mm内, 与现有系统相比精度得到了显著提升。基于高精度坐标靶纸的测量验证结果表明, 实验精度满足实际应用需求, 为现代武器系统的精细化设计与优化提供了可靠的技术支持。此外, 通过与不同模型进行对比, 验证了基于Transformer的特征提取方法在复杂遮挡场景中具有较好的鲁棒性和实时性。

关键词: 光电坐标检测; Transformer; FPGA; 坐标计算

中图分类号: TJ06

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.10.0021

引用格式: 王仕杰, 武锦辉, 刘吉, 等. 基于Transformer-FPGA协同特征建模的光电坐标高精度定位技术[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(4): 472-481.

Wang Shijie, Wu Jinhui, Liu Ji, et al. High-precision photoelectric coordinate positioning technology based on Transformer-FPGA collaborative feature modeling [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2026, 47(4): 472-481.

High-Precision Photoelectric Coordinate Positioning Technology Based on Transformer-FPGA Collaborative Feature Modeling

Wang Shijie, Wu Jinhui*, Liu Ji, Yang Xuejiao, Zhang Menghai

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A projectile targeting coordinate detection algorithm was proposed based on the Transformer architecture to address the problem of insufficient positioning accuracy in complex occlusion scenarios in photoelectric coordinate detection systems. The algorithm combined FPGA for signal acquisition and pre-

收稿日期: 2025-10-26

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(202403021222181); 山西省科技成果转化引导专项(202404021301029)

作者简介: 王仕杰(2000—), 硕士生, 主要从事嵌入式系统及仪器的研究。

* 通信作者: 武锦辉(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事高动态光参数光电探测技术、光纤传感技术、嵌入式系统及仪器的研究。

E-mail: wujinhui@nuc.edu.cn。

processing, and leveraged the powerful feature extraction capability of the Transformer to optimize photoelectric coordinate detection accuracy. The system used a $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ measurement light curtain composed of narrow-beam infrared emitter SFH 4550 and PIN photodiode arrays. It captured the photoelectric signals generated by the projectile's obscuring beam to construct a complete algorithm framework of "signal acquisition - feature modeling - coordinate prediction". The 8-bit binary sensor states were transformed into high-dimensional features through linear projection and positional encoding, and processed in the Transformer's multi-head attention mechanism to effectively capture spatial relationships between different sensors. By acquiring and preprocessing signals with FPGA and performing feature modeling and coordinate prediction with the Transformer model, the system achieved accurate coordinate computation. Experimental results show that the proposed algorithm achieves high positioning accuracy in both single-point and multi-point occlusion scenarios, with the predicted coordinate error range controlled within $\pm 1.5\text{ mm}$. Compared with existing systems, the accuracy is significantly improved. Measurement verification based on high-precision coordinate target paper shows that the experimental accuracy meets practical application requirements, providing reliable technical support for the refinement and optimization of modern weapon systems. In addition, by comparing different models, the results validate that the Transformer-based feature extraction method in complex occlusion scenarios has good robustness and real-time performance.

Key words: photoelectric coordinate detection; Transformer; FPGA; coordinate calculation

0 引 言

光电坐标检测技术作为弹道测量的核心手段,其发展历程始终围绕着精度提升与测量范围扩展两大核心问题展开^[1-4]。传统光幕靶系统基于几何光学原理,形成了以天幕靶、组合光幕靶为代表的典型技术路线。

光幕靶作为一种常用的测量工具,具有诸多优点,在常规兵器靶场中常用来测量弹丸的过靶坐标^[5-6]。典型应用中,南京理工大学的“Z”型激光反射结构光幕靶由平行光源组成的平行光幕经两长条形状的反射镜两次反射后到达光探测器,形成三道光幕,总体呈现Z字型结构,坐标由弹丸穿越光幕的时间差计算得出,可以实现 $\pm 1\text{ mm}$ 的相对位置误差^[7],但其安装精度要求高,易受环境光的干扰和电磁干扰;中北大学的“N”型光幕靶由多个矩阵光幕模块拼接而成,西安工业大学的阵列式光电坐标靶技术利用多层光阑板的结构模型来构建空间测量光幕,均在靶面内实现了 $\pm 2.5\text{ mm}$ 的测量精度^[8],但需要高精度的安装和对准,小角度偏差和位置偏差都可能导致测量误差^[9]。

传统光幕靶的测量范围通常为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 至 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,难以满足大靶面需求^[10-11];王佳等提出了双N型六光幕天幕立靶,通过两台主探测器形成的

双N型六光幕,记录弹丸穿越6个光幕的时刻值,再结合光幕结构参数和靶幕参数和靶距参数,进一步计算弹丸着靶位置坐标,其测量范围达到了 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,但X、Y方向误差分别增至 10 mm 与 15 mm ^[12],精度与范围产生了矛盾^[13-15]。除此之外,组合光幕阵列是通过多光幕融合来测量弹丸坐标,其中,四组合光幕阵列记录弹丸穿过4个光幕的时间及光幕之间的距离,然后根据三角几何关系计算出弹丸的着靶坐标^[16], $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 靶面下的X、Y方向误差均在 1.7 mm 以内^[17-18],但其成本与系统复杂度均会大大增加。一体化光幕阵列测量技术通过优化光幕阵列的结构参数,实现 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 靶面的横坐标误差不超过 3.1 mm ,纵坐标误差不超过 4.8 mm ^[19-20]。

