

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508234

# 基于 ZYNQ MPSOC 的分布式多目视觉测量系统研究<sup>\*</sup>

赵文锐<sup>1</sup> 张 瑞<sup>1,2</sup> 张 进<sup>1,2</sup> 李维诗<sup>1,2</sup> 杨 飞<sup>3</sup> 郑泽文<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009; 2. 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室 合肥 230009;  
3. 蚌埠市特种设备监督检验中心 蚌埠 340300)

**摘 要:**凭借着测量精度高、测量速度快、可测范围大、非接触等优点,多目视觉测量系统在航空航天、汽车等领域的动态目标空间高精度定位中应用广泛。然而由于多目相机系统存在图像数据量大、匹配和重建算法运算复杂度高等特点,系统的实时性能面临挑战。本文提出了一种基于 ZYNQ 多处理器片上系统(multi-processor system on chip, MPSOC)平台的分布式多目视觉测量系统,对图像采集、标志点匹配、光束法平差三维重建等算法进行架构优化,通过矩阵分块处理、构造任务级流水线等方法减少计算延迟和资源消耗,搭建了高效的系统硬件架构并部署到 ZYNQ MPSOC 平台。实验结果表明,系统可支持四路及以上高分辨率工业相机 2 048×2 048×8 bit 下最大 42.3 fps 的空间位置实时测量,同时目标点空间三维坐标的平均重投影误差仿真实验结果优于 0.72 pixels,针对标志点测头的动态跟踪测量实验中,系统相对于 C-Track 光学动态跟踪测量系统最大误差 129 μm,标准差为 43 μm,可满足动态目标高精度测量需求。

**关键词:**多目视觉测量;FPGA;三维重建;光束法平差

**中图分类号:** TN98      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Research of the distributed multi-vision measurement system based on the ZYNQ MPSOC

Zhao Wenrui<sup>1</sup> Zhang Rui<sup>1,2</sup> Zhang Jin<sup>1,2</sup> Li Weishi<sup>1,2</sup> Yang Fei<sup>3</sup> Zheng Zewen<sup>3</sup>

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;  
2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei 230009, China;  
3. Bengbu Special Equipment Supervision and Inspection Center, Bengbu 340300, China)

**Abstract:** With the advantages of high measurement accuracy, fast measurement speed, large measuring range and non-contact skill, the multi-vision measurement system is widely used in aerospace, automotive and other fields of dynamic target space high-precision positioning. However, due to the large amount of image data and the high complexity of matching and reconstruction algorithms, the real-time performance of the system faces the challenge. Therefore, this paper proposes a distributed multi-eye vision measurement System based on the ZYNQ multi-processor system on chip (MPSOC) platform, and optimizes the architecture of algorithms such as image acquisition, marker point matching, and beam method adjustment 3D reconstruction. By means of matrix block processing, constructing task-level pipelines and other methods to reduce computing delay and resource consumption, an efficient system hardware architecture was built and deployed to the ZYNQ MPSOC platform. The experimental results show that the real-time measurement of the spatial position of four or more high-resolution industrial cameras could be up to 42.3 fps at 2 048×2 048×8 bit, and the average reprojection error of the three-dimensional coordinate of the target is better than 0.72 pixels. In the dynamic tracking measurement experiment for the marker point probe, the maximum error of the system in this paper compared with the C-Track optical dynamic tracking measurement system is 129 μm, and the standard deviation is 43 μm, which can meet the high-precision measurement requirements of dynamic targets.

**Keywords:** multi-vision measurement; FPGA; reconstruction; bundle adjustment

收稿日期: 2025-03-13      Received Date: 2025-03-13

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(52175504)、安徽省市场监督管理局科技计划(2022M K 050)项目资助

## 0 引 言

随着工业机器人的不断发展,工业机器人由于具有高效率、智能化等优点开始逐步代替人工,在大尺寸测量领域,将三维激光扫描测头和工业机器人结合的三维扫描测量机器人开始广泛应用于工件测量,如汽车零部件和高精度模具等<sup>[1]</sup>,使得测量过程兼具自动化和高效性。传统的三维扫描测量机器人由三维激光扫描测头固定在工业机器人关节臂组成,工业机器人按照规划路径运动,带动激光扫描测头扫描工件获取点云数据,根据测头在空间中的位置和姿态信息,得到被测工件表面的几何信息。测量过程中,测头在空间中的位置和姿态一般由机器人各关节臂的运动状态决定,因此测头的定位精度受限于机器人末端的定位精度。由于机器人存在装配误差、惯性滞后,温度等因素限制定位精度,在高精度的复杂曲面测量中无法仅依靠机械臂自身定位满足高精度测量要求。因此,采用高精度的多目视觉测量系统代替低精度的机械臂自身定位系统,实现对扫描测头位姿的精确测量,从而提高三维扫描机器人的系统精度<sup>[2]</sup>。

由于实际应用场景空间大小以及相机视场限制,基线距离能够增加的范围有限,因此,增加传感器的种类和数量成为提高立体视觉系统测量精度主流选择<sup>[3-5]</sup>。多目视觉系统能够克服双目视觉测量中由于遮挡等存在的误匹配问题,更多的相机图像数据也能进一步提高系统测量精度和鲁棒性。多目视觉利用多台相机从不同视角采集图像,通过更大的视野减少测量盲区,还可以降低双目视觉中误匹配的影响,也能进一步提高系统测量精度和鲁棒性<sup>[6-8]</sup>。

Xu 等<sup>[9]</sup>利用工业内窥镜和多相机三维重建开发了一种实时三维测量系统,使用工业内窥镜捕捉原始负荷表面的图像,提出多相机阵列的炉料表面三维重建方法来实时获取高炉炉料表面的三位形状。Tang 等<sup>[10]</sup>提出了基于四目立体视觉系统的再生骨料钢管混凝土柱的表面变形跟踪测量,建立了四目视觉坐标与点云匹配相结合的数学模型,实现了三维变形曲面的重建。Qiao<sup>[11]</sup>等基于低成本工业相机和多视觉组网,搭建了多目视觉测量组网,仿真和实验表明了可行性。Hou<sup>[12]</sup>等提出了一种基于中心线矢量的多视觉测量方法,使用 8 台工业相机拍摄提取管道中心线,采用深度学习构建相机标定矩阵,重构端点空间坐标,测量值与标准值最大偏差仅 0.6%。

