

文章编号 1004-924X(2025)23-3618-12

分步光束法平差多目视觉测量系统

张 瑞^{1,2}, 周昌璿¹, 卞 富¹, 薛 安¹, 张 进^{1,2}, 李维诗^{1,2*},
杨 飞³, 郑泽文³

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

摘要: 凭借测量精度高、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高精度空间定位中应用广泛, 但现有基于光束法平差的多目视觉测量系统的三维重建精度和速度仍无法满足动态目标空间位置的高精度快速测量需求。因此, 提出了一种基于分步光束法平差的多目视觉测量系统重建算法, 分步优化了不同数量级的系统参数, 并通过 FPGA 平台实现了重建算法的快速运行。实验结果表明, 本文提出的分步光束法平差重建算法的平均空间重投影误差小于 $68\ \mu\text{m}$, 优于直接线性变换重建算法与传统光束法平差重建算法的精度。该 FPGA 硬件架构方案可同时对 4 路高清图像数据 ($2\ 048 \times 2\ 048 \times 8\ \text{bit}$) 实现约 40 frame/s 的处理速度, 满足动态目标空间位置的实时测量需求。

关键词: 多目视觉测量; 分步光束法平差; 空间重投影误差; 现场可编程门阵列

中图分类号: TB96 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20253323. 3618

CSTR: 32169. 14. OPE. 20253323. 3618

Stepwise bundle adjustment-based multi-camera vision measurement system

ZHANG Rui^{1,2}, ZHOU Changyun¹, BIAN Fu¹, XUE An¹, ZHANG Jin^{1,2}, LI Weishi^{1,2*},
YANG Fei³, ZHENG Zewen³

- (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)

* Corresponding author, E-mail: weishili@hfut.edu.cn

Abstract: Due to its high measurement accuracy, rapid acquisition speed, large measurable range, and non-contact characteristics, the multi-camera vision measurement system has been widely applied to high-precision spatial positioning of dynamic targets in aerospace, automotive, and related fields. However, existing multi-camera vision measurement systems based on bundle adjustment cannot simultaneously satisfy

收稿日期: 2025-08-05; 修订日期: 2025-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52175504); 国家重大科研仪器研制资助项目 (No. 51927811); 安徽省市场监督管理局科技计划资助项目 (No. 2022MK050)

the stringent requirements of high accuracy and high speed in three-dimensional reconstruction of dynamic target positions. In this study, a reconstruction algorithm for multi-camera vision measurement systems based on stepwise bundle adjustment is proposed. System parameters with different orders of magnitude are optimized sequentially, and the rapid execution of the reconstruction algorithm is implemented on an field-programmable gate array (FPGA) platform. Experimental results demonstrate that the proposed stepwise bundle adjustment reconstruction algorithm achieves an average spatial reprojection error of less than $68\text{ }\mu\text{m}$, outperforming both the direct linear transformation reconstruction algorithm and the conventional bundle adjustment reconstruction algorithm. The designed FPGA hardware architecture attains a processing speed of approximately 40 frame/s for four channels of high-definition image data ($2\text{ }048\times 2\text{ }048\times 8\text{ bit}$) simultaneously, thereby meeting the real-time, high-precision measurement requirements for the spatial positioning of dynamic targets.

Key words: multi-camera vision measurement; stepwise bundle adjustment; spatial reprojection error; Field-Programmable Gate Array (FPGA)

1 引 言

空间动态目标测量技术在航空、航天、航海、汽车制造等工业领域的飞行器、卫星、船舶及车辆的姿态和轨迹的控制优化、精度提高、效率升级和安全保障等方面具有重要作用。张广军院士在第十三届图像图形技术与应用学术会议中提到“随着我国航天、国防、铁路等领域快速发展,如何能够实时、精确、动态地测量物体的三维形貌、位置和姿态成为迫切急需的核心技术之一,这决定着高端装备的性能和安全”。此类大空间动态目标的测量问题是世界性科学难题,也是精密测量领域研究的前沿问题。因此,实现对大尺寸空间目标的高精度测量对工业生产有着重要的学术研究价值和经济价值。

得益于高速、高分辨图像传感器件的发展,非接触的大空间立体视觉测量技术具有测量精度高、效率高、跟踪性能好等优点,因此在大空间动态目标测量任务中成为非常重要的测量手段^[1-2]。近年来,面向大视场、动态目标的视觉测量技术日益被国内外学术界所重视,研究重点在于如何提高视觉系统的测量精度和速度。

单目视觉作为双目视觉的基础,其理论发展与实践优化为双目视觉系统的构建提供了关键支撑。传统单目视觉方法如傅里叶变换轮廓术、

相移轮廓术等通过条纹相位分析实现三维重建。王邴等改进圆形条纹投影,结合 Gerchberg 迭代使重建误差降至 0.06 mm ^[3]。侯艳丽等提出时空三频相位展开法,抗噪重建误差降低了 56% ^[4]。李付谦等通过伽马校正与双相移法抑制正交光栅串扰,相位误差减少了 91% ^[5]。