近年来,除传统光幕遮挡式光电靶外,基于交会测量原理的光电坐标靶亦成为重要研究方向^[21]。该类系统通常通过多组光电探测单元构建空间交会模型,利用多视角信息反演弹丸过靶坐标,具有测量范围大、结构灵活等优点。然而,其系统精度高度依赖多传感器间的几何标定精度与同步精度,在复杂遮挡或多弹干扰条件下易引入累计误差^[18,22]。

相比之下,光幕遮挡式光电坐标检测通过直接捕捉弹丸遮挡光束形成的离散信号^[23],在结构复杂度与实时性方面具有明显优势。本文在利用该技术路线的基础上,引入基于Transformer的特征建模方法,以提升复杂遮挡场景下的坐标预测精度^[24-25]。

为解决上述光电坐标检测技术面临的诸多问

题,本文提出一种基于Transformer模型^[26-27](即基于自注意力机制的深度学习模型)的光电坐标检测算法,搭建由窄波束红外发射单元SFH 4550和PIN型光电二极管阵列组成的 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的测量光幕测量系统,构建“信号采集-特征建模-坐标预测”的完整算法模型,对采集数据进行处理和分析,以验证其测量精度。

1 系统模型与设计

本文设计的弹着点坐标测量系统由发光阵列和探测阵列构成,发光阵列由多个窄波束红外发射单元组成,探测阵列由多个PIN型光电二极管组成,发光阵列和探测阵列交互排列,构成 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的靶面,通过光电组件选型与精密光路设计,最终实现分辨率高、抗干扰强的弹丸检测能力。

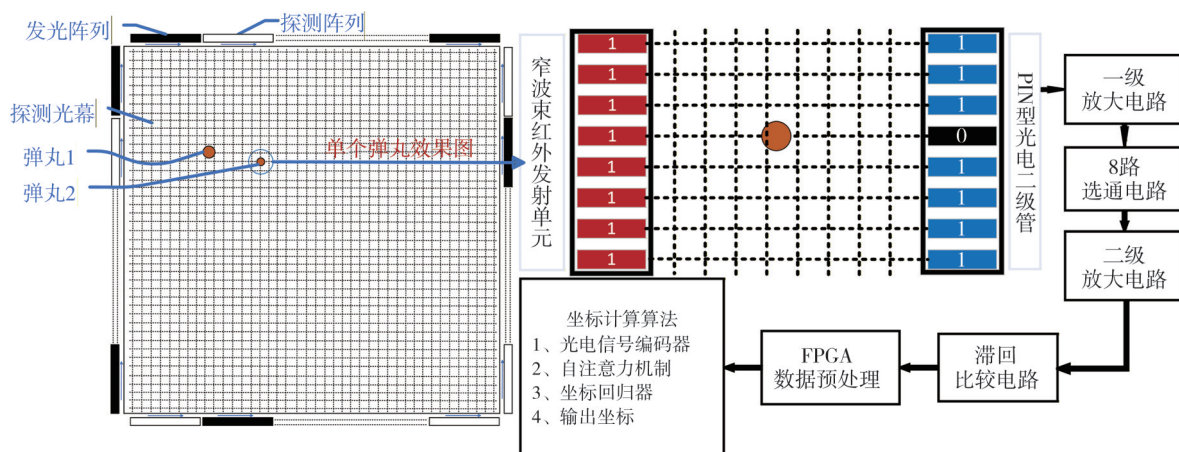


图1 系统整体结构图

Fig. 1 Overall system structure

最小硬件单元数据位变化如图1所示,每一部分最小硬件单元输出8位二进制数据,后续对其进行处理;当没有弹丸穿过光幕时,FPGA引脚检测到滞回比较电路输出数字脉冲信号后将相应探测阵列的数据位置1;当弹丸穿过光幕时,遮挡了光电二极管接收到的光电信号,滞回比较电路不输出数字脉冲信号,FPGA将相应的探测阵列所在的数据位置0。

2 坐标检测算法

本研究所提出的光电坐标检测算法基于Transformer模型,其整体结构如图2所示,主要由数据预处理、Transformer模型、输出三个部分构成。

核心模块由光电信号编码器、多头注意力机

制和坐标回归器组成,可以实现“特征嵌入-空间建模-坐标映射”的完整处理。

当弹丸穿过光幕时会遮挡住红外发光管发射的光束,此时光电探测阵列就会产生相应的光电信号,信号通过连接线与FPGA引脚相连,每个引脚分别与各个探测阵列对应且系统为每个引脚分配了相应的数据位。

采用动态阵列控制技术,并利用多路选择器实现多通道探测单元的循环扫描,然后通过弹丸遮挡的光电传感器位置计算过靶坐标。当高速飞行的子弹穿过测量系统时会遮挡光电二极管的激光,光电二极管的状态由导通状态迅速变为截止状态,通过对高低电平变化的检测可以确定被遮挡的光电二极管的具体位置;然后利用FPGA完成信号采集并对信号进行预处理,通过坐标算法实现对预处理信号的运算,便可得到子弹经过的坐标。系统整体结构如图1所示。