多目视觉测量对图像的处理以共线方程为基础,通过相对定向、绝对定向确定相机在各视点下的空间位置关系,结合空间后方交会法解算出相机的内、外方位元

素,根据空间三角交会原理和基于非线性优化准则的最小二乘平差建算法解算出三维坐标的精确值。计算过程主要包含以下步骤:相机标定与图像校正、图像立体匹配和三维重建迭代优化<sup>[13-14]</sup>。多目视觉系统中需要同时处理多台相机的多张图像,导致的大数据会使计算量增大、消耗时间长,不能满足实时性要求<sup>[6-8]</sup>。同时,随着图像数量和分辨率的提高,视觉测量系统中的匹配和重建等数据计算量也随之增加,中央处理器(central processing unit, CPU)顺序指令处理方式难以满足系统实时性需求,图像处理器(graphics processing unit, GPU)在一些功耗敏感的应用场景下并不适用<sup>[15]</sup>。而多处理器片上系统(multiprocessor system-on-chip, MPSOC),其处理系统(processing system, PS)与可编程逻辑(programmable logic, PL)的深度协同能够显著提升大规模图像数据处理效率。PS 部分集成多核处理器,可以高效完成复杂算法控制和任务调度,PL 部分则基于现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)架构,相比 CPU,具有低功耗、高能耗比、并行化处理和可重配置等优点,其并行化与流水线处理方式能够大大提高图像数据处理速度,降低图像计算量给视觉处理系统实时性能带来的负面影响<sup>[16-19]</sup>。

因此一些研究人员在嵌入式 ZYNQ 平台上部署视觉处理系统。Honegger 等<sup>[20]</sup>提出了一种 FPGA 与移动平台 CPU 组合异构计算平台进行立体匹配的方法,其中 FPGA 并行化处理匹配过程中复杂运算,低功耗移动平台 CPU 作为 FPGA 协处理器。He 等<sup>[21]</sup>基于 ZYNQ 提出了一种基于 RANSAC 假设的高效硬件加速器设计方法,相对 ARM 处理器,速度提高了 1.2~50 倍。Yang 等<sup>[22]</sup>基于 ZYNQ 平台提出了一种基于 SAD 与自适应 Census 变换相结合的立体匹配算法,增强了系统的实时性能。Zhang 等<sup>[23]</sup>基于 Zynq7100 FPGA 实现了分辨率 400 pixels×250 pixels 分辨率事件相机的图像实时重建,相对于 GPU 速度提升了 7.2 倍。陆程程等<sup>[24]</sup>基于 ZYNQ 硬件架构研究了嵌入式系统中的电容层析图像重建技术,针对 Landweber 迭代算法成像时,相对于 MATLAB 系统运行时间减少 30%~40%。李杰等<sup>[25]</sup>基于 FPGA 平台实现无人机航拍影像进行三维重建,速度与 GPU 相当,功耗显著由于 GPU 方法。

上述立体视觉测量系统的研究与实现均是针对较小数据量图像数据测量系统或对实时性要求不高的重建场景中,而如何提高大数据量下多目视觉测量系统的实时性能,是推广应用中亟需解决的关键问题。本文基于三维扫描机器人,提出一种适用于 ZYNQ MPSOC 硬件部署的多目视觉测量算法架构并搭建完成了分步式多目视觉测量系统。

## 1 多目视觉测量系统

### 1.1 三维扫描测量系统模型

本文采用的三维扫描测量机器人的结构如图 1 所示,包括关节臂式机器人、粘贴有编码标志点的三维激光扫描测头和多台工业相机组成的多目视觉测量系统。

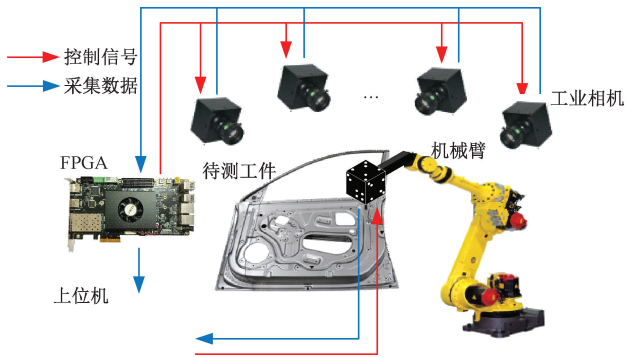


图 1 三维扫描测量机器人

Fig. 1 3D scanning measuring robot

三维扫描测头的 4 个侧面分别贴有 6 个高反光标志点作为控制点参与三维重建。该编码方案是基于交比不变性原理<sup>[26]</sup>设计的,其编码方案如图 2 所示。

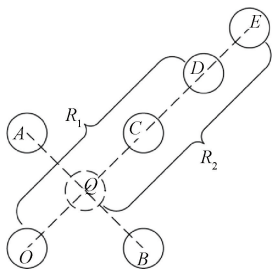


图 2 标志点编码方案

Fig. 2 Flag point coding scheme

编码图案采用黑色背景,粘贴在扫描测头侧面,每种编码形式都是由通过 6 个圆形反光编码标志点 ( $O$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $A$ 、 $B$ ) 排列组合形成的,将反光的编码标志点和红外光源配合使用以减小环境光对标志点识别带来的干扰。

4 个标志点  $O$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  共线,标志点  $A$ 、 $B$  与标志点  $O$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  所在的直线交于空间点  $Q$ 。利用  $OC$  和  $DE$  两段长度对编码形式 1、3 和形式 2、4 进行区分,再通过  $AB$  连线与  $OCDE$  所在线交点  $Q$ ,形成的  $OD$  和  $QE$  段交比对剩下的编码形式进行区分。最终 4 个不同侧面的编码图案如图 3 所示。