单目视觉方法的突破性改进不仅完善了相位提取理论体系,更为双目视觉奠定了高精度基础。天津大学段发阶团队提出双目视觉与二维棋盘格靶标融合方法,机械臂绝对定位精度提升 67% ^[6]。同济大学童小华团队提出圆形目标尺度自适应跟踪方法,定位精度达 3.2 mm (RMSE)^[7]。东京大学赵南等设计视觉动态补偿系统,轨迹最大误差由 8.45 mm 降至 1.34 mm ^[8]。中国科学技术大学顾永刚团队研制了近红外多相机系统,其跟踪精度达 0.093 mm ^[9]。福州大学朱明珠团队开发了分布式视觉定位系统,手术器械跟踪误差不超过 0.207 mm ^[10]。肖庆宇等通过因子图集成 TCN 方法,网球轨迹预测误差降低了 63.6% ^[11]。扬州大学夏宇团队提出多传感器融合框架,位姿估计 RMSE 减少了 $2.86\sim 3.23\text{ m}$ ^[12]。长春理工大学刘麒麟团队实现了多视图动态摄影测量,Z 方向 RMSE 小于 0.042 mm ^[13]。许长珍团队提出视觉惯性融合策略,提升了移动机器人的定位精度^[14]。

为提升三维重建与定位的整体精度,光束法平差广泛应用于空间动态目标测量领域,该方法通过最小二乘法降低平面重投影误差。王建荣团队提出基于LMCCD影像的EFP光束法平差和三线阵相机重组方法,实现相机参数的在轨标定^[15]。宋胜嘉团队提出一种联合FAST特征提取与固定基线约束的双像光束法平差标定方法,标定后误差显著优于普通双像光束法平差^[16]。石竹风等提出基于T-MAC激光跟踪与机器人的高精度定位光束法平差优化方法,优化后基准点测量RMSE为0.194 2 mm^[17]。郭迎超等提出一种基于光束法平差的双线阵相机高精度标定方法,该方法的重投影误差较传统方法降低75.01%^[18]。

为进一步提高系统测量精度,本文对光束法平差进行了改进,提出了基于分步式光束法平差的三维重建算法,并应用于空间动态目标测量任务中。由于FPGA可为大运算量和强并行性的图像处理算法提供优越的解决方案,可满足本文视觉测量系统的动态测量需求,因此,本文设计了一种FPGA硬件架构方案以保证分步式光束法平差的高效运行。

2 多目视觉测量系统整体方案

2.1 系统模型

三维扫描测量机器人的结构如图1所示,由关节臂式机器人、粘贴有编码标志点的三维激光扫描测头和多台工业相机等组成多目视觉

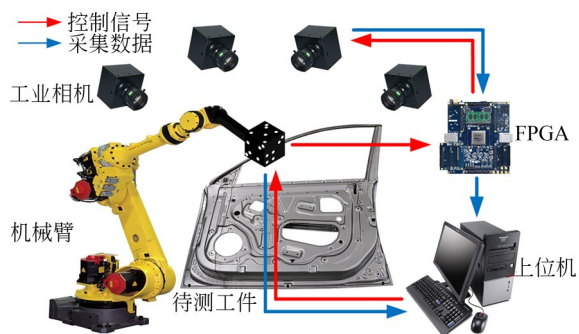


图1 三维扫描测量机器人

Fig. 1 3D scanning measuring robot

测量系统。为满足对扫描测头的全程实时跟踪,将多台工业相机分布于实验室上方,使得有效视场区域可完全覆盖扫描测头的运动区域。

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^[19]设计的,每个标志点的位置精度是由高精度设备DPA测得。具体如图2所示。

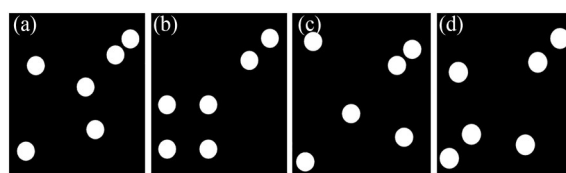


图2 编码方案

Fig. 2 Coding scheme

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,实时测得大尺寸工件外形的点云数据。然而,此时的点云数据是基于测头的局部坐标系下的部分工件数据,需结合多目视觉测量系统来测量测头的实时空间位姿,将点云数据统一在同一坐标系下,才能得到完整大尺寸工件的外形数据。

传统三维重建算法的速度快,但精度较低,而光束法平差重建算法利用多目视觉测量系统中的多视图特性,提高了系统重建精度,但速度较慢,难以满足空间动态目标的测量需求。因此,本文提出了一种分步光束法平差重建算法,分两步对相机内外参数以及标志点空间三维坐标进行优化,并在设计的FPGA硬件架构中实现算法的快速运行,从而满足空间动态目标的测量需求。

2.2 系统架构

本文选用2套FPGA开发板(下文简称为开发板A,开发板B)进行开发。由开发板A,B分别实现对2台工业相机的图像采集、图像预处理、连通域标记、中心坐标求取等图像处理功能,开发板B将其图像处理得到的标志点中心坐标经UDP通信协议传输至开发板A,由逻辑资源较多的开发板A实现标志点坐标三维重建、分步光束