制和坐标回归器组成,可以实现“特征嵌入-空间建模-坐标映射”的完整处理。

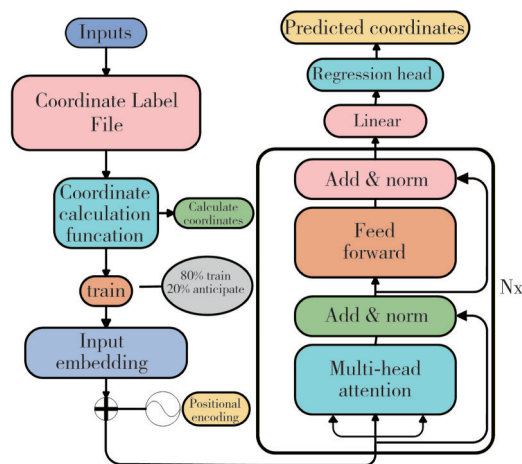


图2 Transformer整体模型

Fig. 2 Transformer overall model

2.1 输入与数据处理模块

模型的输入为传感器阵列的 8 位二进制遮挡状态, 每个传感器的位置用一个二进制位表示遮挡模式。这些输入数据反映了传感器阵列中各点的遮挡信息, 为后续的坐标预测提供了基础。输入数据被划分为训练集和验证集, 经过输入嵌入层, 将 8 维二进制光电信号, 通过嵌入层将其映射至 64 维高维空间, 消除原始二值信号的离散特性。为增强传感器阵列的空间位置感知, 采用正余弦编码策略

$$PE_{(pos, 2i)} = \sin\left(\frac{pos}{10\,000^{\frac{2i}{d_{model}}}}\right), \quad (1)$$

$$PE_{(pos, 2i+1)} = \cos\left(\frac{pos}{10\,000^{\frac{2i}{d_{model}}}}\right), \quad (2)$$

通过数学意义上的频率衰减及正交性保障, 这种位置编码的设计将传感器的实际物理位置精准映射到高维空间, 同时, 可以根据光电阵列检测场景的特点, 提高对局部区域遮挡的识别能力、远距干扰噪声的抑制能力和多遮挡场景下的坐标计算精度。

2.2 Transformer 模型与预测输出

该部分是模型的核心, 主要利用 Transformer 模型进行特征提取和坐标预测。Transformer 编码器包含多个编码器模块, 每个模块包括多头注意力机制、残差连接与归一化层, 以及前馈神经网络。多头注意力机制用于捕捉输入序列中不同位置之间的关系, 其结构如图 3 所示。

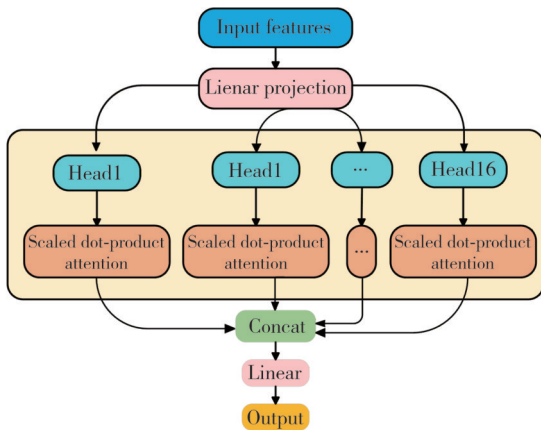


图 3 多头注意力机制结构

Fig. 3 Structure of the multi-attention mechanism

在该机制中, 输入的 8 位二进制传感器状态会通过线性投影和位置编码转化为高维空间特征。接着, 4 头并行的注意力机制将输入的特征分配到多个子空间中进行处理。每个注意力头生成一个独立的输出矩阵, 表示从不同子空间计算得到的注意力权重。所有头的输出矩阵最终被拼接在一起, 形成一个线性矩阵, 这个矩阵代表了最终的自注意力输出。

残差连接和归一化层的引入, 有效地稳定了训练过程, 帮助模型更快地收敛。接下来, 前馈神经网络对每个位置的特征进行独立的非线性变换, 从而增强了模型的表达能力。

特征提取过程完成后, 回归层将编码器输出的高维特征向量映射到连续的坐标值。最终, 结合各个注意力头的信息, 通过融合多维特征与权重注意力机制, 模型可以实现精确的坐标预测。

本文在最初的设计中考虑了 16 头并行注意力机制, 目标是捕捉更细粒度的特征。然而, 实验结果表明, 16 头与 4 头的模型在精度上的差异并不显著。考虑到计算资源的限制, 尤其是在 FPGA 上的硬件适配性, 最终选择了 4 头注意力机制。4 头注意力机制不仅在处理复杂遮挡模式时同样有效, 而且具有更低的计算复杂度和更短的延迟, 能够满足实时检测的需求。

3 坐标测量与分析

3.1 模拟弹丸坐标检测实验

算法的测量精度验证实验中, 探测区域为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, 模拟弹丸为直径 5 mm 的钢珠, 将模拟弹丸固定在气动滑轨上, 通过气动滑轨发射弹丸使得弹丸穿过测量靶面, 在靶面后放置一张用于测量结果参考的纸靶, 如图 4 所示, 系统可检测到靶面内的弹丸过靶信号, 通过算法计算预测坐标并与纸靶实际坐标进行对比。

采用高精度坐标靶纸作为真实坐标基准, 其网格精度为 $\pm 0.1\text{ mm}$, 显著优于系统预测误差 ($\pm 1.5\text{ mm}$)。实验前通过光学仪器对靶纸与测量光幕的平行度进行校准, 并采用激光跟踪仪对相同弹丸着靶点进行对比测试, 从而确保实验基准的可靠性。