基于射影变换的交比不变性原理,通过计算得到的交比值和交点  $Q$  的位置判断是测头的某个面被捕获,从而在相机采集的 4 幅图像中找出同时捕捉到该面图像。

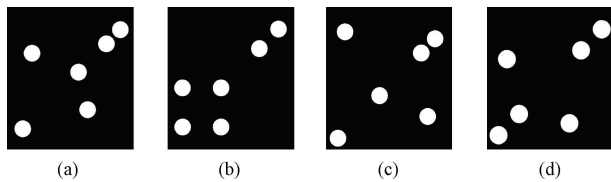


图 3 编码方案

Fig. 3 Coding scheme

再根据每个面上 6 个标志点之间的位置关系,识别出相应点,最终将图像之间的同源像点匹配,完成三维重建。工业机器人按预定路径移动时,可带动三维激光扫描测头扫描被测工件,基于测头的局部坐标系测得大尺寸工件外形点云数据,再结合测头的实时位姿,统一在相机坐标系下,从而得到完整大尺寸工件的高精度表面形貌数据。

### 1.2 立体视觉测量模型

如图 4 所示,针孔相机模型描述了世界坐标系 ( $O_w - X_w Y_w Z_w$ )、相机坐标系 ( $O_c - X_c Y_c Z_c$ )、图像坐标系 ( $O_i - xy$ )、像素坐标系 ( $O_p - uv$ ) 之间的变换关系。世界坐标系下空间点  $L(X_w, Y_w, Z_w)$  到图像坐标系下  $P_i(u_i, v_i)$  的透视投影变换可以表示为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/dx & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f/dy & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}[\mathbf{R}, \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{R}$  是正交旋转矩阵;  $\mathbf{T}$  是三维平移向量;  $\mathbf{0}^T$  表示矩阵  $(0, 0, 0)^T$ ;  $\mathbf{M}$  为内参矩阵。

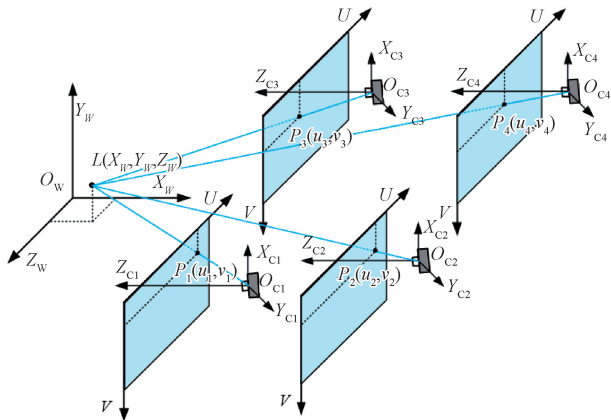


图 4 多目透视投影模型

Fig. 4 Camera perspective projection model



本文采用 4 台工业相机,围绕目标测量区域,并通过直接线性变换法(direct linear transformation, DLT)进行三维重建求解物点空间坐标初值,空间中若干个目标点  $L(X_w, Y_w, Z_w)$  基于空间坐标系与图像像素坐标系之间的转换关系构建共线方程为:

$$\begin{cases} u + \frac{l_1 X + l_2 Y + l_3 Z + l_4}{l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + l_{12}} = 0 \\ v + \frac{l_5 X + l_6 Y + l_7 Z + l_8}{l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + l_{12}} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $l_1 \sim l_{12}$  为相机内外参数的函数,将记为式(3)中非齐次线性方程组的形式。从而将非齐次线性方程组的求解转化为求解矩阵  $A^{-1}$  和  $A^{-1} \cdot b$ , 进而通过像素坐标系下标志点坐标,计算世界坐标系下的空间位置坐标。

$$AX = b \quad (3)$$

由于矩阵  $A$  为对称正定矩阵,为本文采用 Cholesky 分解的变形实现,分解为:

$$A = LDL^T \quad (4)$$

那么等式变为  $LDL^T x = b$ , 等效于求解  $Lz = b, Dr = z$  和  $L^T x = r$ , 展开得到:

$$\begin{aligned} z_1 &= b_1 \\ z_2 &= (b_2 - l_{21}z_1) \\ z_3 &= (b_3 - l_{31}z_1 - l_{32}z_2) \\ &\vdots \\ z_n &= (b_n - \sum_{i=1}^{n-1} l_{ni}z_i) \end{aligned} \quad (5)$$

$$r_n = z_n / d_n \quad (6)$$

其中,  $d_n$  为对角矩阵  $D$  的对角线元素。

$$\begin{aligned} x_n &= r_n \\ x_{n-1} &= r_{n-1} - u_{n-1n-2}x_{n-1} \\ &\vdots \\ x_1 &= r_1 - \sum_{i=2}^{n-1} u_{in}x_i \end{aligned} \quad (7)$$

本文基于上述三维重建计算主要步骤设计系统的三维重建算法任务流水线硬件结构,提高算法的运算效率。

## 2 FPGA 算法实现

### 2.1 基于 ZYNQ MPSOC 的分布式多目视觉测量系统架构

本文系统主要由一个主控单元、 $n$  个测量单元和上位机组成,主控单元由 ZYNQ 主板、ZigBee 无线通信模块和上位机组成,而测量单元由 Camera Link 工业相机、ZYNQ 从板和 ZigBee 无线通信模块组成。在多目视觉测量过程中,测量单元负责图像采集、存储、预处理、连通域标记、灰度重心法以及中心坐标的发送等任务。主控单

元负责收集各个测量单元中心坐标数据,进行标志点拍摄质量评估、标志点匹配以及三维重建。最终,ZYNQ 主板将重建结果通过 UDP 协议发送给上位机,如图 5 为分布式多目测量系统整体示意图。