法平差优化等功能。基于FPGA的多目视觉测量系统架构如图3所示。

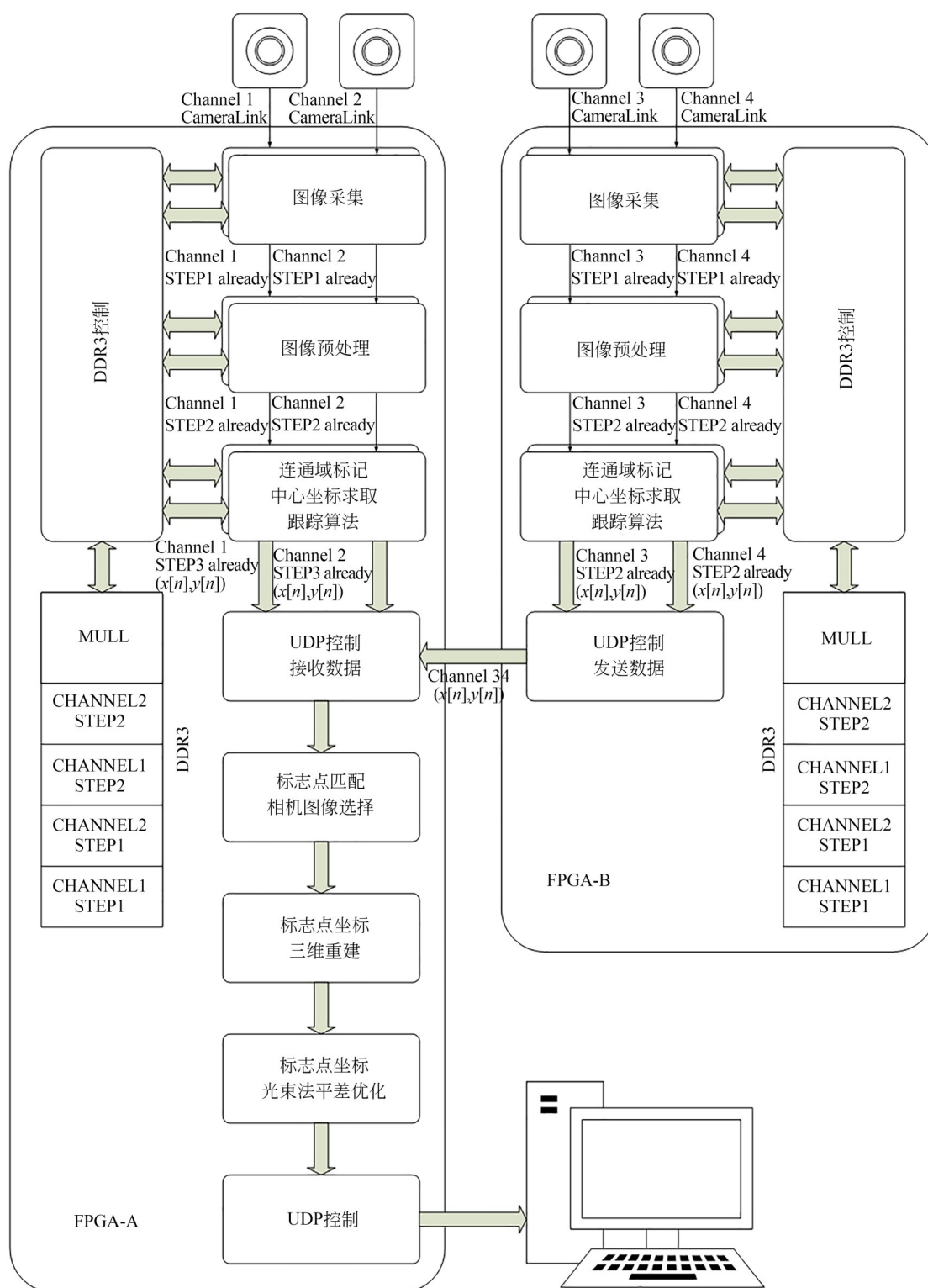


图3 基于FPGA的多目视觉测量系统架构示意图

Fig. 3 Architecture diagram of multi-vision measurement system based on FPGA

3 分步光束法平差重建

3.1 光束法平差重建算法

光束法平差(Bundle Adjustment, BA)的基本原理及多相机视觉测量系统中建立各相机坐标系如图4所示。当空间中的多点被多台相机同时成像,则会得到多条“成像光线束”,以“光束”作为模型中诸多待测参数的约束关系,建立方程组,采用最优化方法求解待测参数并平差优化,因此,光束法平差又被称作空间最小二乘法,其本质是一个非线性最小二乘问题^[20]。

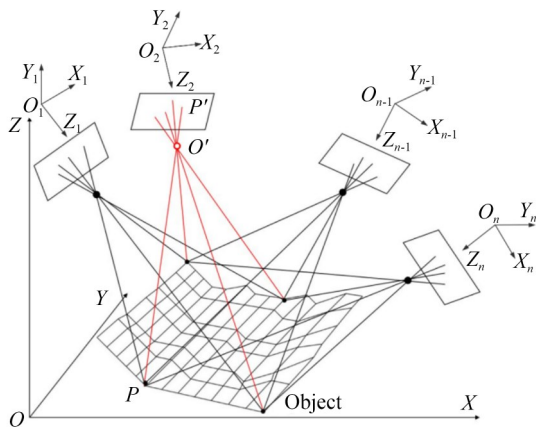


图4 光束法平差原理及各相机坐标系

Fig. 4 Principle of bundle adjustment and camera coordinate systems

在计算机视觉领域,常以重投影误差作为各参数的精度评价指标。但在相机成像时,物点与光心之间的距离远大于像点与光心之间的距离,即物距 L 远大于主距 f 。根据相似三角形原理,像点的微小误差会在物方被成比例放大,以原重投影误差作为三维重建精度的评价标准已不合适,因此本文采用空间重投影误差^[21]。

