

基于 T-MAC 的高精度定位摄影测量光束法平差优化

石竹风¹,李泷果¹,李根²,曾琪¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 苏州研究院,江苏 苏州 215000)

摘要:为了构建高自动化程度的摄影测量系统,借助 T-MAC 激光跟踪系统和机器人完成相机定向,跟踪测量相机在不同摄站的位姿参数。设计一种基于 T-MAC 的高精度定位光束法平差优化方法,将相机位姿参数与待测点三维坐标共同作为平差参数,整体解算三维空间坐标值。试验结果表明:优化后平差结果的测量精度优于普通光束法平差,基准点测量方均根误差为 0.194 2 mm,系统的稳定性好,重复性测量精度高。

关键词:摄影测量;T-MAC;激光跟踪仪;相机定向;光束法平差

中图分类号:TP216+.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0045-03

Optimization of Bundle Adjustment for High-precision Positioning Photogrammetry Based on T-MAC

SHI Zhufeng¹, LI Shuanggao¹, LI Gen², ZENG Qi¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Suzhou Research Institute of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Suzhou 215000, China)

Abstract: With the aim to construct highly automated photogrammetric system, by means of the T-MAC laser tracking system and the robot, camera orientation is completed, and the pose parameters of the camera at different camera positions are tracked and measured to design a T-MAC-based high-precision positioning bundle adjustment optimization method. The camera pose parameters and the three-dimensional coordinates of the point to be measured are used as adjustment parameters to calculate the three-dimensional space coordinate values as a whole. The experimental results show that the measurement accuracy of the optimized adjustment result is better than that of the ordinary bundle adjustment; the root mean square error of the reference point measurement is 0.194 2 mm. The stability of the system is good with high repeatability measurement accuracy.

Keywords: photogrammetry; T-MAC; laser tracker; camera orientation; bundle adjustment

0 引言

随着数字测量技术的发展,航空制造业对飞机部件在装配过程中测量的精度、范围和效率提出了更高的要求,因此,在不接触待测部件的情况下,满足此类需求的工业摄影测量技术引起了极大的关注。摄影测量作为一种非接触式数字化测量方法,具有高精度、高效率、便携等优点,已在制造业中广泛应用^[1-2]。为迎合自动化发展趋势,摄影测量的研究重点已逐渐向自动化、柔性和拓展性上转移。传统的测量过程中,相机位姿的求解依赖于编码点的匹配^[3],在图像拼接过程中会形成累积误差,降低测量精度。同时,标志点的粘贴和清除工作易对被测物表面造成损坏。因此,研究不依赖于编码点的高精度相机定向和测量平差方法,对提高摄影测量精度及自动化程度、保护被测物体有着重大意义。

肖志涛等^[4]通过对机器人进行手眼标定,利用标定结果与机器人运动参数实现相机的自动定向,可以满足自动

化程度高的测量需求。王俊威等^[5]引入 IGG3 权因子函数对自检校光束法平差方法进行优化,通过实验验证了改进后的抗差光束法平差方法,提高了摄影测量平差结果的精度。王强^[6]在缺乏控制点的情况下研究一种点线混合光束法平差方法,利用水平和竖直线条件约束优化处理自由网和绝对网平差,与无约束的光束法平差相比定位精度提高了 50%。王君等^[7]提出一种基于局部迭代搜索算法的相机相对定向方法,依靠两张像片中同名像点坐标信息精确计算相机之间相对外方位参数,大大提升了摄影测量系统的测量灵活性。以上方法对传统相机定向或光束法平差方法做出了改进优化,但与其他工业测量系统的集成不足,未能充分结合不同测量系统的优点而达到更高的测量精度。

本文采用移动机器人搭载工业摄影测量相机进行拍摄,由 T-MAC 激光跟踪系统追踪相机的位置姿态,替代编码点拼接的方式完成相机定向,将相机外方位元素与待测点三维坐标共同作为平差参数建立约束,改进光束法平差模型,实现待测点的高精度、快速测量,并使用激光投点器在部件表面投射激光点阵作为识别对象,可彻底避免标