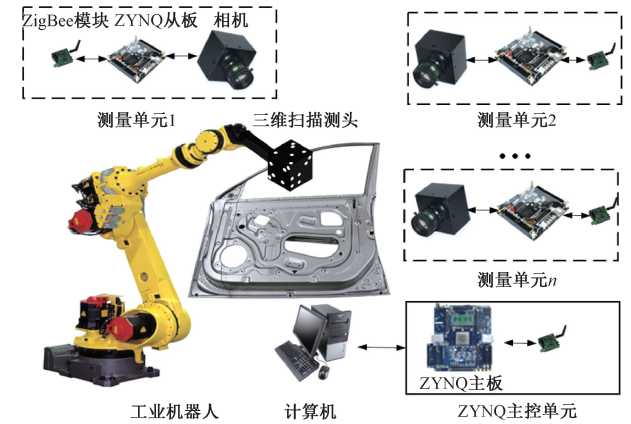


图 5 分布式多目视觉测量系统

Fig. 5 Distributed multivisual measurement system

本文采用 Verilog 语言,基于 ZYNQ Ultrascale + MPSOC, Xilinx Vitis 和 C 文件用于 ZYNQ 中 PS 端软件部分控制, Xilinx Vivado 和 HDL 文件完成 PL 端硬件功能控制,通过 AXI 总线和 DMA 实现 PS 和 PL 端数据交互,基于 ZYNQ MPSOC 的多目视觉测量系统硬件架构如图 6 所示。

### 2.2 图像采集与预处理模块

在图像处理与预处理阶段,本文对来自工业相机的灰度图像其中图像预处理的电路结构如图 7 所示,本文采用 FIFO 作为行缓存器,移位寄存器组成卷积窗口遍历输入图像,采用三级流水线的形式分步骤对输入的像素数据进行比较、排序,最终得到像素区域中值,并通过阈值对目标标志点进行分割,得到仅包含目标点特征的二值化图像像素数据流。

### 2.3 标志点识别与匹配模块

标志点识别与匹配阶段,本文采用改进的连通域标记算法对目标点识别并对其进行任务级流水线处理。如图 8 所示,对图像进行遍历扫描,标记目标像素点,将被标记的像素点的坐标累加到 bram 中对应存储区域,同时在将各标号的像素数量记录于数组  $cnt[]$ 。当发生标记冲突时将对应的标号存入等价表  $table[]$  中。因为连通域标记的目的是得到各连通域像素的坐标累加和,所以在第一遍扫描完成后遍历等价表数组,将标记冲突的标号再次累加,统一后得到各连通域全局的像素坐标累加和,节省一次图像遍历的时间,同时各个任务可以同时并行执行,提高了算法效率。