在弹丸穿过光幕时会遮挡发光元件产生的红外光, 光电信号经电路处理后, 会传输给 FPGA 进行数据预处理, 转换为两位 16 进制字符; 经过实验后,

得到数据集,将其处理为8位二进制数据集,数据集经过坐标算法处理后得到所求坐标值。

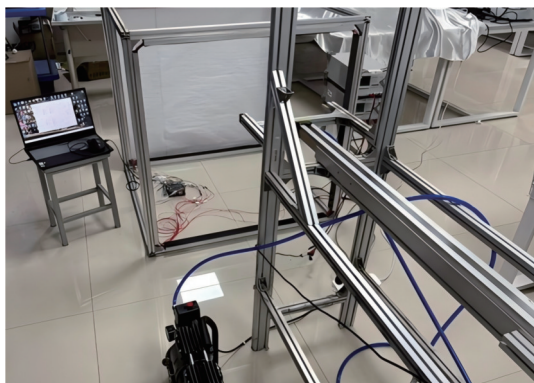
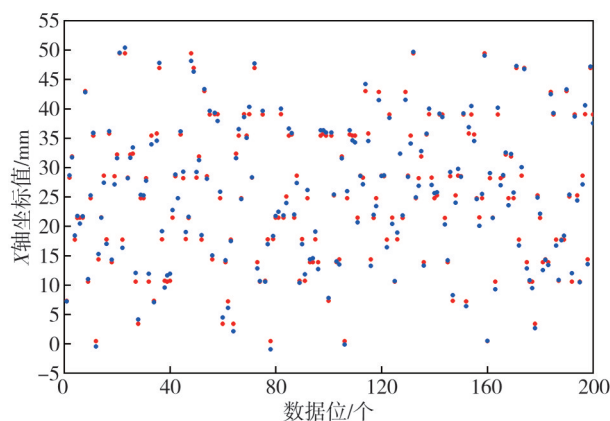


图4 模拟弹丸着靶装置

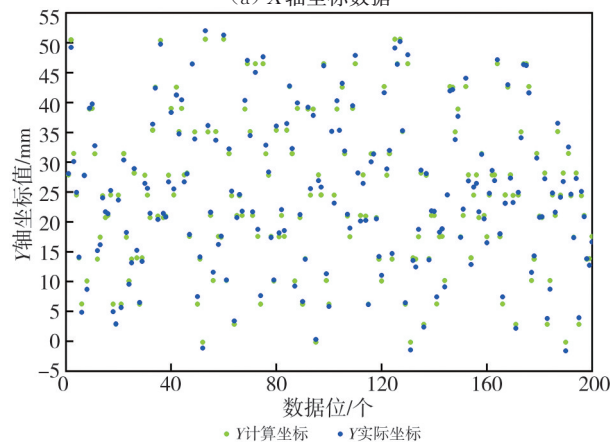
Fig. 4 Simulated projectile impact device

3.2 测量数据及分析

测量系统精度的验证实验中,直径为5 mm的模拟弹丸穿过光幕后落到纸靶上面,纸靶获得实际坐标,利用算法得到计算坐标,实验所测X轴、Y轴坐标如图5所示。



(a) X轴坐标数据

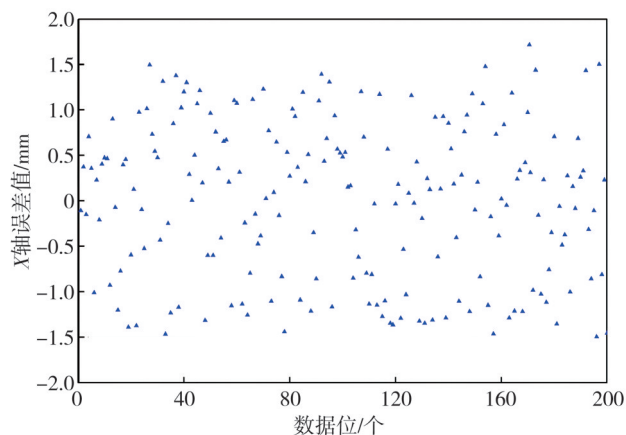


(b) Y轴坐标数据

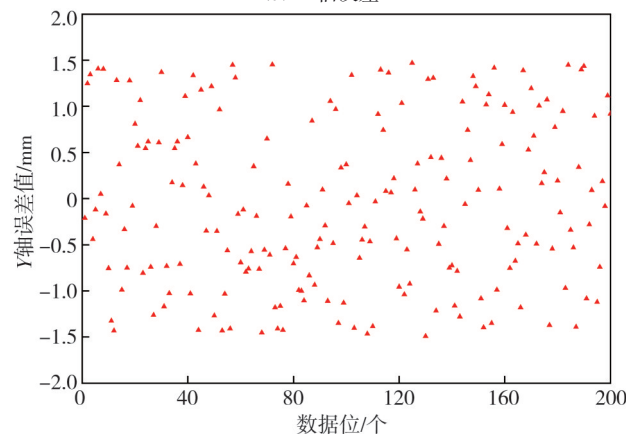
图5 模拟弹丸着靶实验测量数据

Fig. 5 Measured data of simulated projectile impact experiment

由图5可以看出,X、Y坐标的计算值与实际值的变化趋势基本一致,表明模型可以较好地预测实际坐标的变化规律,但在部分位置两者存在明显的差异,其误差如图6所示。



(a) X轴误差



(b) Y轴误差

图6 模拟弹丸着靶实验的测量误差

Fig. 6 Measurement error of simulated projectile impact experiment

由图6可知,X轴和Y轴的误差值集中在 ± 1.5 mm范围内,并且部分误差值很小,符合实际使用要求,验证了本文算法的可行性。

3.3 注意力机制有效性验证

在基于Transformer的坐标回归模型中,自注意力机制通过动态权重分配实现了对传感器遮挡位置的有效聚焦。自注意力机制通过QKV映射、相似度计算、Softmax归一化的核心流程,在每一次前向传播中实现了基于特征相似度的动态权重分配。不需要人工设计规则,模型能够自适应聚焦于遮挡区域,捕捉空间相关性并抑制无效噪声,使模型可以在单点、多点遮挡场景下实现高精度定位。