定义摄影比例尺为:

$$m = L/f. \quad (1)$$

像方坐标的单位为像素,物方坐标的单位为 mm,改进摄影比例尺为:

$$\begin{cases} m_x = L/f_x \\ m_y = L/f_y \end{cases}. \quad (2)$$

定义空间重投影误差为:

$$e = \sqrt{m_x^2 (u - u')^2 + m_y^2 (v - v')^2}. \quad (3)$$

针对本文的研究目标,定义所有空间重投影误差的平方和为目标函数:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e_{mn}^2 = \frac{1}{2} e^T e. \quad (4)$$

非线性最优化求解方法是将目标函数以 Taylor 级数展开,舍去其高阶项,将非线性目标函数近似线性化,通过迭代算法求解,直至逼近最优目标。非线性最小二乘问题的最优化求解主要有最速下降法、牛顿法、高斯牛顿法、LM (Levenberg-Marquardt) 法等^[22]。其中,最速下降法以负梯度方向作为迭代方向,算法复杂度低,但收敛速度慢;牛顿法可实现二阶收敛速度,但算法复杂度较高;高斯牛顿法的算法复杂度较低,可满足近似二次收敛速度,但可能出现雅克比矩阵奇异导致无法迭代;LM 法基于信赖域算法,解决了高斯牛顿法中雅克比矩阵奇异的问题,综合了最速下降法和高斯牛顿法的优点,故本文采用 LM 法求解光束法平差模型。

3.2 分步光束法平差重建算法模型

对于基于 FPGA 的多目视觉测量系统,现有的相机标定方法的精度难以满足实际测量的精度需求,故本文采用的光束法平差模型不仅优化标志点的空间三维坐标,也会二次优化相机内外参数。

多目视觉测量系统采用的工业相机分辨率为 $2\,048 \times 2\,048$,则主点坐标 (u_0, v_0) 的理论值为 $(1\,024, 1\,024)$,镜头焦距为 12.5 mm,因相机工作时的物距远大于主距,故将焦距视为主距的近似值,即 f 的近似理论值为 12.5 mm。图像的像素尺寸 dx, dy 均为 $5.5\,\mu\text{m}$,则相机平面两个方向上的主距 f_x, f_y 的近似理论值均为 2 272.7。镜头的畸变系数值一般在 10^{-1} 数量级,相机外部参数由系统各相机的位姿有关,在当前实验环境中,平移向量值约为 1 000~3 000 mm。欧拉角的理论取值为 $0 \leq A_x, A_y, A_z \leq \pi$ 。在当前实验环境中,空间点的三维坐标值 $(X, Y, Z)_i$ 值约为 1 000~3 000 mm。

由上述分析可知,参与光束法平差运算的各参数初值数量级差异较大。通过实验发现,在迭代过程中,不同数量级的参数迭代步长比较接近,导致较大数量级的参数优化效果明显,而较小数量级的参数无明显优化效果,即有数量级差

距的不同参数共同参与迭代运算的优化效果有限。综合考虑物理意义和数量级,可将各参数分为如下 6 类:即主点坐标(u_0, v_0);主距 f_x, f_y ;畸变系数 k_0, k_1 ;欧拉角 A_x, A_y, A_z ;三维平移量 T_x, T_y, T_z ;三维点坐标(X, Y, Z)。为了研究各参数优化结果分别对整体优化结果的影响程度,并作为不同参数分组的依据,采用如下步骤:

(1)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)以主点坐标(u_0, v_0)为例,将 N 台相机的除主点坐标(u_0, v_0)以外的其余参数视作常数代入光束法平差模型中,对 N 台相机的主点坐标(u_0, v_0)进行优化,得到各标志点空间三维坐标的空间重投影误差;

(3)同理,依次对各类参数进行单独优化,得到不同情况下的各标志点空间三维坐标的空间重投影误差;

(4)对比得到的各标志点空间三维坐标的 6 组空间重投影误差,评估各类参数对整体优化的影响程度;

(5)将收敛速度较快、优化效果显著的参数记作第 1 组,将其他参数记作第 2 组;

(6)将第 2 组参数的初值视作常数代入光束法平差模型中,对第 1 组参数进行优化;

(7)将第 1 组参数的优化值视作常数代入光束法平差模型中,对第 2 组参数进行优化,得到高精度的相机内外参数、标志点空间三维坐标。

3.3 分步光束法平差重建算法验证

以 3 台相机为例,布置于合适的空间位置中,使其公共视场覆盖测头的活动区域。经相机标定得到各相机内外参数,经图像处理求得三维扫描测头侧面粘贴的高反光标志点图像中心的二维像素坐标初值,采用 DLT 算法求得高反光标志点在世界坐标系中的三维坐标重建初值。经测试,对于当前系统的优化算法,迭代 20 次后的重投影误差可趋于稳定,迭代 50 次时可近似满足迭代终止条件,故本文选择的迭代次数为 50。依次对各类参数做单独优化,各高反光标志点空间三维坐标的空间重投影误差下降趋势如图 5 所示。结果表明,在光束法平差重建算法中,不同的参数对最终优化结果的影响程度不同,主点坐标(u_0, v_0)、主距 f_x, f_y 、欧拉角 A_x, A_y, A_z 、三维平