在连通域标记的基础上,通过质心法求解标志点中



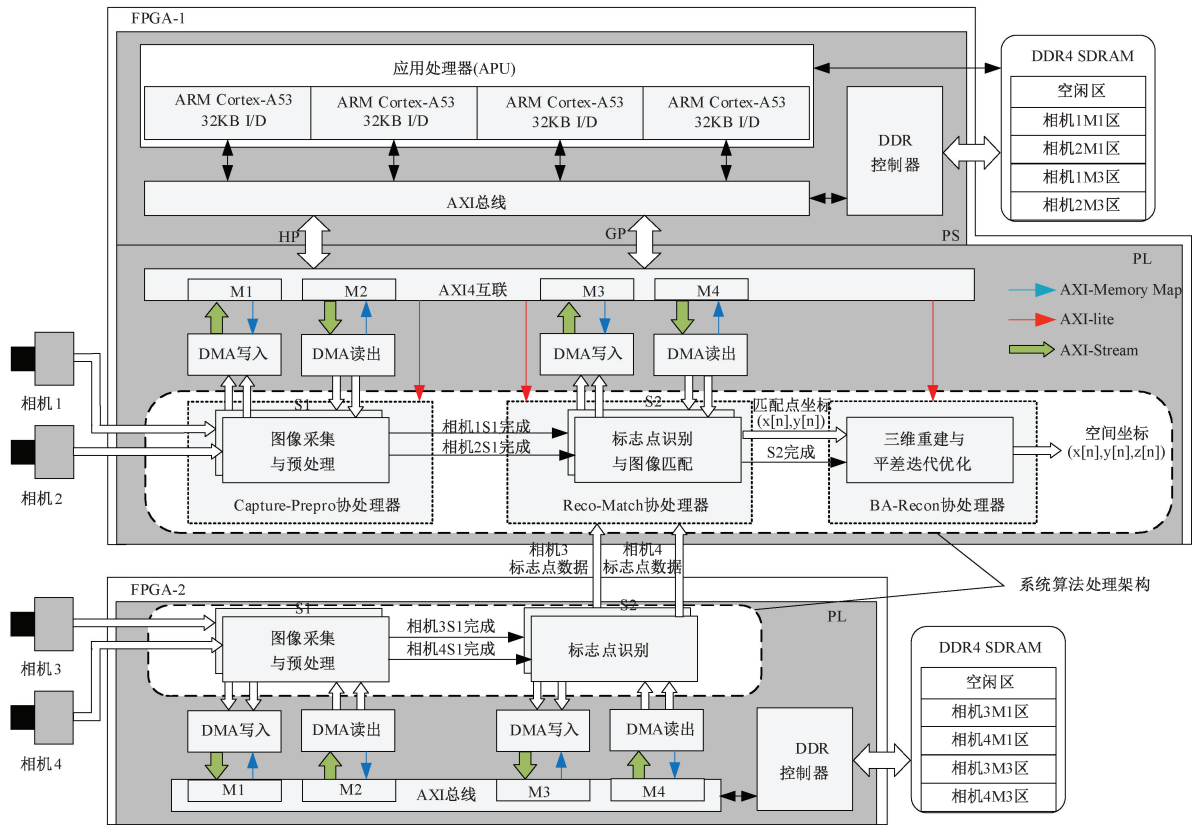


图 6 基于 ZYNQ FPGA 的多目视觉测量系统硬件架构

Fig. 6 Architecture of multi-vision measurement system based on ZYNQ MPSOC

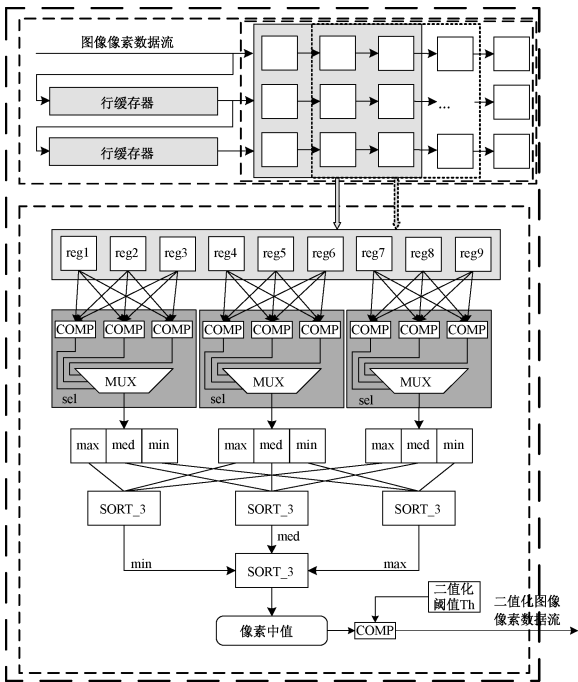


图 7 图像预处理硬件结构

Fig. 7 Image preprocessing hardware structure

心在图像上的像素坐标,如式(8)所示。

$$\begin{cases} x' = \frac{\sum_{(x,y) \in \Omega} x \cdot f(x,y)}{\sum_{(x,y) \in \Omega} f(x,y)} \\ y' = \frac{\sum_{(x,y) \in \Omega} y \cdot f(x,y)}{\sum_{(x,y) \in \Omega} f(x,y)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f(x,y)$  是连通域内坐标为  $(x,y)$  的像素点的灰度值; $\Omega$  是连通域集合,是目标连通域的中心点像素坐标。

计算每个标志点的坐标后,根据图 3 的不同侧面的编码信息对各个标志点坐标识别位置信息并将图像之间的同源像点匹配,并按坐标序列顺序将数据存入 DDR 中。

2.4 三维重建与平差迭代优化

针对本文测量系统,参考文献[27],本文采用改进的分步光束法平差三维重建算法,设计了适用于硬件部署的硬件架构,使得在 ZYNQ MPSOC 上部署时能够以更低的资源消耗实现更高的计算效率,从而满足系统实时性要求。改进的分布光束法平差三维重建算法根据平差迭代中对结果优化影响的大小,将参与迭代的相机内外参数分为两组,分步对参数优化,最后计算各个标志点对

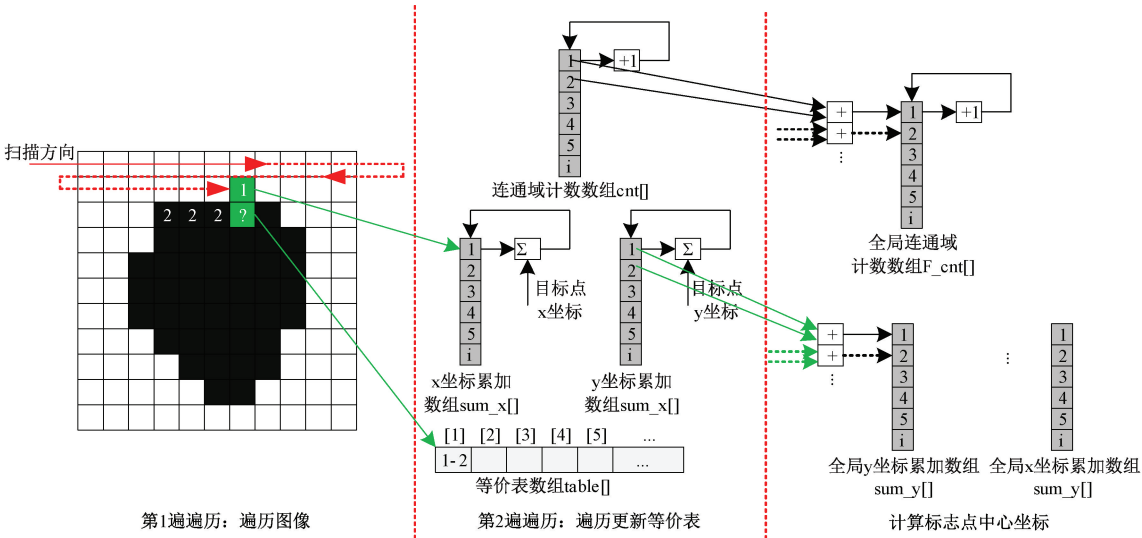


图 8 连通域标记法计算标志点中心坐标

Fig. 8 Connected component labeling-based centroid coordinates of marker points

应的空间三维坐标,具体流程如下:

- 1) 输入经标定或算法求解得到  $N$  台相机的内外参数初值、 $M$  个标志点的空间三维坐标初值;
- 2) 将  $N$  台相机的某个目标参数以外的相机内外参数代入光束法平差模型视作常数,对该目标参数进行优化,得到各标志点空间三维坐标的重投影误差;
- 3) 依次对各类相机内参参数单独优化,得到各标志点空间三维坐标的重投影误差;

4) 将内参参数优化值代入光束法平差模型,视作常数,对相机外参参数和三维空间坐标进行优化,更新外参参数和三维坐标,最终得到高精度标志点空间三维坐标。

本文的三维重建与平差迭代硬件电路主要包含 2 个模块,即迭代初值计算模块和 LM (Levenberg-Marquardt) 法平差迭代模块,基于任务级流水线、共享内存等结构,系统整体算法在占用更少资源的同时提高了运行效率,满足系统实时运算要求,如图 9 所示。