记点对待测部件表面造成的损坏,实现无接触式测量。

1 原理

本文方法具体步骤为:1)搭建高精度定向的摄影测量系统,将相机、T-MAC 机械传感器与移动机器人末端固联;2)标定坐标系,选取待测部件的 CAD 模型设计坐标系作为基坐标系,建立各测量坐标系与基坐标系之间的转换关系;3)控制机器人带动相机,围绕待测部件多角度拍摄,提取像片中像点坐标信息,同时记录不同摄站下 T-MAC 的位姿参数;4)通过坐标系标定结果求解基坐标系下的相机外参,建立约束方程;5)利用光束法平差整体求解空间点三维坐标及改正后的相机外参。

1.1 摄影测量基本原理

工业摄影测量利用相机对待测目标进行多角度的拍摄,生成多张二维数字图像,利用图像识别技术识别标记点的位置。从像点信息出发,结合相机成像参数及中心投影成像几何结构关系,通过测量平差处理,解算目标点的三维空间坐标。

假设相机无畸变,三维空间内物方点 P_i 处汇集了来自 j 个摄站的 j 条光线,则根据多摄站交会几何关系共有 j 个共线方程^[8]:

$$\begin{cases} X_{ij}-X_{0j}=-f \frac{a_{1j}(X_i-X_{sj})+b_{1j}(Y_i-Y_{sj})+c_{1j}(Z_i-Z_{sj})}{a_{3j}(X_i-X_{sj})+b_{3j}(Y_i-Y_{sj})+c_{3j}(Z_i-Z_{sj})} \\ Y_{ij}-Y_{0j}=-f \frac{a_{2j}(X_i-X_{sj})+b_{2j}(Y_i-Y_{sj})+c_{2j}(Z_i-Z_{sj})}{a_{3j}(X_i-X_{sj})+b_{3j}(Y_i-Y_{sj})+c_{3j}(Z_i-Z_{sj})} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (X_i, Y_i, Z_i) 为物方点 P_i 在物方空间坐标系中的三维坐标; (X_{ij}, Y_{ij}) 表示其在第 i 张像片上的像点坐标。像片的外方位元素 X_s, Y_s, Z_s 及 ψ, ω, κ (下文中) 表征相机在物方空间坐标系中的位置和姿态,内方位元素 X_0, Y_0, f 代表相机摄影中心在像空间坐标系中的相对位置。

1.2 T-MAC 激光跟踪系统

T-MAC 激光跟踪系统由激光跟踪仪和六自由度靶标 T-MAC 组成,有效地结合了三维工业测量系统的高准确度特性和数字摄影测量的动态测量优势^[9],将 T-MAC 与待测目标固联在机器人上,可以实现对运动待测目标的高精度六自由度测量,如图 1 所示。T-MAC 测量目标 MAC 单元包括位于 T-MAC 中心的角隅棱镜反射器和一组红外 LED,由绝对跟踪器追踪实时测得 6 个位姿参数 $(X_s, Y_s, Z_s, \psi, \omega, \kappa)$ 。



图 1 T-MAC 激光跟踪系统图

2 基于 T-MAC 高精度定位的光束法平差优化

2.1 坐标系标定

为了确定相机在空间中的实际位置姿态并评估测量结果精度,需对摄影测量像空间坐标系进行标定。本文选取待测部件 CAD 模型设计坐标系作为基坐标系,将测量结果统一至基坐标系下。

首先,通过 3 个及以上基准点建立激光跟踪仪测量坐标系与基坐标系之间的转换关系 $R_{\text{Measurement}}^{\text{Base}}$, 设基准点在基坐标系下的坐标为 P_i^{Base} , 在测量坐标系下坐标为 $P_i^{\text{Measurement}}$, 则存在转换关系

$$P_i^{\text{Base}} = R_{\text{Measurement}}^{\text{Base}} \cdot P_i^{\text{Measurement}} \quad (2)$$

用 $M^{\text{Measurement}}$ 表示 T-MAC 在测量坐标系下的位姿,根据转换关系可得其在基坐标系下位姿为

$$M^{\text{Base}} = R_{\text{Measurement}}^{\text{Base}} \cdot M^{\text{Measurement}} \quad (3)$$

相机与 T-MAC 通过夹具固联在机械臂末端,因此像空间坐标系与 T-MAC 坐标系之间的转换关系是固定的。像空间坐标系相对于基坐标系的转换矩阵为

$$R_{\text{Base}}^{\text{Camera}} = R_{\text{T-MAC}}^{\text{Camera}} \cdot (R_{\text{T-MAC}}^{\text{Base}})^{-1} \quad (4)$$