注意力权重的主要计算过程如下:

1) Query-Key-Value。

输入特征矩阵通过线性变换生成 Query、Key、Value 矩阵。

$$Q = XW^Q, K = XW^K, V = XW^V, \quad (3)$$

式中: W^Q, W^K, W^V 为可学习参数, 每个注意力头的子空间维度 $d_k=16$ 。其计算公式为

$$Attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V. \quad (4)$$

2) 多遮挡场景的权重融合。

当位 3、4 同时被遮挡时, 其注意力权重分别为 0.38 和 0.35, 邻近位 1、4 权重衰减至 0.12~0.15, 而远端传感器权重普遍低于 0.05。该分布符合空间相邻性假设, 权重 A_{ij} 与传感器间距 Δx 呈负指数关系, 具体为

$$AA_{ij} \propto \exp\left(-0.8 \cdot \frac{\|x_i - x_j\|}{7}\right). \quad (5)$$

本文采用 4 头注意力机制, 主要分为局部注意力头、全局注意力头、特征检测头、噪声过滤头。实验验证结果表明, 模型对单点遮挡的定位准确率高达 98.3%, 针对发光阵列多点遮挡场景, 自注意力机制通过多模态权重分布实现了精准定位。如图 7 所示, 当发光阵列的某一位被遮挡时, 其对应的注意力权重显著提升至 0.82, 而正常区域权重值普遍低于 0.1。

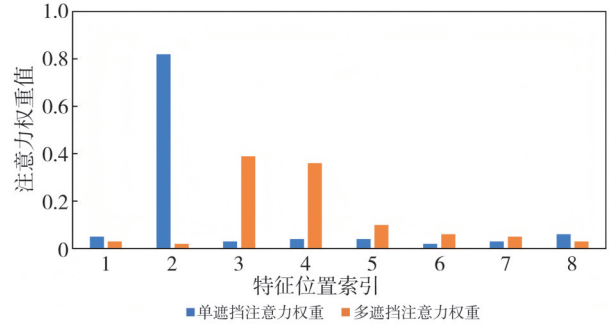


图 7 注意力权重示意图

Fig. 7 Schematic of attention weighting

3.4 预测精度分析

为了验证本文算法模型在光电坐标检测任务中的性能, 将其与 MLP、CNN 模型进行了对比。本文对单点遮挡和多点遮挡工况分别进行了多次重复实验, 并统计了各组实验的平均绝对误差(MAE)与均方误差(MSE), 并在不同模型和自注意力头数配置下进行了评估, 实验结果分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 模型误差

Tab. 1 Model errors

模型	MAE/mm	MSE/mm ²
本算法	0.158	0.055
MLP	0.475	0.534
CNN	0.537	0.418
LSTM	0.305	0.167
iTransformer	0.212	0.074

表 2 不同模型与自注意力头数条件下的性能对比结果

Tab. 2 Performance comparison results under different models and self-attention head counts

模型类型	平均定位误差/mm	训练时间/min	训练参数总量/ 10^6	单遮挡定位准确率/%	多遮挡定位准确率/%
MLP	3.21	5.8	0.5	85.2	78.6
CNN	2.13	9.5	1.8	92.5	89.3
LSTM	1.87	12.3	2.5	94.1	91.7
iTransformer(nhead=8)	1.62	15.7	3.2	96.5	94.3
本文 Transformer(nhead=4)	1.47	8.3	1.2	98.3	96.7

由表 1 可以看出: 本文模型的误差主要集中在 ± 1.5 mm 区间内, 且误差分布呈现较好的集中性, 验证了算法在复杂遮挡条件下的鲁棒性。同时, 本文模型的性能显著优于其他模型, 这主要得益于其在结构设计和运算逻辑上的优势, 通过更有效的特征提取和精准的坐标计算方法, 有效减少了光电坐标数据处理中的误差积累。

由表 2 可知, 本文提出的 Transformer 模型(nhead=4)在定位精度、训练时间和训练参数量等方面均优于其他模型。Transformer(nhead=4)模型的平均定位误差为 1.47 mm, 训练时间为

8.3 min, 训练参数总量为 1.2×10^6 , 单遮挡定位准确率为 98.3%, 多遮挡定位准确率为 96.7%。相比之下, MLP 和 CNN 模型在精度和训练效率方面表现略差。以上结果进一步验证了本文模型在复杂遮挡条件下的优越性和鲁棒性。

3.5 系统误差模型与来源分析

为了系统分析光电坐标检测精度的误差来源, 本文从硬件布局、信号处理及算法建模三个层面进行了详细建模与阐述。1) 硬件布局误差是系统误差的一个重要来源。该误差主要体现在传

感器安装位置的误差,尤其是发射端和接收端光电二极管的位置与理论坐标的偏差,可能导致测量精度下降;此外,光路的同轴度误差也是硬件布局误差的一部分,光路偏移会影响遮挡信号的捕捉,增加测量误差。2) 信号处理过程中也可能引入误差。电路噪声误差,诸如器件固有的热噪声、环境电磁干扰以及环境光的干扰,都会导致信号的波动;而FPGA的采样时序误差也会影响数据的准确性,尤其是在高速信号采集时,采样的时序波动可能导致测量值的偏差。3) 算法建模误差同样是精度的重要因素。坐标回归误差是由于回归模型对高维特征的拟合偏差产生的,这可能导致最终坐标的误差;另外,Transformer模型中多头注意力机制在处理多遮挡场景时,由于遮挡区域特征的多样性,权重分配可能存在一定的误差,这也会影响坐标预测精度。

