

激光与光电子学进展

一种视觉惯性系统位姿高精度一体化标定方法

马可瑶, 任永杰*, 林嘉睿, 牛志远, 郝继贵**

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 在视觉惯性定位系统中, 传感器位姿关系的标定对于实现精确空间定位至关重要, 针对现有标定方法对多传感器系统缺乏集成性、标定精度受限等问题, 提出了一种视觉惯性系统位姿高精度一体化标定方法。通过精密三轴转台提供角度基准, 基于重力矢量不变性和匀速圆周运动下向心加速度数值的一致性求解惯性测量单元(IMU)与转台之间的外参, 利用转台构建控制场为相机标定提供空间角度约束, 联合优化求解无重叠视场多相机内外参。仿真和实验结果表明, 该方法具有较高的标定精度和稳定性, 在多相机 IMU 系统组合定位测试中, 与经典标定方法 Kalibr 相比, 本文方法系统运动轨迹拟合轴线的角度偏差降低 40.32%, 距离偏差降低 18.93%, 可满足高精度视觉惯性定位系统的标定需求。

关键词 测量; 视觉惯性定位系统; 无重叠视场多相机; 惯性测量单元; 精密三轴转台; 外参标定

中图分类号 TP23

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222880

A High-Precision Integrated Calibration Method for Position and Attitude of Visual-Inertial System

Ma Keyao, Ren Yongjie*, Lin Jiarui, Niu Zhiyuan, Zhu Jigui**

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University,
Tianjin 300072, China

Abstract In the visual-inertial positioning system, the calibration of the sensor pose relationship plays a crucial role in realizing accurate spatial positioning. Existing calibration methods lack integration for multi-sensor systems, and the calibration accuracy is limited. In this paper, a high-precision integrated calibration method for the position and attitude of the visual-inertial system is proposed. A precision three-axis turntable is used to provide the angle reference. The extrinsic parameters between the inertial measurement unit (IMU) and turntable are solved based on the invariance of the gravity vector and the consistency of centripetal acceleration values. The control field is constructed by the turntable to provide spatial angle constraints for camera calibration, and the intrinsic and extrinsic parameters of non-overlapping cameras are jointly optimized. Simulation and experimental results show that this method has high calibration accuracy and stability. In the combined positioning test of the multi-camera IMU system, compared with the classical calibration method Kalibr, using the calibration results of this method, the angle deviation of the system motion trajectory fitting axis is decreased by 40.32% and the distance deviation is decreased by 18.93%, which can meet the calibration requirements of high-precision visual-inertial positioning systems.

Key words measurement; visual-inertial positioning system; non-overlapping cameras; inertial measurement unit; precision three-axis turntable; extrinsic parameters calibration

1 引言

随着智能制造技术^[1]的发展, 实现人机交互的融入式测量成为制造领域的一大发展趋势^[2], 定位技术是实现融入式测量的必要手段, 定位精度和鲁棒性将

直接影响测量结果和系统的交互性^[3]。近年来, 视觉惯性组合定位系统发展迅速, 在增强现实^[4]、空间位姿测量^[5]、同时定位与地图构建^[6-7]等领域得到了广泛应用。视觉传感器测量精度高、信息量丰富, 具有非接触、灵活便携的特性^[8], 可以实现大规模多目标跟

收稿日期: 2022-10-24; 修回日期: 2022-11-03; 录用日期: 2022-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(52127810, 51721003)、天津市自然科学基金(21JCZDJC00470)、天津大学自主创新基金(2022XCG-0004)

通信作者: *yongjieren@tju.edu.cn; **jigui@tju.edu.cn

踪,在复杂受限的工业现场环境中完成定位任务。惯性测量单元(IMU)能够快速敏感地测得物体自身运动状态,两者组合可以有效克服视觉测量频率偏低以及惯性测量误差累积的问题^[9],有效提高系统精度和鲁棒性。

为实现工业现场环境中融入式人机交互测量,本文搭建了一个集成无重叠视场多相机和 IMU 的智能测量头盔设备,采用视觉惯性定位测量方法实现制造现场全局定位。头盔上各传感器位姿参数的准确性对定位测量结果具有显著影响^[10-11],多传感器集成系统和制造现场的高精度测量对标定方法提出了更高的要求。针对视觉惯性系统标定,Furgale 等^[12]开发了传感器标定工具 Kalibr,它通过连续时间批量估计和最大似然理论,联合估计不同传感器之间的空间位姿关系,具有较高的标定精度,但其对相机-IMU 标定和多相机标定需要运行不同的标定流程,当相机之间无重叠视场时,难以在标定物坐标系中同时定位。Eckenhoff 等^[13]在 MSCKF 滤波框架下对多相机和 IMU 之间的空间位姿进行了在线估计。Liu 等^[14]将外参扩充在状态向量中,采用光束平差优化多相机视觉惯性系统的初始估计量和外参关系。在线标定方法可以在系统运行期间快速构建或恢复外部参数,然而在工业应用中,设备各传感器外参应在测量前获取且不会轻易移位,同时在线标定精度难以满足高精度测量要求。

上述方法通常基于相机和 IMU 各自测量信息进行运动匹配,易受环境异常值的影响,针对不同待标定系统,借助外部设备或观测量提供约束条件辅助校准的方法也获得了广泛研究。Ouyang 等^[15]提出了一种将相机、IMU 坐标系与系统主体坐标系对齐的外参校准方法,系统固定在转台上绕两正交轴旋转,基于扩展卡尔曼滤波估计外参,其中转台仅提供旋转运动,无法提供角度基准。贾俊等^[16]利用全站仪和标定场对双目相机和 IMU 进行了空间标定,适用于大型 IMU 和相机组合的应用。Zhou 等^[17]采用全球导航卫星系统(GNSS)测量信息辅助实现了车载多相机和 IMU 之间的外参校准,通过 GNSS 提供无漂移全局姿态信息增强状态估计准确性,适用于车载场景下的高精度标定。

