

## 视觉传感器和惯性传感器的时间标定方法

付凤杰<sup>1,2\*</sup>, 李辰懋<sup>1</sup>, 吴丽<sup>1</sup>, 刘衍青<sup>1</sup>, 朱冬晨<sup>1</sup>, 李嘉茂<sup>1,2</sup>, 张晓林<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术联合国家重点实验室-仿生视觉系统实验室, 上海 200050;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210

**摘要** 视觉惯性信息融合的同时定位和建图(SLAM)技术是机器人导航领域的热点问题。多模态数据同步是数据融合算法的前提,其关键在于获取不同传感器采集时刻的准确时间戳。视觉传感器的时间戳可通过硬件方法准确获得,而惯性传感器的时间戳通常粗略地用输出时间代替,这必将导致视觉惯性融合算法精度的降低。针对该问题提出了一种视觉惯性传感器的时间同步标定方法。首先设计了一种基于平面单摆的标定装置,视觉传感器与惯性传感器在平面单摆运动中独立捕获数据,并基于同一时钟添加时间标记;其次,提出了基于最小二乘法估计摆锤重心角位移函数和角速度函数的方法;最后,通过比较两个函数的相位差获得惯性传感器的输出延时和时间戳。实验结果表明所提方法的重复标定均方差为 0.018 ms,这证明所提方法的有效性。

**关键词** 机器视觉; 时间同步标定; 单摆标定装置; 视觉惯性同步; 视觉惯性传感器; 数据采集时间戳

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2415002

## Time Calibration Method for Vision Sensor and Inertial Sensor

Fu Fengjie<sup>1,2\*</sup>, Li Chenmao<sup>1</sup>, Wu Li<sup>1</sup>, Liu Yanqing<sup>1</sup>, Zhu Dongchen<sup>1</sup>,  
Li Jiamao<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaolin<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup> State Key Laboratory of Transducer Technology-Bionic Vision System Laboratory, Shanghai Institute of  
Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup> School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

**Abstract** Simultaneous localization and mapping (SLAM) based on visual-inertial information fusion is a hot topic in the field of robot navigation. Multimodal data synchronization is a premise of the data fusion algorithm, and the key to it is to accurately obtain the timestamps of the acquisition time of different sensors. While the timestamp of the vision sensor can be accurately obtained by the hardware method, that of the inertial sensor is usually roughly replaced by the output time, which lowers the accuracy of the visual-inertial fusion algorithm. In this paper, a method of time synchronization calibration of the visual-inertial sensor was proposed. A calibration device based on a planar simple pendulum was designed. The vision sensor and the inertial sensor captured data independently in the motion of the planar simple pendulum, and timestamps were added according to the same clock. Then, a method of estimating the angular displacement function and the angular velocity function of the pendulum's center of gravity was proposed by the least squares method. Finally, the output delay and timestamp of the inertial sensor were obtained by comparing the phase differences of the two functions. Experimental results show that the standard deviation of repeated calibration by the proposed method is 0.018 ms, which proves the effectiveness of the method.

收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-06-21; 录用日期: 2021-06-28

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-JSC034)、上海市“脑与类脑智能基础转化应用研究”市级重大科技专项资助(2018SHZDZX01)和张江实验室、中国科学院青年创新促进会(2018270)、上海市青年科技英才扬帆计划(20YF1457000)

通信作者: \*fengjiefu@mail.sim.ac.cn

**Key words** machine vision; time synchronization calibration; simple pendulum calibration device; visual-inertial synchronization; visual-inertial sensor; data acquisition timestamp

**OCIS codes** 150.1488; 150.4232; 100.2000

## 1 引言

同时定位和建图<sup>[1-3]</sup>(SLAM)技术在过去 30 年里取得了惊人的进步<sup>[4]</sup>。纯视觉 SLAM 方案<sup>[5]</sup>在高速运动或弱纹理场景存在前后帧图像失配问题,纯惯导方案因加速度计、陀螺仪等存在的零漂问题而无法长时间独立工作,而视觉惯性信息融合的 SLAM 方案以其鲁棒性优势而成为移动机器人导航<sup>[6]</sup>、无人驾驶<sup>[7-8]</sup>、无人机<sup>[9-10]</sup>等领域的热门研究课题<sup>[11]</sup>。

多模态数据是实现融合算法的基础,时间同步信息是多模态数据的重要组成部分。视觉惯性传感器的精确时间标定对于提升多模态数据质量和视觉惯性 SLAM 应用效果至关重要。文献[12-13]使用安装了转角编码器的单摆结构,对视觉传感器与惯性传感器间的相对旋转以及惯性传感器的轴对准、偏置和比例因子进行了标定,但未对视觉传感器和惯性传感器的时间信息进行标定。基于时间戳的增量时钟同步(TICSync)<sup>[14]</sup>方法实现了传感器时钟和主处理器之间的时钟映射,但需要各传感器提供时间戳支持。文献[15]在强调时间标定对于视觉惯性信息融合的重要性的同时,基于互相关法和相位一致法分别完成时间标定,并证明互相关法在短延时情况下具有高精度和稳定性的优势。文献[16]基于时间延迟迭代最近点算法(TD-ICP),得到 1~2 ms 的时间标定精度。文献[17]提出了使用标准计算机接口将多个传感器同步到本地计算机时间的框架 TriggerSync,使得计算机能基于 USB 接口的相机和惯性传感器搭建图像稳定系统。Furgale 等<sup>[18]</sup>在连续时间批量估计算法的基础上,进一步实现视觉传感器和惯性传感器的时间和空间关系的联合标定<sup>[19]</sup>和 Kalibr 时间标定工具<sup>[20]</sup>。Nikolic 等<sup>[21]</sup>提出了基于惯性传感器基准的多相机同步方法,该方法考虑了相机曝光时间变化的因素,在通过惯性传感器的读取信号触发相机同步的基础上,通过时间补偿使得惯性传感器和相机曝光中间时刻对齐。文献[20]的联合标定方法要求视觉惯性传感器在运动中拍摄固定标定板,易受光照、运动模糊等影响;文献[21]以惯性传感器的时间基准作为传感器系统的时间基准,使得传感器系统的时间精度受制于惯性传感器的时钟精度,且不支持多个惯性传感器的扩