3.5.1 硬件布局误差建模与量化

硬件相关误差主要包括传感器安装误差、光路同轴度误差、电路噪声误差以及FPGA采样时序误差。本文采用“理论建模+实验标定”的方式对上述误差进行量化分析,结果见表3。

表3 系统硬件与信号处理误差来源及量化

Tab. 3 Sources and quantification of hardware and signal processing errors

误差源	数学模型	误差/mm	分布
传感器安装	$\sqrt{(\Delta x_{tx})^2 + (\Delta x_{rx})^2}$	0.12	均匀
光路同轴度	$(d \tan \theta) (d=7 \text{ mm})$	0.08	正态
电路噪声	$(k\sigma_v)$	0.05	正态
采样时序	$(v\Delta t)$	0.0015	均匀

传感器安装误差主要由发射端与接收端光电二极管的位置偏差共同引起,其等效坐标误差可表示为

$$\Delta x_{\text{inst}} = \sqrt{(\Delta x_{tx})^2 + (\Delta x_{rx})^2}, \quad (6)$$

式中: Δx_{tx} 和 Δx_{rx} 分别为发射端和接收端的安装偏差。实验标定结果表明,该项误差的量级约为 $\pm 0.12 \text{ mm}$,近似服从均匀分布。

光路同轴度误差由发射光束与接收面之间的垂直度偏差引起,其等效坐标误差模型可表示为

$$\Delta x_{\text{opt}} = d \cdot \tan \theta, \quad (7)$$

式中: $d=7 \text{ mm}$ 为相邻传感器间距; θ 为光路垂直度偏差角。实验结果表明,该误差量级约为 $\pm 0.08 \text{ mm}$,近似服从正态分布。

电路噪声误差主要由热噪声及电磁干扰引起,其等效坐标误差可表示为

$$\Delta x_{\text{noise}} = k \cdot \sigma_v, \quad (8)$$

式中: k 为信号-坐标转换系数; σ_v 为噪声电压标准差,实验测得该项误差量级约为 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 。

FPGA采样时序误差由采样时钟抖动引起,其误差模型可表示为

$$\Delta x_{\text{sampling}} = v \cdot \Delta t, \quad (9)$$

式中: v 为弹丸速度($500 \sim 1500 \text{ m/s}$); Δt 为采样时序抖动($\leq 1 \text{ ns}$)。在上述参数范围内,该误差量级约为 $\pm 0.0015 \text{ mm}$,对系统总误差的影响可忽略。

为验证硬件误差模型的有效性,本文采用测量精度为 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 的激光跟踪仪对100个传感器的安装位置进行标定。实验结果显示,发射端与接收端的平均安装偏差分别为 0.08 mm 和 0.09 mm ,计算得到的综合安装误差为 0.12 mm ,与理论模型预测结果一致。同时,通过角位移台调节光路垂直度并记录不同偏差角条件下的坐标误差变化,拟合结果验证了 Δx_{opt} 与 θ 之间的线性关系,证明了光路误差模型的合理性。

3.5.2 判读误差建模与量化

在基于靶纸的实验验证过程中,除系统自身的硬件与信号处理误差外,还需进一步考虑由人工判读及靶纸物理特性引入的判读误差,主要包括人眼对准误差、重复对准误差以及钢珠穿靶后产生的边缘模糊误差,结果见表4。

表4 判读误差量化结果

Tab. 4 Quantitative results of parallax errors

误差源	量化方法	误差/mm	分布
人眼对准	5人×10次重复读数	0.15	正态
重复对准	A类不确定度评定	0.08	正态
边缘模糊	显微测量半宽	0.20	均匀

实验中选用直径为 5 mm 、表面光滑无毛刺的钢珠,在 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 靶面范围内随机选取20个弹着点,使用20倍显微镜观测并测量弹孔边缘的模糊带宽度。统计结果表明,模糊带的平均宽度约为 0.4 mm ,取其半宽作为边缘模糊误差,对应误差量级约为 $\pm 0.20 \text{ mm}$,近似服从均匀分布。

同时,5名实验人员使用精度为 0.01 mm 的读数显微镜对同一弹着点进行多次重复读数。统计分析结果显示,人眼对准误差的均值约为 $\pm 0.15 \text{ mm}$,重复对准误差的标准差约为 $\pm 0.08 \text{ mm}$,二者均近似服从正态分布。

3.5.3 误差影响权重分析

在假设各误差源相互独立的前提下,本文采用方差合成与方差分解方法,对系统总测量不确

定度进行评定,并计算各误差源对总误差的贡献权重。分析结果表明,判读误差在系统总误差中占主导地位,其贡献比例为 58.3%,其中边缘模糊误差为最主要的单项误差来源。硬件相关误差的综合贡献比例为 41.7%,其中传感器安装误差的贡献最大,而 FPGA 采样时序误差的贡献比例小于 0.01%,可忽略不计。

进一步计算各误差源对应的标准不确定度及方差占比关系,结果见表 5。数据表明,边缘模糊误差、重复对准误差以及传感器安装误差是影响系统测量精度的主要误差来源。

表 5 误差不确定度与贡献权重结果

Tab. 5 Uncertainty and contribution weight results of error sources

误差源	标准不确定度/mm	权重/%
边缘模糊	0.115	45.2
重复对准	0.080	23.9
传感器安装	0.069	17.8
人眼对准	0.050	9.3
其余误差	—	<4.0