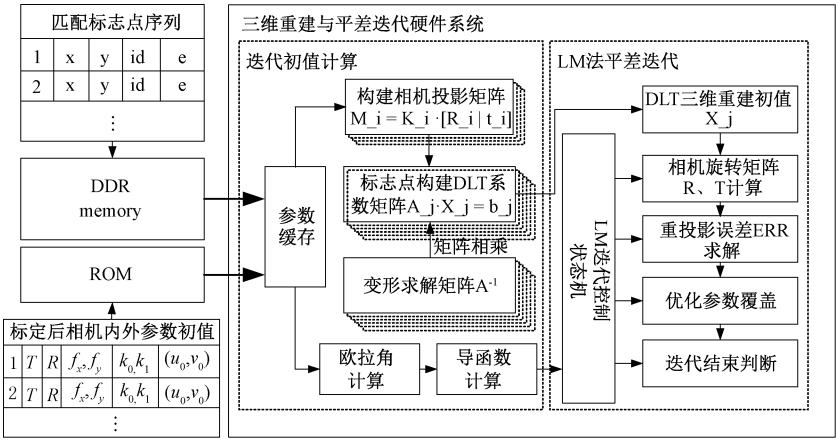


图 9 三维重建与平差迭代硬件系统结构

Fig. 9 Reconstruction and bundle adjustment iteration system architecture in hardware

数据准备阶段主要完成原始数据的读取,并统一准备后续所需的输入数据,从而避免由于同时访问存储空间冲突带来的运算延迟。迭代初值计算模块设计的输入数据包括各相机图像的匹配特征点序列和标定得到的各相机的内外参数初值。匹配特征点序列包含标志点的序号坐标,响应值,特征 ID;相机内外参数初值包括正交旋

转矩阵  $R$ 、三维平移向量  $T$ 、主距  $f_x$  和  $f_y$ 、畸变系数  $k_0$  和  $k_1$ 、主点坐标  $(u_0, v_0)$ 。

利用输入参数得到相机投影矩阵后,对每个标志点构建 DLT 系数矩阵,将重建计算转化为求解式(3)中的非齐次线性方程组。

DLT 重建线性方程的求解对应的硬件结构如图 10





投影误差迭代收敛趋势如图 13 所示。

表 2 ZYNQ MPSOC XCZU5EV 逻辑资源

资源类型	总量	消耗量	消耗比例/%
System Logic Cells	256 200	131 235	51. 22
CLB Flip-Flops	234 240	116 868	49. 89
CLB LUTs	117 120	58 434	49. 89
Block RAM Blocks	144	73	50. 69
DSP Slices	1 248	296	23. 72
CMTs	4	2	50

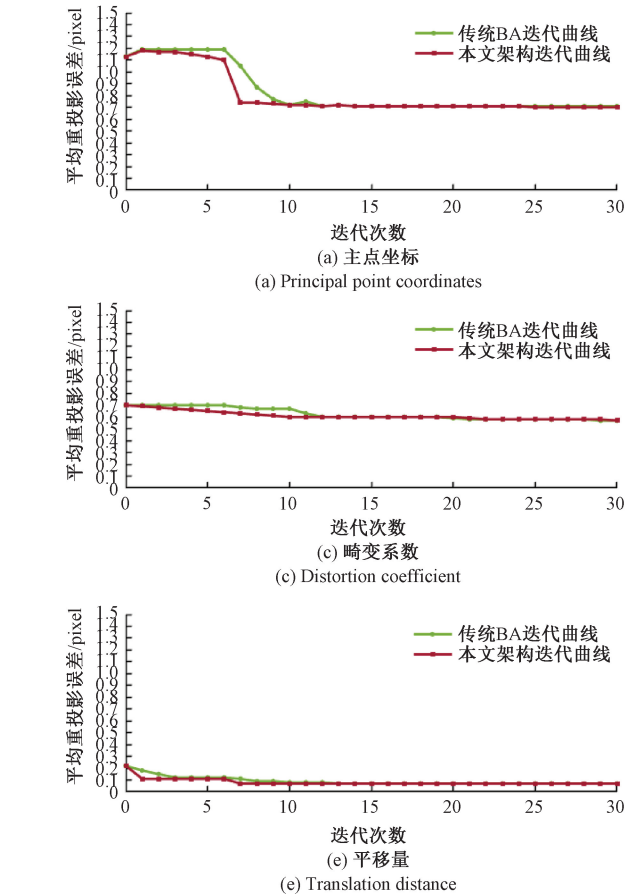


图 13 相机参数迭代效果对比

Fig. 13 Iteration effect comparison of camera parameters

本文 ZYNQ MPSOC 系统的各项速率指标如表 4 所示。基于 ZYNQ MPSOC 的多目视觉测量系统与基于 OpenCV 的 PC 上位机的运行速度对比情况如表 5 所示。

表 4 系统速率指标

速率指标	参数值
系统时钟频率/MHz	100
图像数据吞吐率/(Mb/s)	5 414. 4
帧率/fps	42. 3

表 3 ZYNQ MPSOC XCZU9EG 逻辑资源

Table 3 Logic resource of ZYNQ MPSOC( XCZU9EG)

资源类型	总量	消耗量	消耗比例/%
System Logic Cells	599 550	205 104	34. 21
CLB Flip-Flops	548 160	194 876	35. 55
CLB LUTs	274 080	97 438	35. 55
Block RAM Blocks	912	287	31. 50
DSP Slices	2 520	1 464	58. 10
CMTs	4	3	75