为实现融入式定位测量头盔中多相机 IMU 系统的高精度标定,本文提出了一种集成精密三轴转台的一体化标定方法。该方法利用三轴转台提供精密角度基准,建立空间角度约束提高传感器位姿标定精度。同时,三轴转台具有良好的集成性与动态性能,转台带动系统旋转,扩展相机拍摄视野,能够有效克服多相机之间无重叠视场的限制。此外,IMU 对载体运动的加速度和角速度敏感,转台既可以提供角度基准,还可以作为运动载体,对惯性测量单元进行运动激励。利用精密三轴转台作为标定平台对各传感器坐标系进行统一,通过在转台上的单次安装,实现了多传感器系统的

一体化标定,为工程应用提供了一种高精度、高效率的标定方法。

2 系统描述和标定原理

本文所述融入式人机交互定位测量系统以可穿戴头盔(图 1)作为载体,可应用于工业制造中数字化测量及装配,基于增强现实技术将全局定位信息和局部测量信息相结合,完成制造偏差的精密测量,实现以可穿戴头盔为核心硬件、以工作人员为中心的智能测量方式。

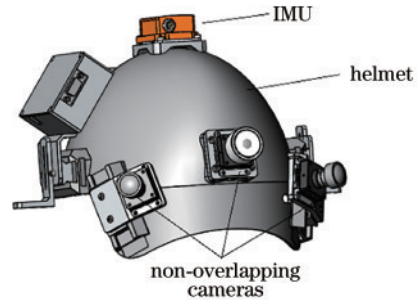


图 1 融入式定位测量头盔

Fig. 1 Immersive positioning and measuring helmet

头盔上视觉惯性组合定位系统用于实时跟踪头盔的动态六自由度信息,头盔后方固连三台无重叠视场相机,通过拍摄部署在环境中的合作标记,并基于空间后方交会原理求解头盔位置和姿态。多相机可以有效扩大测量视场范围,适应大空间工业现场测量环境,降低了对装配现场通视条件的要求,通过多相机与空间标记的紧密约束关系提高位姿求解精度。IMU 固定在头盔上方,测量载体运动过程中的加速度和角速度,通过连续时间积分预测头盔系统位姿,根据 IMU 和相机之间的外参融合运动信息和角度交会信息,解决相机快速运动下的误匹配问题,提高测量系统动态性能。

标定的目的是获得 IMU 坐标系到相机坐标系的外参、各相机内参以及不同相机坐标系之间外参,通过引入精密三轴转台,实现上述参数的一体化标定,标定方法示意图如图 2 所示。外参标定需求解两坐标系之间的旋转和平移,对于 IMU 外参标定,根据转台三轴在不同位置下的坐标系变换矩阵构成角度控制场,建立初始位置重力矢量与 IMU 坐标系下重力矢量之间的变换关系,利用重力矢量不变性求解旋转矩阵。当转台带动系统做匀速圆周运动时,通过向心加速度可得旋转半径,旋转半径同 IMU 与转台之间的平移矢量存在几何约束关系。对于相机内外参标定,单个相机作为二维视觉传感器,转动转台外框和中框,即绕竖直转轴和水平转轴转动,便可覆盖相机全部视场,优化求解相机内外参数。在建立了各传感器坐标系与转台坐标系的关联后,即可进一步解算目标参数,实现多传感器系统的集成标定。

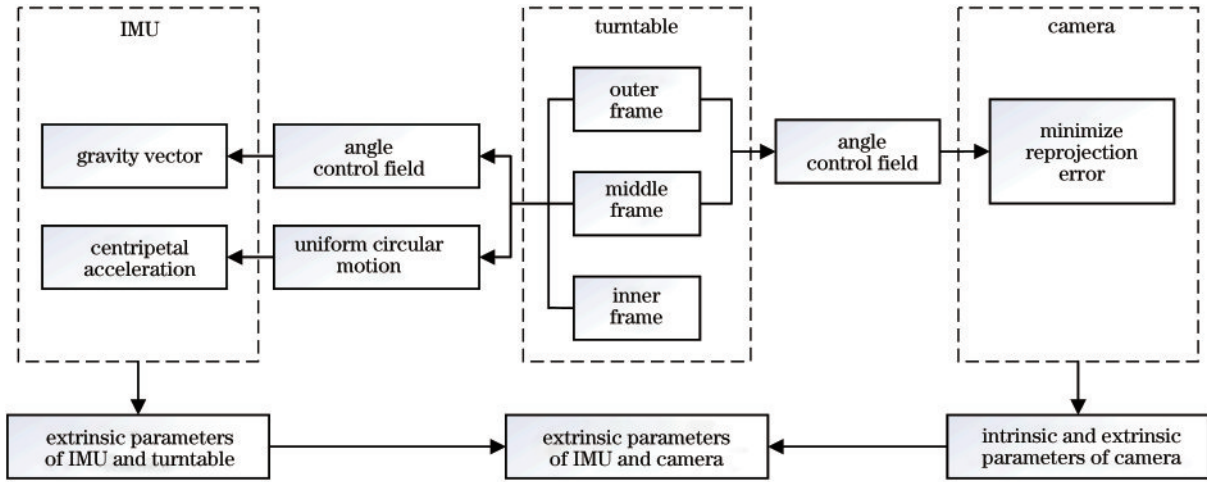


图 2 一体化标定方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of integrated calibration method