通过建立涵盖硬件误差、信号处理误差及人工判读误差的完整系统误差模型,本文定量评估了各类误差源的数值规模及其统计分布特性,并验证了多数误差源之间的独立性假设。综合评定结果表明,在 95% 置信概率下,系统的扩展不确定度为 0.34 mm,系统总测量误差不超过 ± 1.47 mm,满足 ± 1.5 mm 的设计精度要求。分析结果进一步表明,判读误差(尤其是边缘模糊误差)以及传感器安装误差是限制系统测量精度进一步提升的主要因素,这为后续系统结构优化与测量方法改进提供了明确方向。

4 结 论

本文提出了一种基于 Transformer 模型的光电坐标检测算法,结合 FPGA 技术进行信号采集与预处理,并通过 Transformer 模型进行坐标计算,从而实现对弹丸坐标的高精度测量。实验结果表明,在 X 轴和 Y 轴上,预测坐标的误差与实际坐标保持高度一致,误差范围控制在 ± 1.5 mm 内,完全满足实际应用的精度要求,并在一定程度上优于现有大多数坐标检测系统。该算法在单点遮挡和多点遮挡的条件下,均表现出较高的定位准确率,证明了其在复杂环境中的有效性和鲁棒性。

通过与 MLP、CNN 等传统算法进行对比,本文算法展现了其在特征提取和坐标预测方面的优

势,能够有效减少误差积累,进一步提高了光电坐标检测的精度。综上所述,本文所提算法为现代武器系统的精细化设计和优化提供了可靠的技术支持,具有广泛的应用前景。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 邱婉静,姜三平. 弹丸弹着点坐标测量系统研究[J]. 激光杂志, 2013, 34(2): 19-20.
Qiu Wanjing, Jiang Sanping. Measuring system of velocity and impact point coordinate of projectiles[J]. Laser Journal, 2013, 34(2): 19-20. (in Chinese)
- [2] 刘吉,苏凝钢,武锦辉,等. 光电弹着点坐标检测技术的发展现状[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(12): 224-230.
Liu Ji, Su Ninggang, Wu Jinhui, et al. Development status of photographic detection technology for measuring projectile coordinates[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2018, 39(12): 224-230. (in Chinese)
- [3] 萧云峰,杨丹蕾,王劲松,等. 光幕靶弹着点坐标测量方法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(2): 72-75.
Xiao Yunfeng, Yang Danlei, Wang Jinsong, et al. Light curtain target point coordinate measuring method[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2018, 41(2): 72-75. (in Chinese)
- [4] 程日炜,兰国峰,严浩铭,等. 激光光幕测速系统温控装置设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 370-376.
Cheng Riwei, Lan Guofeng, Yan Haoming, et al. Design of temperature control device for laser light curtain velocity measurement system[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2022, 43(4): 370-376. (in Chinese)
- [5] 赵磊,刘吉,武锦辉,等. 光电阵列动态扫描式弹丸坐标及速度测量方法[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(2): 51-54.
Zhao Lei, Liu Ji, Wu Jinhui, et al. Projectile coordinate and velocity measuring method of grating grid scanning[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(2): 51-54. (in Chinese)
- [6] 贾一丹,刘吉,武锦辉,等. 三角阵列式组合光幕坐标测量系统的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2024, 44(4): 1-8.

- Jia Yidan, Liu Ji, Wu Jinhui, et al. Research on triangular array combined light curtain coordinate measuring system[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2024, 44(4): 1-8. (in Chinese)
- [7] 于纪言, 李永新, 王晓鸣. 单列光源反射式光幕靶检测弹着点[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1354-1360.
- Yu Jiyan, Li Yongxin, Wang Xiaoming. Measurement of impact points using reflective light screen target of single column light source[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(6): 1354-1360. (in Chinese)
- [8] 张建平, 刘吉, 张斌, 等. 基于N形光幕的弹着点坐标测试方法[J]. 探测与控制学报, 2015, 37(1): 76-79.
- Zhang Jianping, Liu Ji, Zhang Bin, et al. Projectile impact location measurement based on N shape laser screen[J]. Journal of Detection & Control, 2015, 37(1): 76-79. (in Chinese)
- [9] 史元元. 多层阵列式光电坐标靶技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2020.
- [10] 党浩淮, 赵冬娥. 弹丸立靶坐标测试系统设计[J]. 科技视界, 2013(31): 28.
- [11] 高丰佳, 董涛, 陈丁, 等. 三角阵列光电探测的双弹丸识别方法[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 188-192.
- Gao Fengjia, Dong Tao, Chen Ding, et al. Identification method of double-projectile using triangle array photoelectric detection[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(11): 188-192. (in Chinese)
- [12] 王佳, 张智轩, 董涛, 等. 基于双N型的六光幕天幕立靶测量方法研究[J]. 光学技术, 2024, 50(2): 188-193.
- Wang Jia, Zhang Zhixuan, Dong Tao, et al. Research on the measurement method of the vertical target of the six light screen based on double N-type[J]. Optical Technique, 2024, 50(2): 188-193. (in Chinese)
- [13] 董涛, 倪晋平, 马群, 等. 10 m×10 m大靶面激光立靶设计[J]. 光学技术, 2010, 36(3): 368-371.
- Dong Tao, Ni Jinping, Ma Qun, et al. Design of 10×10m large sensor area laser target[J]. Optical Technique, 2010, 36(3): 368-371. (in Chinese)
- [14] 潘远林. 基于绝对测距和光电扫描的大空间坐标测量方法[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [15] 冯斌, 石秀华, 康智强, 等. 声阵列与光探测组合测试弹着点坐标的研究[J]. 压电与声光, 2012, 34(2): 177-179.
- Feng Bin, Shi Xiuhua, Kang Zhiqiang, et al. Study on measurement of impact point coordinates with the combination of acoustic array and optical detection[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(2): 177-179. (in Chinese)
- [16] 冯斌, 武志超. 基于天幕立靶的两种弹着点坐标测量算法[J]. 兵工自动化, 2013, 32(11): 63-66.
- Feng Bin, Wu Zhichao. Two measuring algorithms for projectiles impact point coordinates based on sky screens vertical target[J]. Ordnance Industry Automation, 2013, 32(11): 63-66. (in Chinese)
- [17] 倪晋平, 卢红伟, 董涛. 弹着点坐标的组合光幕阵列测量方法[J]. 弹道学报, 2012, 24(1): 37-40.
- Ni Jinping, Lu Hongwei, Dong Tao. Measurement method of impact location coordinate of flying projectile via combined screens array[J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(1): 37-40. (in Chinese)
- [18] 李亚玲. LED大靶面立靶坐标与速度测试系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [19] 于国栋, 王春阳, 冯江海, 等. 一体化光幕阵列测量误差分析与结构参数优化[J]. 光子学报, 2023, 52(6): 283-293.
- Yu Guodong, Wang Chunyang, Feng Jianghai, et al. Error analysis and parameters optimization of integrated light-screen array measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(6): 283-293. (in Chinese)
- [20] 陈瑞, 倪晋平, 侯飒. 三种着靶坐标自动测量设备精度评价方法[J]. 测试技术学报, 2017, 31(1): 69-75.
- Chen Rui, Ni Jinping, Hou Sa. Three accuracy assessment methods of automatic projectile impact coordinates measurement system[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2017, 31(1): 69-75. (in Chinese)
- [21] Triyono L, Gernowo R, Prayitno. MoNetViT: an efficient fusion of CNN and transformer technologies for visual navigation assistance with multi query attention[J]. Frontiers in Computer Science, 2025, 7: 1510252-1510252.
- [22] Chen D, Deng C H, Yang Z Y, et al. Accuracy calibration of the multi-light screen measurement system using array optical signal[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(9): 095008.
- [23] Dong T, Li S, Chen D, et al. Measurement method for the flight parameters of a small flying object using a multi-dimensional LED detection array[J]. Photonics, 2023, 10(12): 1313.
- [24] 金字锋, 陶重彝. 基于Transformer的融合信息增强3D目标检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12):