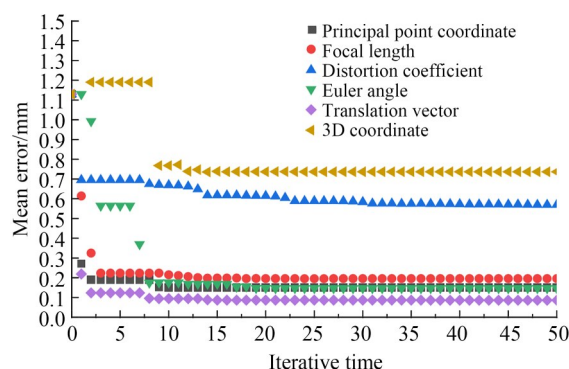


图 5 重投影误差优化效果对比

Fig. 5 Comparison of reprojection error optimization effect

移量 T_x, T_y, T_z 等对最终优化结果的影响较大,而畸变系数 k_0, k_1 、空间点三维坐标(X, Y, Z)对最终优化结果的影响较小。因此,将主点坐标、主距、欧拉角、三维平移量等参数记做第 1 组,畸变系数和空间点三维坐标记为第 2 组进行分组优化,则基于分步光束法平差的三维重建算法的流程如图 6 所示。

分别采用传统光束法平差算法、分步光束法

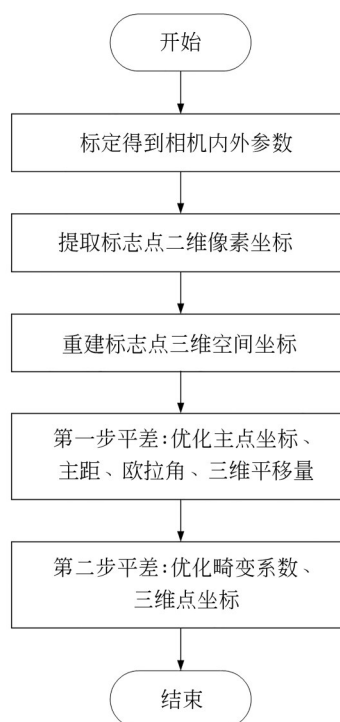


图 6 分步光束法平差重建算法流程

Fig. 6 Flowsheet of stepwise bundle adjustment reconstruction algorithm

平差算法对上述各参数初值进行优化运算,各标志点空间重投影误差初值以及两种算法的优化结果如表 1 所示。

表 1 标志点空间重投影误差优化效果对比

Tab. 1 Comparison of optimization effect of spatial reprojection error of marker points (mm)

标志点	重建初值	传统光束平差	分步光束平差
1	0.852	0.176	0.046
2	0.483	0.121	0.074
3	2.112	0.103	0.034
4	0.812	0.128	0.039
5	0.466	0.156	0.072
6	2.052	0.142	0.094
平均值	1.130	0.138	0.060

由表 1 可知,各标志点三维坐标初值的平均空间重投影误差为 1 130 μm ,传统光束法平差优化后的平均空间重投影误差为 138 μm ,分步光束法平差优化后的平均空间重投影误差为 60 μm 。对比可知,分步光束法平差重建算法有更加显著的优化效果。

相比于传统光束法平差算法,分步光束法平差算法的实现相对复杂,对硬件资源要求更高,传统光束法平差算法在单台计算机上即可运行。为了满足在高动态环境下的测量需求,提高扫描测头空间位置的实时测量速度,本文提出一种 FPGA 硬件架构方案,以保证分步式光束法平差的高效运行。

4 分步光束法平差重建算法的 FPGA 实现

本文设计的优化算法的 FPGA 实现方案如图 7 所示。将标定得到的相机内外参数初值缓存在片内 RAM,需开发 DLT 算法重建模块,用于求解各标志点的三维空间坐标初值;开发欧拉角求解、导函数求解等模块,实现 LM 法中雅克比矩阵的计算;开发矩阵运算器、旋转矩阵求解、重投影误差求解等 LM 法中涉及的相关运算模块,用于完成迭代运算。为了有序调用各步运算,还需开发 LM 法迭代控制模块。

在进行 LM 法的运算过程中,需要对各运算

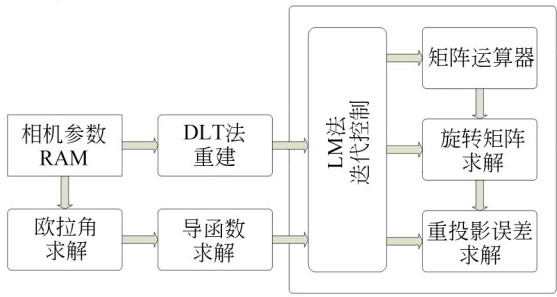


图 7 优化算法模块示意图

Fig. 7 Schematic diagram of optimization algorithm module

模块、状态判断模块以及迭代任务进行统一管理,同时确保与外部高层模块的信息交互,因此设计了如图 8 所示的状态机,以此作为 FPGA 行为级建模的依据。图中各状态的含义具体如表 2 所示。

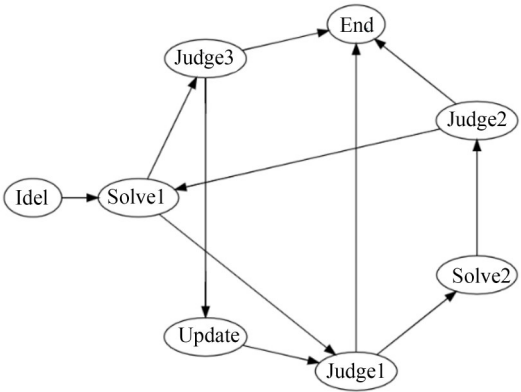


图 8 LM 法状态机

Fig. 8 State machine of LM algorithm

表 2 LM 算法状态信息

Tab. 2 State information of LM algorithm

状态名	状态信息
Idel	空闲状态:等待启动信号;
Solve1	矩阵运算状态:求解雅克比矩阵、梯度向量;
Judge1	迭代判断状态 1:是否近似满足局部最优解条件;
Solve2	增益比运算状态:求解用于控制迭代的增益比;
Judge2	迭代判断状态 2:迭代步长是否足够小;
Judge3	迭代判断状态 3:迭代次数是否达到预设值;
Update	更新状态:根据增益情况,更新阻尼系数等调节参数;
End	结束状态:迭代结束,各信号复位。