3 视觉惯性系统标定方法

基于精密角度基准的视觉惯性系统标定模型如图 3 所示,待标定系统包括若干个无重叠视场的相机以及一个 IMU,各传感器刚性连接,待标定系统固定在精密三轴转台内框。标定模型中涉及四个坐标系:世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 、转台坐标系 $O_T-X_TY_TZ_T$ 、相机坐标系 $O_{C_i}-X_{C_i}Y_{C_i}Z_{C_i}(i=1,2,\dots,n)$ 、IMU 坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$ 。其中,世界坐标系建立在平面靶标上,转台坐标系原点位于转台旋转中心,坐标轴与转台旋转轴重合,相机坐标系 Z 轴与光轴重合, Y 轴竖直向下, IMU 坐标系根据出厂设置定义。

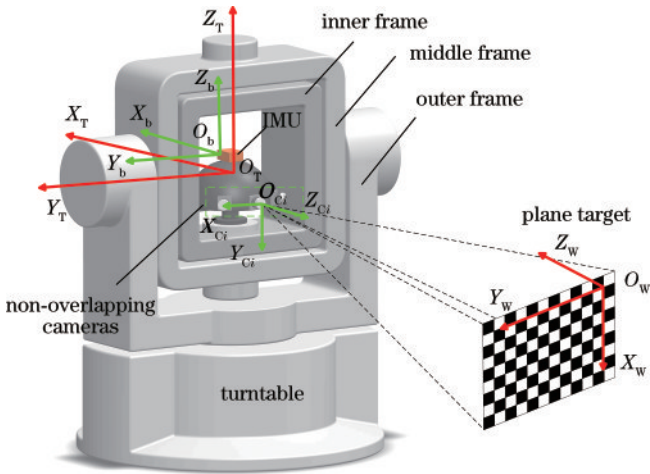


图 3 基于精密角度基准的视觉惯性系统标定模型

Fig. 3 Calibration model of visual-inertial system based on precision angle reference

3.1 IMU 外参标定

3.1.1 IMU 误差模型

IMU 误差模型包括系统误差和随机误差。系统误差包括:比例因子误差、零偏误差、不重合和非正交误差等。随机误差主要包含随机游走误差和零偏不稳

定性误差。系统误差可以通过传感器标定来消除,外参标定过程中使用了 IMU 加速度计数据,对加速度计误差建模如下。

理想加速度计三轴正交且与 IMU 主体坐标系对齐,然而由于装配和加工误差,实际加速度计坐标系三轴非正交且与主体坐标系不重合,因此定义轴偏差变换矩阵 M ,将非正交加速度计坐标系下测量值 ${}^s a$ 转换至正交主体坐标系下输出值 ${}^b a$ 。

$${}^b a = M \cdot {}^s a, \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{yz} & \alpha_{zy} \\ \alpha_{xz} & 1 & -\alpha_{zx} \\ -\alpha_{xy} & \alpha_{yx} & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: α_{ij} 代表第 i 个加速度计坐标轴绕第 j 个主体坐标轴的旋转角。

加速度计输出值还受到比例因子误差和偏置的影响,定义比例因子矩阵 G 和偏置向量 b 表示为

$$G = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$b = [b_x \ b_y \ b_z]^T. \quad (4)$$

矩阵 G 中对角线上各项代表加速度计三轴真实值与测量值之间的比值,向量 b 中各项为加速度计各轴零偏误差。建立加速度计误差模型,表示为

$${}^b a = M \cdot G \cdot ({}^s a + b + v), \quad (5)$$

式中: v 为加速度计测量白噪声。由于在标定过程中使用信号平均值,因此可忽略测量噪声的影响,根据加速度计静止状态下测量值二范数等于重力加速度值的原则建立代价函数优化求得系统误差 M 、 G 、 b ,从而消除系统误差对加速度计输出值的影响。

3.1.2 IMU 与转台旋转矩阵标定

通过上述准直校正和补偿,消除了 IMU 系统误差。静止状态下加速度计输出值为 ${}^b a = [a_x \ a_y \ a_z]^T$,表示重力对惯性器件施加的反作用力,对其进行归一化求得 IMU 坐标系下的重力矢量为

$${}^b\mathbf{g} = -\frac{{}^b\mathbf{a}}{\|{}^b\mathbf{a}\|} = -\frac{1}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

转台坐标系原点位于其旋转中心,初始位置转台坐标系 $O_T X_T$ 轴、 $O_T Y_T$ 轴、 $O_T Z_T$ 轴分别与转台外框转轴、中框转轴和内框转轴重合,标定过程中转台各轴转动多个位置,当外框转动角度 α 、中框转动角度 β 、内框转动角度 γ 时,转台坐标系相对其初始位置转动的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_{(i)} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

初始位置转台坐标系下重力矢量为 ${}^T\mathbf{g}_0$,转台三轴旋转后,转台坐标系相对其初始位置转动了 $\mathbf{R}_{(i)}$,则当前位置转台坐标系下重力矢量为

$${}^T\mathbf{g}_{(i)} = \mathbf{R}_{(i)} \cdot {}^T\mathbf{g}_0 \quad (8)$$

IMU 与转台之间待标定旋转矩阵表示为 ${}^T\mathbf{R}$,则 IMU 测量的重力矢量 ${}^b\mathbf{g}_{(i)}$ 与转台坐标系下重力矢量之间的转换关系为