- 297-306.
- Jin Yufeng, Tao Chongben. Fusion information enhanced method based on transformer for 3D object detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 297-306. (in Chinese)
- [25] 孟祥福, 石皓源. 基于 Transformer 模型的时序数据预测方法综述[J]. 计算机科学与探索, 2025, 19(1): 45-64.
- Meng Xiangfu, Shi Haoyuan. Survey of transformer-based model for time series forecasting[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2025, 19(1): 45-64. (in Chinese)
- [26] 王琪, 赵文仓. 基于预过滤注意力的 Transformer 物体检测[J]. 电子测量技术, 2022, 45(24): 145-152.
- Wang Qi, Zhao Wencang. Object detection based on Transformer with prefiltered attention [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(24): 145-152. (in Chinese)
- [27] 唐东林, 杨洲, 程衡, 等. 浅层卷积神经网络融合 Transformer 的金属缺陷图像识别方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(19): 2298-2305.
- Tang Donglin, Yang Zhou, Cheng Heng, et al. Metal defect image recognition method based on shallow CNN fusion transformer [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(19): 2298-2305. (in Chinese)

(上接第 456 页)

- [13] 张泽腾, 王玉, 王文廉. 用于爆炸冲击波测试的球形自由场传感器研究[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(11): 110-115.
- Zhang Zeteng, Wang Yu, Wang Wenlian. Research on a spherical free-field sensor for blast wave measurement [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(11): 110-115. (in Chinese)
- [14] 张大有. 激波管在压力传感器动态性能校准和实验上的应用[J]. 宇航计测技术, 2004, 24(4): 24-27.
- Zhang Dayou. The application of shock tube in testing and calibrating the performance of pressure sensor [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2004, 24(4): 24-27. (in Chinese)
- [15] Amer E, Jönsson G, Arrhen F. Towards traceable dynamic pressure calibration using a shock tube with an optical probe for accurate phase determination [J]. Metrologia, 2022, 59(3): 035001.
- [16] 王浩宇, 王玉, 王浩先, 等. 基于爆炸丝的空气冲击波特性及重复性研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(4): 10-15.
- Wang Haoyu, Wang Yu, Wang Haoxian, et al. Characterisation and repeatability of air shock waves based on exploding filaments [J]. Automation and Instrumentation, 2025(4): 10-15. (in Chinese)

(上接第 463 页)

- [11] Wang L J, Wu C Q, Fan L F, et al. Effective velocity of reflected wave in rock mass with different wave impedances of normal incidence of stress wave [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2022, 46(9): 1607-1619.
- [12] 刘卫. 火工品过载力学环境等效性模拟实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [13] 方幸. 空气炮力学过载等效模拟试验方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [14] Xu P, Wang Y H. Compression behavior and constitutive model establishment of fly ash cenosphere/polyurethane aluminum alloy syntactic foam [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2021, 12(3): 369-378.
- [15] 滑志成, 石云波, 陈玉楠, 等. 高 g 值冲击下聚氨酯缓冲仿真研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 403-410.
- Hua Zhicheng, Shi Yunbo, Chen Yunan, et al. Study on cushioning simulation of polyurethane under impact of high g [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2022, 43(5): 403-410. (in Chinese)