多目视觉跟踪系统使用的两套 TR4 系列开发板中,FPGA 芯片的逻辑资源消耗占比详情如表 3 和表 4 所示。FPGA 系统的各项速率指标如表 5 所示,运动中的三维扫描测头侧面高反光标志点的空间三维坐标计算速度能够达到 40 frame/s。如表 6 所示,本文提出的分步光束法平差算法在基于 FPGA 的多目视觉跟踪系统的运行速度相对于基于 OpenCV 的 PC 机提升了约 38 倍。

表 3 FPGA(EP4SGX230C2)逻辑资源

Tab. 3 Logic resource of FPGA(EP4SGX230C2)

资源类型	总 量	消耗量	消耗比 例/%
Combinational ALUTs	182 400	131 235	71.95
Memory ALUTs	91 200	166	0.18
Dedicated logic registers	182 400	97 438	53.42
Total block memory bits	14 625 792	9 787 690	66.92
DSP block 18-bit elements	1 288	80	6.21
Total PLLs	8	3	37.50
Total pins	888	467	52.59

表 4 FPGA(EP4SGX530C2)逻辑资源

Tab. 4 Logic resource table of FPGA(EP4SGX530C2)

资源类型	总 量	消耗量	消耗比 例/%
Combinational ALUTs	424 960	225 243	53.00
Memory ALUTs	212 480	7 362	3.46
Dedicated logic registers	424 960	188 877	44.45
Total block memory bits	21 233 664	16 105 408	75.85
DSP block 18-bit elements	1 024	544	53.13
Total PLLs	8	3	37.50
Total pins	888	467	52.59

表 5 FPGA 系统速率指标

Tab. 5 Speed index of FPGA system

速率指标	参数值
系统时钟频率/MHz	100
图像数据吞吐率/(Mb·s ⁻¹)	5 120
帧率/(frame·s ⁻¹)	40

表 6 FPGA 系统与 PC 机运行速度对比

Tab. 6 Comparison of running speed between FPGA and PC

单帧处理时长/ms	FPGA 系统	PC 机
图像处理及标志点匹配	16.6	966.6
DLT 算法三维重建	0.9	11.3
分步光束法平差优化	25.0	966.6

5 实 验

采用基于 FPGA 的分步光束法平差重建算法搭建的多目视觉测量系统与关节臂式机器人、三维激光扫描测头共同组成三维扫描测量机器人,如图 9 所示。

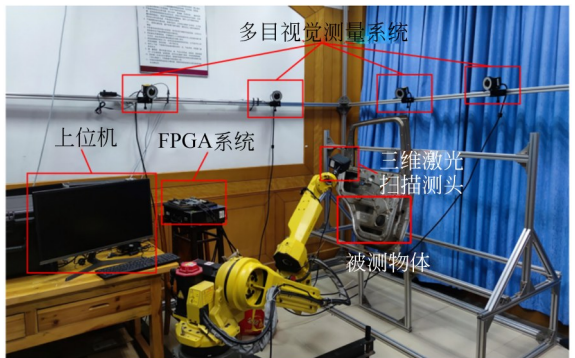


图 9 三维扫描测量机器人
Fig. 9 3D scanning measuring robot

将 3 台工业相机环绕布置于实验室上方,调整各相机的朝向,使其视场范围可完全覆盖测头活动区域,调整各镜头的焦距,使得相机在测头活动区域的成像质量最佳。本文进行了多次标定实验,在拍取图像对时,尽可能使棋盘格正对于被标定相机,确保图像对有效;尽可能使棋盘格移动位置遍历整个视场范围,尤其注意沿纵深方向多作移动,以确保获取足够的视场深度信息;尽可能使棋盘格在测头活动区域内多作停留,提高该区域内的测量精度。

获取各组图像对序列后,删去其中存在棋盘格被遮挡、棋盘格反光、棋盘格超出视场范围等无效图像对,确保各组中有足够的有效图像对参与标定运算。其中,相机内参可由标定结果直接给出,相机外参可由旋转矩阵、平移矩

阵求得。

6 个高反光标志点中心三维坐标初值的空间重投影误差如表 7 所示,经传统光束法平差优化后的结果如表 8 所示,经基于 FPGA 的分步光束法平差优化后的结果如表 9 所示。经过计算,传统光束法平差优化后的空间重投影误差平均值

表 7 优化前标志点的空间重投影误差
Tab. 7 Spatial reprojection error of landmark points (before optimization) (mm)

标志点	1号相机	2号相机	3号相机	平均值
1	3.288	2.516	3.055	2.953
2	8.537	9.799	8.341	8.893
3	1.888	2.109	2.198	2.065
4	2.713	2.357	2.793	2.621
5	9.295	10.094	9.717	9.702
6	1.956	1.987	1.767	1.903

表 8 传统光束法平差优化后标志点的空间重投影误差
Tab. 8 Spatial reprojection error of landmark points after optimization (mm)