完成像空间坐标系标定后,通过 T-MAC 激光跟踪系统测量即可获得不同摄站下相机在基坐标系下的位姿。该方法避免了传统摄影测量后方交会技术对控制点及编码点的依赖,利用高精度激光追踪技术进行相机定向,并将相机位姿转换至基坐标系下,便于后续数据处理。

2.2 误差方程的建立

为了进行最小二乘平差处理,将摄影测量共线方程线性化后得到像点坐标误差方程式为

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X_s} & \frac{\partial x}{\partial Y_s} & \frac{\partial x}{\partial Z_s} & \frac{\partial x}{\partial \psi} & \frac{\partial x}{\partial \omega} & \frac{\partial x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial y}{\partial X_s} & \frac{\partial y}{\partial Y_s} & \frac{\partial y}{\partial Z_s} & \frac{\partial y}{\partial \psi} & \frac{\partial y}{\partial \omega} & \frac{\partial y}{\partial \kappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_s \\ \Delta Y_s \\ \Delta Z_s \\ \Delta \psi \\ \Delta \omega \\ \Delta \kappa \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} & \frac{\partial x}{\partial Z} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} & \frac{\partial y}{\partial Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x - \hat{x} \\ y - \hat{y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: v_x, v_y 为像点坐标残差; \hat{x}, \hat{y} 为用近似参数计算的像点坐标。

将像点坐标改正数方程式简写为一般式:

$$V = A_1 X_1 + A_2 X_2 - L \quad (6)$$

根据图像处理获取 j 张像片上物方点 P_j 的同名像点坐标,可列误差方程组:

$$\begin{cases} V_1 = A_{11} X_1 + A_{12} X_{j+1} - L_1 \\ V_2 = A_{21} X_2 + A_{22} X_{j+1} - L_2 \\ \vdots \\ V_j = A_{j1} X_j + A_{j2} X_{j+1} - L_j \end{cases} \quad (7)$$

式中: X_1, X_2, \dots, X_j 分别代表 j 张像片外方位元素的改正数向量; X_{j+1} 表示待测点三维坐标的改正数向量; $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1j}$ 分别为误差方程的系数阵; L_1, L_2, \dots, L_j 为常数向量。

设由 T-MAC 测得的第一张像片的外方位元素,经坐标系转换后在基坐标系下的值 $X_1^{\text{TMAC}} = [X_{S1}^{\text{TMAC}} \ Y_{S1}^{\text{TMAC}} \ Z_{S1}^{\text{TMAC}} \ \psi_1^{\text{TMAC}} \ \omega_1^{\text{TMAC}} \ \kappa_1^{\text{TMAC}}]^T$, 外方位元素初始估值为 $X_1^0 = [X_{S1}^0 \ Y_{S1}^0 \ Z_{S1}^0 \ \psi_1^0 \ \omega_1^0 \ \kappa_1^0]^T$, 则有真值

$$\hat{X}_1 = X_1^{\text{TMAC}} + \Delta X_1^{\text{TMAC}} = X_1^0 + \Delta X_1^0 \quad (8)$$

其相应的误差方程为

$$V_{j+1} = X_1 - L_{j+1} \quad (9)$$

以此类推,由 T-MAC 测得 j 张像片的外方位元素,并利用 2.1 中坐标标定方法转换至基坐标系下,可得误差方程组:

$$\begin{cases} V_{j+1} = X_1 - L_{j+1} \\ V_{j+2} = X_2 - L_{j+2} \\ \vdots \\ V_{2j} = X_j - L_{2j} \end{cases} \quad (10)$$

综合式(7)和式(10)可将总的误差方程写为

$$V = AX - L \quad (11)$$

把待测点的像坐标及由 T-MAC 测得的像片外方位元素共同视为观测量,整体求解待测点的三维空间坐标,只要有足够的观测值,式(11)的最小二乘解^[10]为

$$\begin{cases} NX = U \\ X = N^{-1} \cdot U \\ N = (A^T PA)^{-1}, U = A^T PL \\ \sum_x = \sigma_0^2 Q_x = \sigma_0^2 N^{-1} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P 为观测值的权,实际计算中常取单位阵; \sum_x 为 X 的协方差阵,解算过程是迭代求解的过程。