$${}^T\mathbf{g}_{(i)} = {}^T\mathbf{R} \cdot {}^b\mathbf{g}_{(i)} \quad (9)$$

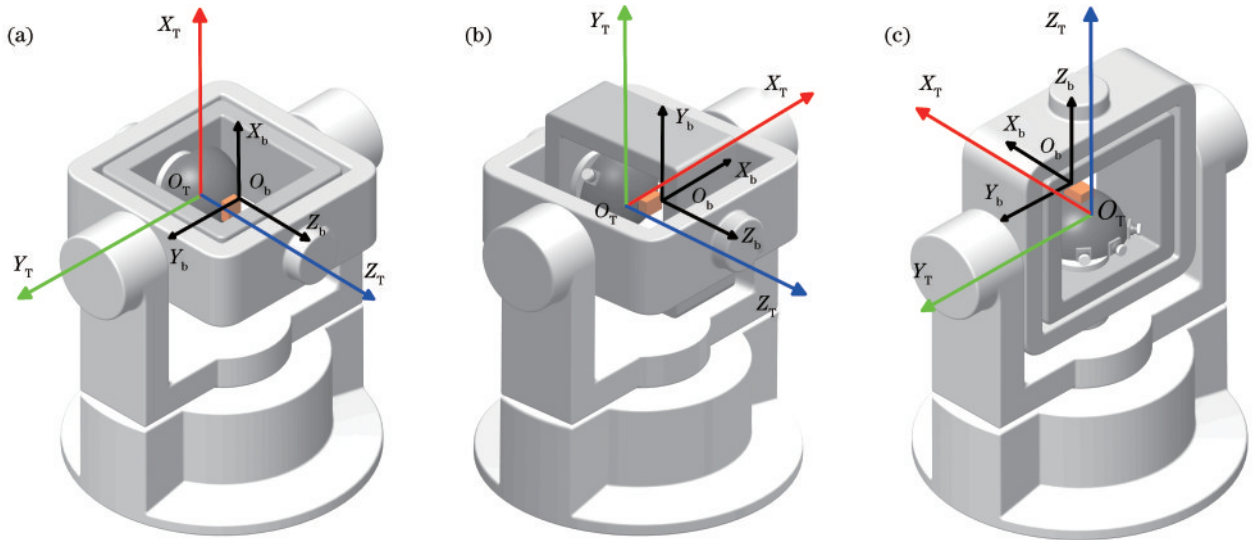


图 4 转台不同姿态下坐标系方向。(a)X轴竖直;(b)Y轴竖直;(c)Z轴竖直

Fig. 4 Coordinate system direction of turntable under different attitudes. (a) X-axis vertical; (b) Y-axis vertical; (c) Z-axis vertical

转台外框旋转轴与重力方向相同,当转台以恒定角速度 ω 绕外框转轴匀速旋转时,IMU 在水平面内做匀速圆周运动,受到向心加速度 ${}^b\mathbf{a}_n$ 与重力加速度 ${}^b\mathbf{g}$ 的共同作用,加速度计输出值 ${}^b\mathbf{a}$ 为两者的矢量合成,其中重力加速度可由静止状态下加速度计输出值获得。

$${}^b\mathbf{a} = {}^b\mathbf{a}_n + {}^b\mathbf{g} \quad (12)$$

则 IMU 绕转台外框转轴做匀速圆周运动时的旋转半径为

结合式(8)和式(9),转台旋转 n 个不同位置,可以累加出 n 个方程,表示为

$${}^T\mathbf{g}_0 = \left[\begin{matrix} (\mathbf{R}_{(1)})^{-1} & (\mathbf{R}_{(2)})^{-1} & \cdots & (\mathbf{R}_{(n)})^{-1} \end{matrix} \right] \cdot {}^T\mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} {}^b\mathbf{g}_{(1)} & {}^b\mathbf{g}_{(2)} & \cdots & {}^b\mathbf{g}_{(n)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

初始位置转台坐标系下的重力矢量 ${}^T\mathbf{g}_0$ 为定值,但会受到转台调平误差的影响,从而影响求解的旋转矩阵的精度,根据重力矢量不变性,由式(10)构建最小化目标函数,得到

$$\min \sum_{i=1}^{n-1} \|F_{i+1}({}^T\mathbf{R}) - F_i({}^T\mathbf{R})\|^2 = \min \sum_{i=1}^{n-1} \|\mathbf{R}_{(i+1)}^{-1} \cdot {}^T\mathbf{R} \cdot {}^b\mathbf{g}_{(i+1)} - \mathbf{R}_{(i)}^{-1} \cdot {}^T\mathbf{R} \cdot {}^b\mathbf{g}_{(i)}\|^2 \quad (11)$$

采用 Levenberg-Marquardt 算法求得单位正交矩阵 ${}^T\mathbf{R}$ 的最小二乘解,从而获得 IMU 到转台的外参旋转矩阵。

3.1.3 IMU 与转台平移向量标定

平移向量的求解利用匀速圆周运动下向心加速度数值的一致性,为从加速度数据中分离向心加速度和重力加速度,需使系统绕竖直转轴转动。根据转台坐标系定义,通过转动转台中框、内框,可分别使坐标系的 $O_T X_T$ 轴、 $O_T Y_T$ 轴、 $O_T Z_T$ 轴处于竖直状态且与外框转轴重合,如图 4 所示。

$$r = \frac{{}^b\mathbf{a}_n}{\omega^2} = \frac{\|{}^b\mathbf{a} - {}^b\mathbf{g}\|}{\omega^2} \quad (13)$$

在图 4 所示三种姿态下,分别采集静止状态下加速度计输出值和绕外框转轴匀速旋转时加速度计输出值,求得绕三个不同坐标轴做匀速旋转运动时的旋转半径 r_x, r_y, r_z 。定义 IMU 坐标系到转台坐标系的平移向量为 ${}^T\mathbf{T} = [t_x \ t_y \ t_z]^T$,由图 5 可知,平移向量各分量的大小与三个旋转半径之间存在如下几何关系:

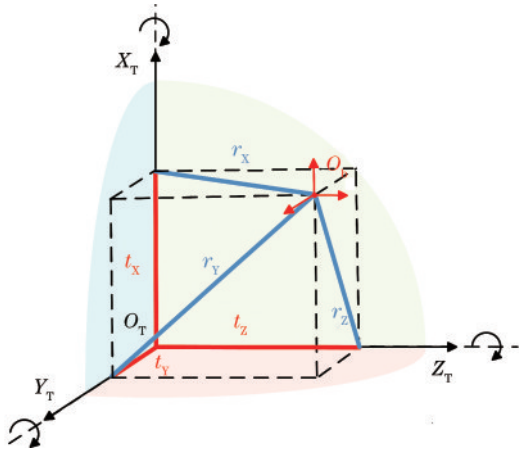


图 5 平移向量和旋转半径之间几何关系

Fig. 5 Geometric relationship between translation vector and rotation radii

$$\begin{cases} t_x^2 + t_y^2 = r_z^2 \\ t_z^2 + t_x^2 = r_y^2 \\ t_y^2 + t_z^2 = r_x^2 \end{cases} \quad (14)$$

IMU 到转台之间平移向量的大小可以根据上式优化求出,其中, t_x, t_y, t_z 为转台坐标系下的平移分量,不受 IMU 坐标系三轴朝向的影响,根据旋转时向心加速度在 IMU 坐标系下的方向,即可判断出平移向量的方向。

3.2 相机内外参标定

相机标定采用针孔成像模型,世界坐标系中一点 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 经投影变换到图像像素平面,其投影变换关系为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f/d_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c_w R \\ {}^c_w T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} {}^c_w R \\ {}^c_w T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中: Z_c 为点 P 在相机坐标系下光轴坐标; (u, v) 为像点坐标; f 为相机焦距; d_x, d_y 为 x, y 方向单位像素的距离; (u_0, v_0) 为相机物理坐标系原点在像素坐标系中的坐标; 相机内参矩阵表示为 \mathbf{K} ; $({}^c_w R, {}^c_w T)$ 为相机与世

界坐标系之间的旋转和平移关系。

在实际成像中,空间点投影到成像平面的位置会发生非线性畸变,引入径向畸变参数 (k_1, k_2, k_3) 和切向畸变参数 (p_1, p_2) , 对图像物理坐标系中的归一化坐标进行畸变校正,

$$\begin{cases} x_d = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y_d = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{cases} \quad (16)$$

式中: (x, y) 为图像物理坐标系中的归一化坐标; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 表示空间点归一化到图像物理平面后到坐标原点的距离; (x_d, y_d) 为经过畸变校正后点的坐标。

在相机标定过程中引入精密三轴转台,转台坐标系的 $O_T Z_T$ 轴、 $O_T Y_T$ 轴与转台的外框转轴、中框转轴重合,在此位置下定义外框转动角 $\alpha = 0^\circ$, 中框转动角 $\beta = 0^\circ$ 。标定时转动转台外框和中框,即可覆盖相机视场,转台坐标系的旋转矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_{(k)} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

根据相机与转台之间外参 $({}^c T, {}^c R)$ 及转台旋转矩阵 $\mathbf{R}_{(k)}$, 可得转台旋转前后不同位置相机坐标系之间的变换关系,结合式(15)相机成像模型,转台转动后各不同位置图像中像素坐标与世界坐标的关系为

$$Z_{c_k} \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} {}^c R & {}^c T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{(k)} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c R & {}^c T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c R_0 & {}^c T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中: (u_k, v_k) 为转台旋转第 k 次时,相机拍摄图像中点的像素坐标; $\mathbf{R}_{(k)}$ 为转台第 k 次旋转后相对其初始位置的旋转矩阵; $({}^c R_0, {}^c T_0)$ 表示初始位置相机与世界坐标系间的旋转和平移。

多次转动转台,根据式(18)构建最小化目标函数:

$$\min \sum_{k=0}^m \sum_{j=1}^l \| p_{kj} - F_{kj}(\mathbf{K}, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, {}^c R, {}^c T, {}^c R_0, {}^c T_0) \|^2 = \min \sum_{k=0}^m \sum_{j=1}^l [(u'_{kj} - u_{kj})^2 + (v'_{kj} - v_{kj})^2]. \quad (19)$$

目标函数表示 $m + 1$ 个不同转台位置下相机拍摄的所有像点重投影误差平方和, $p_{kj}(u'_{kj}, v'_{kj})$ 表示转台旋转第 k 次时,相机拍摄图像中第 j 个点的实际像素坐标,函数 F_{kj} 表示空间点经式(18)求得的畸变补偿后的重投影点坐标 (u_{kj}, v_{kj}) , 括号中各变量为待优化参数,采用 Levenberg-Marquardt 算法最小化所有像点重

投影误差,优化求解相机内参和相机与转台之间外参。

根据 3.1 节和 3.2 节求得 IMU 坐标系到转台坐标系外参 $({}^b T, {}^b R)$, 各相机坐标系到转台坐标系外参 $({}^c_i R, {}^c_i T) (i = 1, 2, \dots, n)$, 以转台坐标系作为中转,可获得 IMU 与相机 $(i = 1)$ 之间外参 $({}^c_1 R, {}^c_1 T)$ 以及各相机之间外参 $({}^c_n R, {}^c_n T)$, 即

$$\begin{cases} {}_b^{c1}R = {}_{c1}^T R^{-1} \cdot {}_b^T R \\ {}_b^{c1}T = {}_{c1}^T R^{-1} \cdot ({}_b^T T - {}_{c1}^T T) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} {}_{c_n}^{c1}R = {}_{c1}^T R^{-1} \cdot {}_{c_n}^T R \\ {}_{c_n}^{c1}T = {}_{c1}^T R^{-1} \cdot ({}_{c_n}^T T - {}_{c1}^T T) \end{cases} \quad (21)$$