标志点	1号相机	2号相机	3号相机	平均值
1	0.512	0.279	0.305	0.365
2	0.727	0.460	0.853	0.680
3	0.166	0.211	0.213	0.197
4	0.072	0.462	0.127	0.221
5	0.013	0.743	0.383	0.390
6	0.026	0.060	0.241	0.109

表 9 标志点空间重投影误差(分步光束法平差优化后)
Tab. 9 Spatial reprojection error of landmark points (after steps optimization) (mm)

标志点	1号相机	2号相机	3号相机	平均值
1	0.104	0.077	0.065	0.082
2	0.072	0.054	0.011	0.046
3	0.028	0.126	0.055	0.070
4	0.053	0.158	0.064	0.092
5	0.026	0.069	0.054	0.050
6	0.036	0.080	0.088	0.068

为 0.327 mm,而分步式光束法平差优化后的空间重投影误差平均值为 0.068 mm,精度提升了 4.8 倍。

采用本文提出的算法对 Creaform 公司的 C-track 光学动态跟踪系统的校准棒进行重复性测试,以验证所提出算法的精度。校准棒实物如图 10 所示。

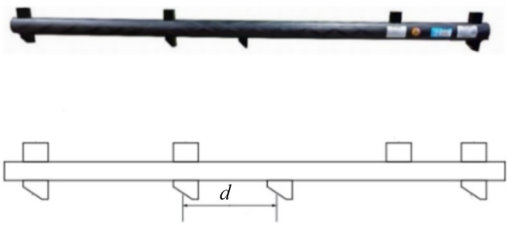


图 10 C-Track 系统校准棒
Fig. 10 C-Track system calibration bar

根据 VDI/VDE2634 标准,C-Track 系统校准棒依次摆放的 7 种位姿如图 11 所示,对校准棒上两倾斜标志点间距 d (160.186 mm) 进行重复性测量实验,10 次实验结果如表 10 所示。最终实验结果如表 11 所示。

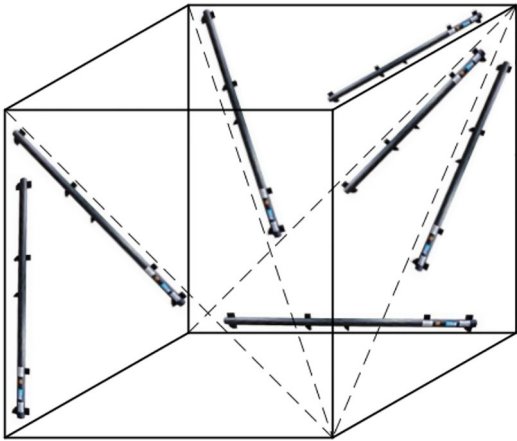


图 11 C-Track 系统校准棒 7 种位姿
Fig. 11 Seven positions of the C-Track system calibration bar

由表 10 和表 11 可知,采用本文提出的算法对 C-Track 系统校准棒上长度 d 的测量结果为 160.230 mm,与参考值 160.186 mm 的误差为 44 μm ,标准差为 9 μm ,测量结果满足要求。

表 10 d 的 10 次测量实验结果

Tab. 10 Experimental results of 10 measurements of d (mm)

编号	算术平均值	单次测量 标准差	算术平均值 标准差
1	160.200	0.073	0.028
2	160.254	0.077	0.029
3	160.253	0.057	0.022
4	160.235	0.065	0.024
5	160.209	0.080	0.030
6	160.243	0.052	0.020
7	160.198	0.086	0.033
8	160.209	0.081	0.031
9	160.284	0.084	0.032
10	160.214	0.079	0.030

表 11 实验结果的误差分析

Tab. 11 Error analysis of experimental results(mm)

算术平均值	参考值偏差	标准差
160.230	0.044	0.009

参考文献:

[1] SHI B W, LIU Z, ZHANG G J. Online stereo vision measurement based on correction of sensor structural parameters[J]. *Optics Express*, 2021, 29 (23): 37987.

[2] ZHOU Y Q, LI Q W, CHU L L, *et al.* A measurement system based on internal cooperation of cameras in binocular vision [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(6): 065002.

[3] 王邺, 陈文静, 韩梦奇. 基于傅里叶变换的改进圆形条纹投影轮廓术[J]. *光学学报*, 2022, 42(13): 1312003.

WANG Y, CHEN W J, HAN M Q. Improved circular fringe projection profilometry based on Fourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(13): 1312003. (in Chinese)

[4] 侯艳丽, 梁瀚钢, 李付谦, 等. 相位测量轮廓术中时空结合的三频相位展开[J]. *光学学报*, 2022, 42

6 结 论

本文针对三维视觉测量系统中高反光标志点重建精度有限与实时处理速度不足的问题,提出了一种基于FPGA的分步光束法平差重建算法,实现了对三维目标的高精度与高效率重建。通过分步优化策略显著降低了标志点重建误差,平均空间重投影误差较传统光束法平差降低79.20%,对校准棒两倾斜标志点间距进行重复性测量实验,误差为44 μm ,标准差为9 μm 。本文设计的FPGA系统可同时对4路高清图像数据(2 048 $\times$ 2 048 $\times$ 8 bit)实现约40 frame/s的处理速度,提出的分步光束法平差算法在FPGA平台上的运行速度相对于PC平台提升了约38倍。本研究成果有效提升了动态目标空间位姿视觉测量的精度与速度。

作者贡献声明:

张瑞:算法的提出,论文构思;
周昌鋆、卞富、薛安:实验的设计及实现,论文撰写;
张进、李维诗:算法的改进,论文审核;
杨飞、郑泽文:实验数据分析。

(1): 0112006.