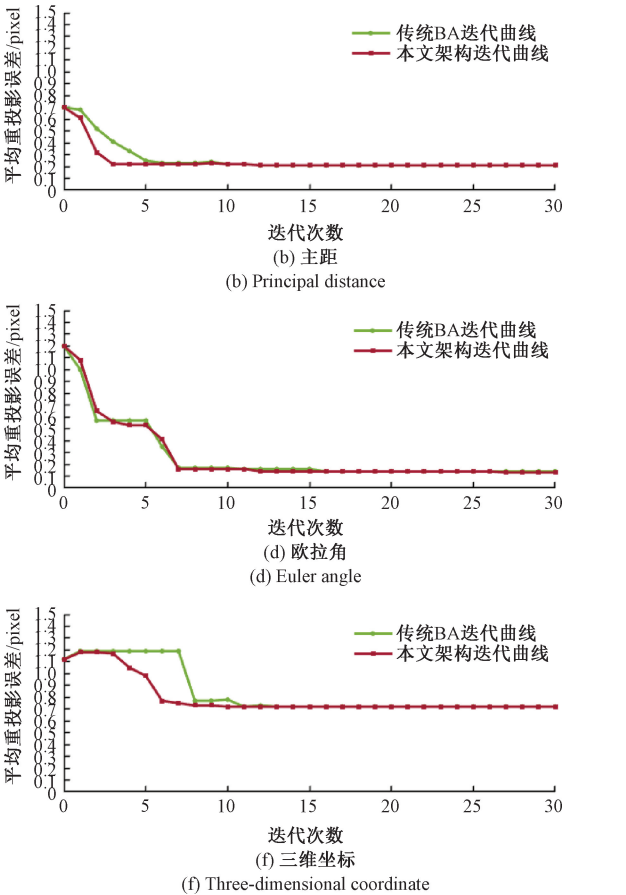


表 5 ZYNQ 系统与 PC 运行速度对比

Table 5 Comparison of running speed between ZYNQ and PC

单帧处理时长/ms	ZYNQ MPSOC	PC
图像预处理及标志点匹配	14. 3	966. 6
DLT 算法三维重建	0. 6	11. 3
分步光束法平差优化	22. 0	966. 6

由图 13 可见,在光束法平差重建算法迭代中,本文提出的基于 ZYNQ MPSOC 平台的光束平差三维重建系统架构在三维坐标以及平移量参数的迭代次数上明显优于传统上位机迭代,整体上减少了迭代到稳定下的迭代

次数,而目标点空间三维坐标的平均重投影误差仿真实验结果优于 0.72 pixel,由表 4、5 可见,本文系统处理帧率达到 42.3 fps,三维重建和分布光束平差算法的运行速度为上位机的 18 倍以上。

3.2 扫描测头动态测量实验

为了评估分布式多目视觉测量系统的动态目标测量性能,通过机械臂带动激光扫描测头进行运动,使用本文系统和 Creaform 公司的 C-track 光学动态跟踪系统同时测量测头的空间位置。C-Track 系统的测量精度为

0.05 mm,重复精度为 0.01 mm。将 C-Track 测量系统长度测量值作为基准,对本文系统动态测量的实时性能进行评估。

本文分别在 Fanuc 20 MiA 机器人末端分别以 20、50、100 mm/s 的设定速度组别沿设定方向分段直线移动若干段并同步触发测量机械臂末端移动长度,C-Track 测量系统和本文测量系统的测量结果如表 6 所示,第 1、2、3 组分别为 20、50、100 mm/s 设定移动速度下分段测量结果,L1~L8 为不同的直线位移段。

表 6 扫描测头动态对比测量结果  
Table 6 Dynamic target comparison measurement results of scanning sensor

测量组别	\	L1/mm	L2/mm	L3/mm	L4/mm	L5/mm	L6/mm	L7/mm
1	本文系统	258.677	312.188	278.562	307.256	243.125	305.895	285.265
	C-Track	258.700	312.236	278.523	307.199	243.053	305.910	285.236
	误差	-0.023	-0.048	0.039	0.057	0.072	-0.015	0.029
2	本文系统	257.115	312.958	279.752	306.676	244.133	304.225	286.566
	C-Track	257.071	312.995	279.669	306.632	244.081	304.274	286.498
	误差	0.044	-0.037	0.083	0.044	0.052	-0.049	0.068
3	本文系统	257.428	311.868	279.154	306.258	245.167	305.225	285.553
	C-Track	257.501	311.925	279.092	306.129	245.105	305.178	285.493
	误差	-0.073	-0.057	0.062	0.129	0.062	0.047	0.060

由表 6 可知,本文搭建的分布式多目视觉测量系统在激光扫描测头运动速度 20、50、100 mm/s 下,跟踪测量相对于 C-Track 测量系统最大误差分别为 129 μm,标准差为 43 μm,可满足动态目标测量需求。

4 结 论

本文提出了一种基于 ZYNQ MPSOC 平台的分布式多目视觉测量系统,搭建了高效的系统硬件架构,在 ZYNQ MPSOC 平台上完成了多相机图像采集、标志点识别与图像匹配、分步光束法平差三维重建等算法,可以测量三维扫描测量机器人中测头的空间位置。

实验结果表明,本文提出的基于 ZYNQ MPSOC 平台的分布式光束平差三维重建架构,可在更少的迭代次数下达到收敛值,提高系统运算实时性能。同时本文硬件系统的各项资源消耗均在合理区间内,避免了系统时序不收敛等问题。设计的系统可在 100 MHz 的时钟源下稳定运行,能够同时对 4 路高清图像数据(2 048×2 048×8 bits)实现 42.3 fps 的处理速度。同时,目标点空间三维坐标的平均重投影误差仿真实验结果优于 0.72 pixel,动态目标测量实验最大误差为 129 μm。本文设计的基于 ZYNQ MPSOC 平台的分布式多目视觉测量系统,能够满足多目视觉测量系统中动态目标的实时高精度测量需求。

参考文献

[ 1 ] LI J, WANG M, QU L, et al. Research on three-dimensional scanning path planning of casing parts based on industrial robot[J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(10):6162.

[ 2 ] ZHANG Z P. A new measurement method of three-dimensional laser scanning for the volume of railway tank car (container)[J]. Measurement, 2021, 170:108454.

[ 3 ] HINZMANNI T, CADENA C, NIETO J, et al. Flexible trinocular: Non-rigid multi-camera-IMU dense reconstruction for UAV navigation and mapping [C]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2019: 1137-1142.

[ 4 ] SHIBA Y, ONO S, FURUKAWA R, et al. Learning based active 3D measurement technique using light field created by video projectors [J]. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2019, 11(1): 1-14.

[ 5 ] MARTÍNEZ H G, GIORGI G, EISSFELLER B. Pose estimation and tracking of non-cooperative rocket bodies using time-of-flight cameras [J]. Acta Astronautica, 2017, 139: 165-175.

[ 6 ] 刘志海,代振锐,田绍鲁,等. 非接触式三维重建技术综述[J]. 科学技术与工程, 2022,22(23):9897-9908.