4 仿真与实验

4.1 标定方法仿真

设计仿真实验验证所提标定方法的精度。仿真部分采用 MATLAB 完成,根据刚体运动学模拟系统在转台上的运动,模拟的相机和 IMU 特性与实验所用真实硬件特性一致。IMU 采样率为 100 Hz,每个运动状态下数据采集时长为 5 s,在生成的仿真数据中添加高斯白噪声 ($\sigma_a = 60 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$) 和随机游走误差 ($\sigma_{ba} = 8 \times 10^{-6} (\text{m/s}^3)/\sqrt{\text{Hz}}$),根据采样时间对噪声标准差进行离散化处理。相机采用带畸变的针孔成像模型,相机内参和畸变系数与真实成像参数一致,将已知角点投影到图像像素平面,添加服从正态分布的像点噪声,噪声在 u, v 方向的标准差为 0.06 pixel。使用的模拟平面棋盘格角点数为 11×8 ,点间距为 20 mm,通过限制相机在转台上的运动轨迹,确保校准目标上的点在每个模拟位置中保持可见。

设置 IMU 坐标系到相机坐标系外参旋转和平移真实值如表 1 所示,其中旋转采用欧拉角 $[\alpha \ \beta \ \gamma]$ 表示,平移向量表示为 $[T_x \ T_y \ T_z]$ 。优化算法收敛,IMU 优化残差范数平方值为 1.0173×10^{-4} ,相机平均重投影误差为 0.0742 pixel。仿真结果及其与真实值之间的偏差如表 1 所示,其中角度偏差小于 0.1° ,位置偏差小于 4 mm,证明本文标定方法可以获得高精度外参标定结果。三轴转台提供精密角度基准,通过转台转动构建角度控制场,在优化函数中增加空间角度约束,从而提高了传感器外参标定精度。

表 1 仿真结果及其与真值的偏差

Table 1 Simulation results and deviations from the true values

Parameter	True value	Simulation result	Deviation
$\alpha / (^\circ)$	-170.719	-170.742	0.023
$\beta / (^\circ)$	84.901	84.899	0.002
$\gamma / (^\circ)$	101.325	101.302	0.023
T_x / mm	14.607	13.654	0.953
T_y / mm	-144.036	-142.963	-1.073
T_z / mm	-183.533	-179.668	-3.865

4.2 标定实验

为了验证本文所提标定方法的可行性,搭建了如图 6 所示的实验场景,由精密三轴转台、多相机 IMU 系统、平面靶标和计算机构成。将多相机 IMU 待标定系统固定在转台内框,保证相机具有较好的拍摄视场。实验采用的 IMU 为 Xsens 公司的 MEMS 惯性测量单

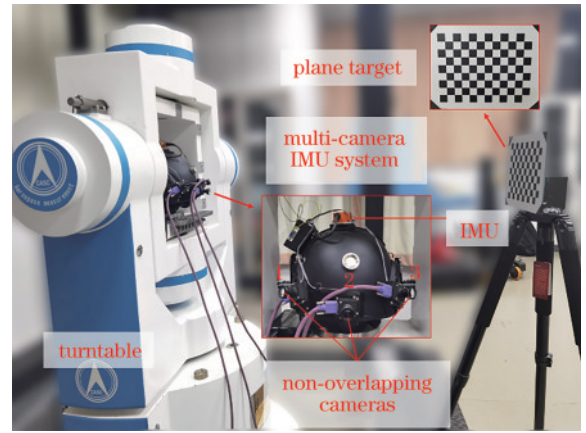


图 6 多相机 IMU 系统标定实验场景

Fig. 6 Multi-camera IMU system calibration experiment scene

元 MTi-10,内置三轴加速度计和三轴陀螺仪,可以提供高达 2000Hz 的惯性动态数据,相机为 Basler dart 板级相机,三台相机固定在头盔后方,具有非重叠视场。精密三轴转台各轴角定位精度为 $\pm 1''$,平面靶标角点精度为 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 。表 2 中列出了多相机 IMU 系统的传感器相关参数。

表 2 多相机 IMU 系统传感器参数

Table 2 Sensor parameters of multi-camera IMU system

Device	Main parameter	Value
IMU	Standard full range $/(m \cdot s^{-2})$	200
	In-run bias stability $/\mu\text{g}$	15
	Focal length /mm	8
Camera	Resolution $/(pixel \times pixel)$	1600×1200
	Pixel size $/(\mu\text{m} \times \mu\text{m})$	4.5×4.5

根据前文所述标定原理,设置精密三轴转台如下转动:

1) 将转台转到初始位置,以初始位置为中心,三轴转台外框、中框和内框分别在 -50° 到 $+50^\circ$ 之间转动,步长为 25° ,从而产生 $5 \times 5 \times 5$ 共 125 个标定位置,在每个标定位置处静止采集 IMU 加速度计数据一段时间,对应记录转台三轴转动角度。

2) 通过转台内框和中框的旋转,分别使转台坐标系 $O_T X_T$ 轴、 $O_T Y_T$ 轴、 $O_T Z_T$ 轴竖直,在三个位置下分别采集静止状态下加速度计数据,和系统绕转台外框转轴以 $60 (^\circ)/\text{s}$ 的角速度匀速旋转时加速度计数据。

3) 将转台转到相机标定初始位置,依次转动转台外框和中框,即先水平方向转动外框覆盖相机水平视场,然后垂直方向转动一次,再进行水平方向转动,如此反复转动覆盖相机所有视场,共转动 4×4 次。转动过程中相机拍摄平面靶标,并记录转台转动角度。

实验计算得到各相机内参结果如表 3 所示,相机和 IMU 之间外参、各相机之间外参标定结果如表 4 所示。相机内参标定参数包括相机焦距、主点坐标、畸变系数,外参标定参数包括 IMU 坐标系到相机坐标系的