HOU Y L, LIANG H G, LI F Q, *et al.* Spatial-temporal combined phase unwrapping in phase measurement profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0112006. (in Chinese)

[5] 李付谦, 陈文静. 正交光栅相移轮廓术的相位误差分析及其校正[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 95-106.

LI F Q, CHEN W J. Phase error analysis and correction for phase shifting profilometry using crossed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 95-106. (in Chinese)

[6] 韩彭威, 段发阶, 李杰, 等. 基于双目视觉与罗德里格斯旋转的机械臂全工作空间域绝对定位精度提升方法[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(8): 1150-1161.

HAN P W, DUAN F J, LI J, *et al.* A method for improving absolute positioning accuracy of industrial

- robot in entire workspace domain based on stereo vision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(8): 1150-1161. (in Chinese)
- [7] TONG X H, GAO Y, YE Z, *et al.* Dynamic measurement of a long-distance moving object using multi-binocular high-speed videogrammetry with adaptive-weighting bundle adjustment[J]. *The Photogrammetric Record*, 2024, 39(186): 294-319.
- [8] ZHAO N, MURAKAMI K, YAMAKAWA Y. Vision based trajectory dynamic compensation system of industrial robot[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131(12): 6013-6026.
- [9] BI S L, GU Y G, ZOU J Q, *et al.* High precision optical tracking system based on near infrared trinocular stereo vision[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2528.
- [10] CAI Y, ZHU M Z, HE B W, *et al.* Distributed visual positioning for surgical instrument tracking [J]. *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 2024, 47(1): 273-286.
- [11] XIAO Q Y, ZAIDI Z, GOMBOLAY M. Multi-camera asynchronous ball localization and trajectory prediction with factor graphs and human poses[C]. 2024 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. May 13-17, 2024, Yokohama, Japan. IEEE, 2024: 13695-13702.
- [12] XIA Y, WU H W, ZHU L C, *et al.* A multi-sensor fusion framework with tight coupling for precise positioning and optimization [J]. *Signal Processing*, 2024, 217: 109343.
- [13] LIU Q L, DONG M L, SUN P, *et al.* All-parameter calibration method of the on-orbit multi-view dynamic photogrammetry system [J]. *Optics Express*, 2023, 31(7): 11471-11489.
- [14] XU C ZH, ZHANG S, JIANG K C. A multi-source information fusion method for mobile robot visual-inertial navigation [C]. 2023 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. August 6-9, 2023, Harbin, Heilongjiang, China. IEEE, 2023: 296-301.
- [15] 王建荣, 王任享, 胡莘. 基于 LMCCD 影像的相机参数在轨标定[J]. *光学 精密工程*, 2019, 27(4): 984-989.
- WANG J R, WANG R X, HU X. On-orbit calibration of camera parameters based on line-matrix charge-coupled device imagery[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 984-989. (in Chinese)
- [16] 宋胜嘉, 朱勇超, 苏杰, 等. 一种联合 FAST 算法和双像光束法平差的相机标定方法[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2025, 48(6): 833-838.
- SONG SH J, ZHU Y CH, SU J, *et al.* A camera calibration method combining FAST algorithm and double image beam adjustment[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2025, 48(6): 833-838. (in Chinese)
- [17] 石竹风, 李浣果, 李根, 等. 基于 T-MAC 的高精度定位摄影测量光束法平差优化[J]. *机械制造与自动化*, 2023, 52(2): 45-47, 76.
- SHI ZH F, LI L G, LI G, *et al.* Optimization of bundle adjustment for high-precision positioning photogrammetry based on T-MAC [J]. *Machine Building & Automation*, 2023, 52(2): 45-47, 76. (in Chinese)
- [18] 郭迎超, 王国瑋. 基于光束法平差的双线阵系统标定技术[J]. *计算机测量与控制*, 2024, 32(2): 256-261, 267.
- GUO Y CH, WANG G H. Calibration technique for bilinear array system based on beam adjustment [J]. *Computer Measurement & Control*, 2024, 32(2): 256-261, 267. (in Chinese)
- [19] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [20] TRIGGS B, MCLAUCHLAN P F, HARTLEY R I, *et al.* *Bundle Adjustment: a Modern Synthesis* [M]. *Vision Algorithms: Theory and Practice*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000: 298-372.
- [21] 别梓钊. 基于摄影测量原理的编码标志点三维重建算法研究与实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- BIE Z F. *Research and Implementation of 3D Reconstruction Algorithm of Coding Marker Based on Photogrammetry Principle* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [22] MADSEN K, NIELSEN H B, TINGLEFF O.

Methods for Non-Linear Least Squares Problems
(2nd ed.) [M]. Informatics and Mathematical

Modell-ing, Technical University of Denmark
(DTU), 2004.

作者简介:



张 瑞(1988—),男,安徽潜山人,博士,讲师,硕士生导师,2017年于天津大学获得博士学位,主要从事于大尺寸视觉动态测量技术方面的研究。E-mail:zhangrui@hfut.edu.cn

通讯作者:



李维诗(1970—),男,山东省烟台人,博士,教授,博士生导师,2002年于浙江大学获得博士学位,主要从事几何算法与应用的研究工作。E-mail:weishili@hfut.edu.cn