2.3 基于 T-MAC 的高精度定位光束法平差计算过程

求解一个物方点三维坐标的光束平差计算过程如下。

1) 选取外方位元素和待测点坐标的初始估值,并计算同名像点坐标的近似值。

2) 对待测点的所有同名像点,根据式(7)列出像点坐标误差方程组。

3) 根据 T-MAC 测得的像片外方位元素结果,按式(10)列出外方位元素误差方程组。

4) 综合两组方程,按式(12)解得各参数改正数值,并补偿至步骤 2)、步骤 3) 中的误差方程中。

5) 重复步骤 2)~步骤 4) 各步,直到所有外方位元素和待测点三维坐标的改正数均小于阈值。

3 试验验证与数据分析

3.1 试验设置

本试验采用 KUKA KR90R3100 型机器人,利用 Leica901 型号激光跟踪仪对机器人进行标定,标定结果表

明机器人末端定位的位置误差和姿态误差可达 0.02 mm 和 0.007°。由机器人搭载郑州某公司 CIM-3+型工业测量相机,该相机测量精度高,具有优异的可靠性、便携性。T-MAC 激光跟踪系统由激光跟踪仪和 TMC30-B 型号机械控制传感器组成,最大测量范围可达 80 m,位置测量精度为 $(\pm 15+6) \mu\text{m}/\text{m}$,角度测量精度为 0.01°。

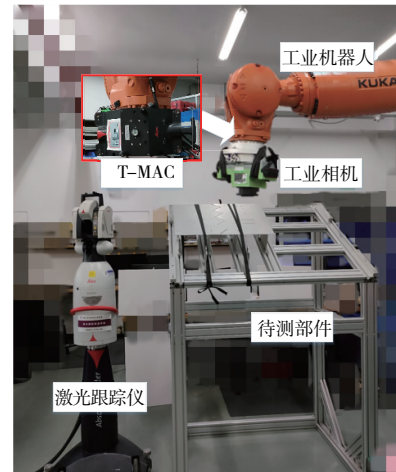


图 2 摄影测量试验现场

3.2 基准点测量试验

对待测部件上的测量基准点进行测量验证。首先,对测量建站基准点进行坐标系转换,标定像空间坐标系、激光跟踪仪坐标系与基坐标系之间的关系。然后,由机器人搭载相机围绕测量基准点靶标多角度拍摄,同时,激光跟踪仪追踪相机在不同摄站时 T-MAC 的位姿,并根据标定结果转换得到基坐标系下相机的位姿参数。利用本文融合高精度激光定位的光束法平差优化方法进行测量基准点三维坐标解算,迭代限制条件为改正数小于限差(取 0.000 03,相当于 0.1 的角度值)。再使用传统光束法平差整体解算基准点坐标,将基坐标系下的测量平差结果与 CAD 数模中的基准点理论坐标值对比分析,两种方法的基准点坐标偏差量及总的方均根误差值如表 1 所示。

表 1 基准点测量的偏差量 单位:mm

项目	光束法平差	本文方法	
偏差量	基准点 1	0.438 4	0.216 2
	基准点 2	0.424 6	0.254 9
	基准点 3	0.329 6	0.151 7
	基准点 4	0.162 3	0.127 1
方均根误差	0.356 3	0.194 2	

由表 1 数据可以看出,融合高精度定位的光束法平差求得的基准点偏差量小于光束法平差解算结果的偏差量,基准点测量方均根误差为 0.194 2 mm,三维坐标更接近于数模中的理论值。

(下转第 76 页)

从表 5 可以看到,总体的预测误差 R_{MSE} 很小, R_{2_score} 接近于 1,表示此模型拟合效果良好,总体准确度 ($A_{accuracy}$) 均大于 0.75,表明模型对不同的特征都能进行较为准确地预测。

4 结语

本文利用基于梯度提升树 (gradient boosting decision tree, GBDT) 的 XGBoost 算法通过不断拟合残差提升了算法的准确性,结合特征提取方法,使其在精密结构件铣削加工中的质量预测上获得了较高的预测精度,对不同材料、不同形状的加工特征具有很高的适用性。因此,可以将本文中的方法推广至精密铣削领域的其他应用场景,可以为工业生产中的质量控制提供数据支撑,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] BREZOCNIK M, KOVACIC M. Integrated genetic programming and genetic algorithm approach to predict surface roughness [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2003, 18(3): 475-491.
- [2] CORREA M, BIELZA C, DE J RAMIREZ M, et al. A Bayesian network model for surface roughness prediction in the machining

process [J]. International Journal of Systems Science, 2008, 39(12): 1181-1192.