表 3 多相机内参标定结果

Table 3 Calibration results of intrinsic parameters of multi-camera

Intrinsic parameter	Camera 1	Camera 2	Camera 3
f/mm	7.8131	7.8031	7.8115
u_0/pixel	796.1786	794.6990	793.3861
v_0/pixel	592.8249	588.0393	602.7344
k_1	-0.0024	-0.0021	-0.0020
k_2	7.3610×10^{-5}	4.6434×10^{-5}	3.7234×10^{-5}
k_3	-6.6751×10^{-7}	5.8504×10^{-8}	2.9718×10^{-7}
p_1	1.2328×10^{-4}	1.1121×10^{-4}	7.6300×10^{-5}
p_2	-6.4214×10^{-5}	6.4872×10^{-6}	2.9047×10^{-5}

表 4 多相机 IMU 系统外参标定结果

Table 4 Calibration results of extrinsic parameters of multi-camera IMU system

Extrinsic parameter	IMU to camera 2	Camera 2 to camera 1	Camera 2 to camera 3
$\alpha/(\circ)$	-116.264	-18.319	-18.959
$\beta/(\circ)$	83.839	-42.240	41.549
$\gamma/(\circ)$	157.411	-11.919	7.684
T_x/mm	0.929	-83.565	84.975
T_y/mm	-138.920	47.372	43.953
T_z/mm	-193.072	-46.396	-48.929

旋转角和平移向量,以及各相机坐标系之间的旋转角和平移向量。

采用一致的标定步骤进行 10 次重复标定实验,并计算 IMU 与相机外参标定结果的标准差(SD),如表 5 所示,以标准差衡量标定方法重复性精度,由结果可知,角度重复性精度小于 0.2° ,位置重复性精度小于 5 mm,验证了所提标定方法的稳定性。

表 5 外参标定结果标准偏差

Table 5 Standard deviations of extrinsic parameters calibration results

Extrinsic parameter	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	T_x/mm	T_y/mm	T_z/mm
Standard deviation	0.156	0.015	0.156	1.961	1.035	4.679

4.3 验证实验

由于相机原点的特殊性和 IMU 尺寸的限制,难以准确获得相机和 IMU 之间真实外参关系。传感器之间位姿参数的准确性将直接影响系统组合定位的精度,因此设计与目前较先进且标定性能良好的离线标定工具 Kalibr 的对比实验,使用 Kalibr 对相机和 IMU 进行外参标定,标定时使用和转台标定过程相同的平面靶标。然后分别采用两种标定方法多次标定结果的平均值作为标定参数,对多相机 IMU 系统进行组合定位测试,通过对比定位精度来评价标定方法的性能。

将多相机 IMU 系统固定在转台上,转台中枢带动系统以 $1(\circ)/\text{s}$ 的角速度转动 20° ,转动过程中保证平面靶标处于相机视场内,系统运动轨迹为一段绕转台中枢转轴的圆弧轨迹。分别使用两种方法标定的外参结果,通过扩展卡尔曼滤波融合相机 IMU 数据,计算得到两组相机坐标系原点在世界坐标系下的运动轨迹。在同样的转动范围内以步长 0.1° 转动中枢,每转动一次静止采集相机拍摄平面靶标的图片,计算相机坐标系在世界坐标系下的位姿,从而获得一组静态相机轨迹。

在转台带动下系统运动轨迹为标准圆弧,采用最小二乘法拟合静态相机运动轨迹,其拟合误差和拟合半径如表 6 所示,运动轨迹拟合误差较小。相机静止状态下拍摄平面靶标,避免了图像中运动模糊的影响,相机平均重投影误差为 0.063 pixel,具有较高的可信度,证明静态相机求得的运动轨迹与系统运动的真实轨迹基本一致。

表 6 静态相机轨迹拟合误差和拟合半径

Table 6 Fitting error and fitting radius of static camera trajectory

Parameter	Arc trajectory
Fitting error /mm	0.2122
Fitting radius /mm	179.61

以静态相机轨迹作为真实轨迹,其拟合圆与拟合轴线作为真实值,对比滤波融合后的运动轨迹与真实轨迹之间的偏差。静态相机轨迹和两组动态相机轨迹的拟合圆如图 7 所示,可以看出,采用本文标定方法获

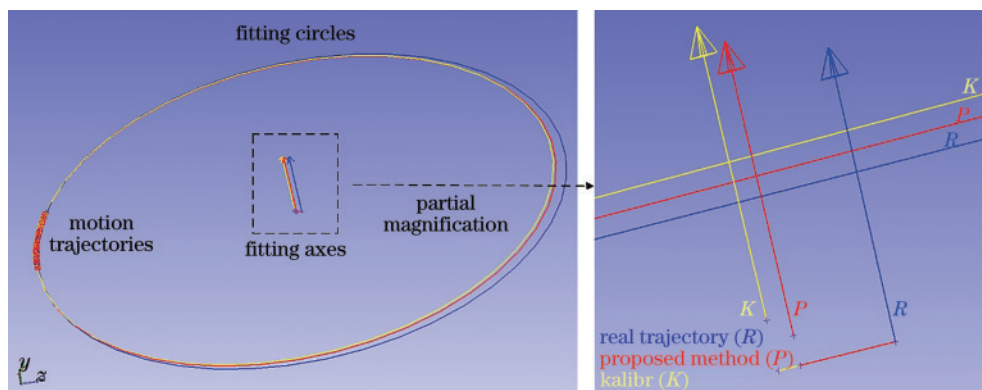


图 7 静态相机轨迹和动态相机轨迹拟合圆

Fig. 7 Fitting circles of static camera trajectory and dynamic camera trajectories

得的外参进行滤波融合计算,求得的运动轨迹与真实轨迹更为接近。

通过运动轨迹拟合出的圆弧轴线与真实轴线之间的偏差,反映了组合定位结果与真实值之间的偏差,如表 7 所示,其中,轴线角度偏差表示拟合轴线偏离真实轴线的角度,轴线距离偏差表示将轴线投影至同一平面内,拟合轴线投影点与真实轴线投影点之间的距离差。