LIU ZH H, DAI ZH R, TIAN SH L, et al. Review of non-contact 3D reconstruction techniques [J]. Science

- Technology and Engineering, 2022, 22(23): 9897-9908.
- [ 7 ] BAI X, RAO C, WANG X. Shape vocabulary: A robust and efficient shape representation for shape matching[J]. IEEE Trans Image Process, 2014, 23(9): 3935-3949.
- [ 8 ] PARK H, LEE H, SULL S. Efficient viewer-centric depth adjustment based on virtual fronto-parallel planar projection in stereo 3D images[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2014, 16(2): 326-336.
- [ 9 ] XU T, CHEN Z, JIANG Z, et al. A real-time 3D measurement system for the blast furnace burden surface using high-temperature industrial endoscope [ J ]. Sensors, 2020, 20(3): 869.
- [ 10 ] TANG Y, LI L, WANG C, et al. Real-time detection of surface deformation and strain in recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns via four-ocular vision [ J ]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2019, 59: 36-46.
- [ 11 ] QIAO Y, LV N, JIA B. Multiview intelligent networking based on the genetic evolution algorithm for precise 3D measurements [ J ]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2023, 20(8): 14260-14280.
- [ 12 ] HOU X, LI M, LV Q, et al. Three-dimensional measurement method for tube's endpoints based on multi-view stereovision[C]. International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems. Singapore: Springer Singapore, 2021: 628-635.
- [ 13 ] 张君轶, 陈仁文, 刘飞, 等. 基于嵌入式视觉的无人机目标定位系统[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(2): 171-176.
- ZHANG J Y, CHEN R W, LIU F, et al. Uav target location system based on embedded vision[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(2): 171-176.
- [ 14 ] BAGGA P J. Real time depth computation using stereo imaging [ J ]. Journal Electrical and Electronic Engineering, 2013, 1(2): 51-54.
- [ 15 ] 刘阳, 冯进良, 黄伟, 等. 基于 FPGA 的三目半全局匹配算法设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 202-210.
- LIU Y, FENG J L, HUANG W, et al. Design and implementation of trimesh semi-global matching algorithm based on FPGA [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 202-210.
- [ 16 ] LENTARIS G, MARAGOS K, STRATAKOS I, et al. High-performance embedded computing in space: Evaluation of platforms for vision-based navigation [ J ]. Journal of Aerospace Information Systems, 2018, 15(4): 178-192.
- [ 17 ] 于希明, 彭宇, 姚博文, 等. 基于 FPGA 并行计算的多阈值分级海陆分割方法 [ J ]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 166-177.
- YU X M, PENG Y, YAO B W, et al. Multi-threshold hierarchical sea-land segmentation method based on FPGA parallel computation [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 166-177.
- [ 18 ] 戴伟杰, 王衍学, 李昕鸣, 等. 面向 FPGA 部署的改进 YOLO 铝片表面缺陷检测系统 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 160-167.
- DAI W J, WANG Y X, LI X M, et al. Improved YOLO aluminum sheet surface defect inspection system for FPGA deployment [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 160-167.
- [ 19 ] 龚泺宇, 郭世旭, 田皓文. 基于 FPGA 的多波束声纳发射机与接收机模块化设计 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 141-148.
- GONG M Y, GUO SH X, TIAN H W. Modular design of multi-beam sonar transmitter and receiver based on FPGA [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 141-148.
- [ 20 ] HONEGGER D, OLEYNIKOVA H, POLLEFEYS M. Real-time and low latency embedded computer vision hardware based on a combination of FPGA and mobile CPU [ C ]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014: 4930-4935.
- [ 21 ] HE W Z, LU Z K, LIU X, et al. A real-time and high precision hardware implementation of RANSAC algorithm for visual SLAM achieving mismatched feature point pair elimination [ J ]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2024, 71(11): 5102-5114.
- [ 22 ] YANG Z H, LIANG Y, LIN D Q, et al. Real-time stereo vision hardware accelerator: Fusion of SAD and adaptive census algorithm [ J ]. IEEE Access, 2024, 12: 154975-154989.
- [ 23 ] ZHANG Y, CHEN G. An FPGA-accelerated ultra-high-speed stereo rectification for event-based camera [ C ]. IEEE 4th International Conference on Electronics Technology, 2021.
- [ 24 ] 陆程程, 胡红利, 唐凯豪, 等. 嵌入式电容层析成像系统的成像加速方法研究 [ J ]. 西安交通大学学报, 2024, 58(3): 183-192.
- LU CH CH, HU H L, TANG K H, et al. Research on



- an imaging acceleration method for embedded systems of electrical capacitance tomography [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(3): 183-192.
- [25] 李杰, 李一轩, 吴天生, 等. 基于 FPGA 无人机影像快速低功耗高精度三维重建[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(3): 486-499.
- LI J, LI Y X, WU T SH, et al. Fast, low-power and high-precision 3D reconstruction of UAV images based on FPGA [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(3): 486-499.
- [26] 刘虹, 王文祥, 李维诗. 三维扫描测头精确跟踪的摄影测量方法[J]. 计算机应用, 2017, 37(7): 2057-2061.
- LIU H, WANG W X, LI W SH. A photogrammetric method for accurate tracking of 3D scanning probe [J]. Practical Computer Literacy, 2017, 37(7): 2057-2061.
- [27] 别梓钊, 张瑞, 李维诗. 多目视觉测量系统的光束法平差改进[J]. 计测技术, 2021, 41(4): 23-27.
- BIE Z F, ZHANG R, LI W SH. Improvement of bundle adjustment for multi-vision measurement system [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(4): 23-27.

## 作者简介



**赵文锐**, 2022 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为 FPGA 算法加速。

Email: zwr2059341302@163.com

**Zhao Wenrui** received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include FPGA algorithm operation acceleration.



**张瑞** (通信作者), 2017 年于天津大学获得博士学位, 现为合肥工业大学仪器科学与光电工程学院研究生导师, 主要从事大尺寸视觉测量、表面缺陷检测方面的研究。

E-mail: zhangrui@hfut.edu.cn

**Zhang Rui** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2017. Now he is a master's tutor in the School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering of Hefei University of Technology. His main research interests include the large-scale vision measurement and the surface defect detection.