- [3] AZOUZI R, GUILLOT M. On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(9): 1201-1217.
- [4] 彭彬彬, 闫献国, 杜娟. 基于 BP 和 RBF 神经网络的表面质量预测研究 [J]. 表面技术, 2020, 49(10): 324-328, 337.
- [5] CHEN T Q, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system [C]//KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016: 785-794.
- [6] FRIEDMAN J H. Stochastic gradient boosting [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2002, 38(4): 367-378.
- [7] WILLMOTT C J, MATSUURA K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance [J]. Climate Research, 2005, 30: 79-82.
- [8] NAGELKERKE N J D. A note on a general definition of the coefficient of determination [J]. Biometrika, 1991, 78(3): 691-692.

收稿日期: 2021-11-22

(上接第 47 页)

3.3 重复性测量试验

在测量环境和测量条件不变的情况下,对同一组待测点进行重复测量。首先,围绕测量基准靶标移动相机对基准点进行拍照,再重复 10 次拍摄测量,借助机器人将相机移动到与第 1 组试验相同的位置姿态。利用本文方法解算距离最远的 2 个基准点在基坐标系下的三维空间坐标,并计算其重复测量精度,其中 5 组数据与计算结果如表 2 所示。

表 2 基准点三维坐标的重复测量精度 单位: mm

项目	x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	z_2
1 组	-449.297	349.094	-7.248	449.315	-349.689	-17.321
2 组	-449.304	349.220	-7.089	449.359	-349.701	-17.384
3 组	-449.287	349.204	-7.056	449.410	-349.724	-17.516
4 组	-449.195	349.201	-7.133	449.426	-349.740	-17.357
5 组	-449.312	349.216	-7.269	449.305	-349.690	-17.459
平均	-449.290	349.202	-7.191	449.343	-349.722	-17.439
重复测量精度	0.047 8	0.039 0	0.102 8	0.054 6	0.021 8	0.097 7

由表 2 可知,三维坐标重复测量精度高,本文方法具有较好的稳定性。

4 结语

为解决传统摄影测量依赖编码点进行图像拼接的问题,提出一种基于 T-MAC 的高精度定位摄影测量光束法平差优化方法。该方法通过 T-MAC 激光跟踪系统追踪

相机的位姿,建立约束方程优化光束法平差模型,解算三维空间点坐标。试验结果表明:利用本文方法解算空间坐标的测量精度高,基准点测量方均根误差为 0.194 2 mm,且测量系统具有较好的稳定性。

参考文献:

- [1] 王梅, 牛润军. 数字化测量技术在飞机外形检测方面的应用研究 [J]. 航空制造技术, 2013, 56(20): 109-112.
- [2] JING X S, ZHANG C Y, SUN Z L, et al. The technologies of close-range photogrammetry and application in manufacture [C]//Advances in Computer Science Research", "Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation. Shenzhen, China. Paris, France: Atlantis Press, 2015.
- [3] 屈仁飞, 王培俊, 刘瑞, 等. 近景摄影测量技术在钢轨检测中的应用研究 [J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 175-178.
- [4] 肖志涛, 郎建业, 耿磊, 等. 基于机器人运动参数与特征向量的标记点匹配方法 [J]. 天津工业大学学报, 2017, 36(6): 60-65.
- [5] 王俊威, 西勤, 冯其强, 等. 基于 IGG3 的数字工业摄影测量抗差光束法平差 [J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(4): 411-415.
- [6] 王强. 面向结构化场景的直线特征提取匹配与光束法平差研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2018.
- [7] 王君, 董明利, 李巍, 等. 大视场摄影测量相机的相对定向 [J]. 光学技术, 2018, 44(5): 549-554.
- [8] 冯其强, 李广云, 李宗春. 数字工业摄影测量技术及应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2013: 121-126.
- [9] 刘勇, 张志勇, 吴跃. T-Mac 激光跟踪系统动态性能分析 [J]. 宇航计测技术, 2010, 30(4): 1-5.
- [10] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础 [M]. 3 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2014.

收稿日期: 2021-11-12