表 7 相机运动轨迹拟合半径及拟合轨迹同真实轨迹之间的偏差
Table 7 Fitting radii of camera trajectories and deviations between fitting trajectories and real trajectory

Parameter	Proposed method	Kailbr
Fitting radius /mm	176.42	175.65
Axis angle deviation /($^{\circ}$)	0.3309	0.5545
Axis distance deviation /mm	3.47	4.28

由表 7 可知,采用本文标定参数计算的运动轨迹与真实轨迹之间的轴线角度偏差和轴线距离偏差均优于采用 Kalibr 标定计算的结果,其中轴线角度偏差降低 40.32%,轴线距离偏差降低 18.93%,且拟合半径与真实半径更为接近。实验结果表明,在多相机 IMU 系统组合定位测试中,使用本文标定方法求得的外参可以获得更高的定位精度,证明相同实验条件下,所提方法的外参标定结果更为可靠。本文标定方法利用三轴转台提供精密角度基准作为约束,具有较高的标定精度,可以更好地满足视觉惯性精密定位场景的标定要求。

5 结 论

本文提出了一种视觉惯性系统位姿高精度一体化标定方法。该方法引入精密三轴转台作为标定设备提供高精度角度基准,通过转台构建角度控制场,利用空间角度约束提高了传感器位姿标定精度。转台三轴集成度高且灵活可控,通过转台带动系统转动,有效克服了相机视场的限制,能够完成无重叠视场多相机的标定。根据 IMU 敏感重力矢量和向心加速度的特性,利用转台运动构造约束条件,提供运动激励。该方法可以实现多相机 IMU 系统空间位姿关系的一体化标定,具有良好的集成性和动态性能。仿真结果表明,标定结果与真实值之间的角度偏差在 0.1° 以内,位置偏差在 4 mm 以内,采用重复性实验验证了标定方法的稳定性。在多相机 IMU 系统组合定位测试中,相比于传统标定方法 Kalibr 计算的外参结果,采用本文方法获得的外参标定结果进行传感器融合定位,所求运动轨迹的拟合轴线角度偏差降低 40.32%,轴线距离偏差降低 18.93%,本文方法在标定精度上有明显提升,能够满足制造现场精密定位场景的标定需求。

参 考 文 献

- [1] Zhong R Y, Xu X, Klotz E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review[J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 616-630.
- [2] Lim Y, Gardi A, Pongsakornsathien N, et al. Experimental characterisation of eye-tracking sensors for adaptive human-machine systems[J]. *Measurement*, 2019, 140: 151-160.
- [3] Boru B, Erin K. Novel technique for control of industrial robots with wearable and contactless technologies[J]. *Measurement*, 2022, 192: 110850.
- [4] Li P L, Qin T, Hu B T, et al. Monocular visual-inertial state estimation for mobile augmented reality[C]//2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, October 9-13, 2017, Nantes, France. New York: IEEE Press, 2017: 11-21.
- [5] Liang Q, Liu M. A tightly coupled VLC-inertial localization system by EKF[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 3129-3136.
- [6] Campos C, Elvira R, Rodriguez J J G, et al. ORB-SLAM3: an accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap SLAM[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(6): 1874-1890.
- [7] 郭金辉, 陈秀万, 王媛. 视觉惯性 SLAM 研究进展[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(1): 1-8.
Guo J H, Chen X W, Wang Y. A review of visual inertial SLAM research development[J]. *Fire Control & Command Control*, 2021, 46(1): 1-8.
- [8] Yousif K, Bab-Hadiashar A, Hoseinnezhad R. An overview to visual odometry and visual SLAM: applications to mobile robotics[J]. *Intelligent Industrial Systems*, 2015, 1(4): 289-311.
- [9] Male J, Martinez-Hernandez U. Recognition of human activity and the state of an assembly task using vision and inertial sensor fusion methods[C]//2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology, March 10-12, 2021, Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2021: 919-924.
- [10] Maxudov N, Ercan A O, Erdem A T. Effect of camera-IMU displacement calibration error on tracking performance[C]//2015 IEEE International Conference on Image Processing, September 27-30, 2015, Quebec City, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2015: 4476-4480.
- [11] Huang G Q. Visual-inertial navigation: a concise review [C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 20-24, 2019, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2019: 9572-9582.
- [12] Furgale P, Rehder J, Siegwart R. Unified temporal and spatial calibration for multi-sensor systems[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, November 3-7, 2013, Tokyo, Japan. New York: IEEE Press, 2013: 1280-1286.
- [13] Eckenhoff K, Geneva P, Bloecker J, et al. Multi-camera visual-inertial navigation with online intrinsic and extrinsic calibration[C]//2019 International Conference

- on Robotics and Automation (ICRA), May 20-24, 2019, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2019: 3158-3164.
- [14] Liu Y, Wang F, Zhang W, et al. Online self-calibration initialization for multi-camera visual-inertial SLAM[C]// 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December 12-15, 2018, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE Press, 2018: 192-199.
- [15] Ouyang C G, Shi S, You Z, et al. Extrinsic parameter calibration method for a visual/inertial integrated system with a predefined mechanical interface[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3086.
- [16] 贾俊, 朱锋, 张小红. 一种利用全站仪和检校场的相机/惯导空间标定方法[J]. 导航定位学报, 2020, 8(6): 6-13.
Jia J, Zhu F, Zhang X H. Visual and inertial sensors space calibration method using total station and calibration field[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020, 8(6): 6-13.
- [17] Zhou Y X, Li S Y, Xia C X, et al. Online visual-inertial extrinsic calibration utilizing GNSS measurements for vehicle applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(5): 4545-4557.