展同步。

本文针对现有视觉惯性传感器在融合应用中的数据同步需求,从底层硬件建立视觉传感器和惯性传感器的硬件同步机制和数据同步方法。文献[22]使用硬件方法建立统一的时钟计时器,获取图像数据的时间戳(曝光中间时刻),并记录惯性数据的中断输出时间。在此基础上,本文提出了基于单摆结构的视觉传感器与惯性传感器的时间标定方法,准确估计出惯性数据的中断输出时刻相对于采集时刻的输出延时参数。本文通过实验证明以曝光中间时刻作为图像时间戳的正确性,同时使用惯性传感器的输出延时参数获得惯性时间戳(惯性数据采集时刻),最终实现视觉惯性信息的数据同步。

## 2 基本原理

### 2.1 视觉传感器与惯性传感器的时间标定原理

基于平面单摆结构的视觉传感器和惯性传感器的同步标定原理如图 1 所示。标定装置中,以旋转中心  $O$  为原点、重力方向为  $X$  轴正方向、水平向右方向为  $Y$  轴正方向建立坐标系,单摆在  $XOY$  平面上运动。刻度盘是以  $O$  为圆心的圆弧,摆锤和连杆刚性连接,视觉惯性传感器固定在摆锤上,视觉传感器朝向刻度盘并使其光轴尽可能地与刻度盘垂直。为方便表示,假设摆锤、连杆与待测传感器的重心为  $C$  点。

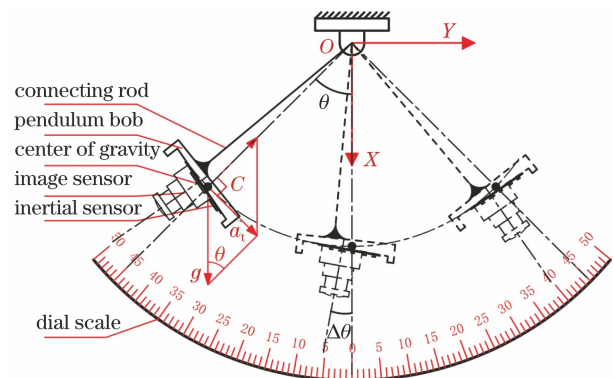


图 1 基于单摆的视觉传感器和惯性传感器的时间标定装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of time calibration device for vision sensor and inertial sensor based on pendulum  
视觉传感器与惯性传感器的时间标定过程如下。  
1) 基于平面单摆结构和同一时间基准,利用视

觉传感器和惯性传感器分别获取重心  $C$  点的角位移和角速度数据。当单摆静止时,  $C$  点在  $OX$  轴上, 此时视觉传感器光轴对应的刻度为  $\Delta\theta$ 。当单摆摆动时, 由于刻度盘圆心与单摆的旋转中心重合, 则  $OC$  相对  $OX$  的角位移  $\theta$  与视觉传感器(CAM)光轴对应的刻度值  $\theta_{\text{CAM}}$  在摆锤的运动过程中保持不变。则单摆重心  $C$  点的角位移可表示为

$$\theta = \theta_{\text{CAM}} - \Delta\theta. \quad (1)$$

假如惯性传感器的安装位置为  $I$  点, 由于惯性传感器和摆锤刚性连接且以  $O$  为中心做旋转运动, 则  $I$  点和  $C$  点的角速度相同, 即

$$\omega = \omega_I = \omega_{\text{IMU}}, \quad (2)$$

式中:  $\omega$  为重心  $C$  的角速度;  $\omega_I$  为  $I$  点的角速度;  $\omega_{\text{IMU}}$  为惯性传感器测得的角速度。至此, 通过视觉传感器和惯性传感器分别获得了摆锤重心  $C$  的角位移数据和角速度数据。

2) 建立角位移函数和角速度函数在弱阻尼振动中的关系并拟合方程。当运动速度不大时, 在空气中运动的物体所受到的阻力中压力项可忽略并以黏性项表示, 黏性阻力  $F$  的方向与运动物体的速度相反且大小与速率成正比:

$$F = -\gamma v = -\gamma l \omega = -\gamma l \frac{d\theta}{dt}, \quad (3)$$

式中:  $\gamma$  为阻力系数;  $v$  为物体运动速度;  $l$  为  $OC$  长度。忽略轴承摩擦力并对  $C$  点进行受力分析, 可得

$$ma_t = -mg \sin \theta + F, \quad (4)$$

式中:  $m$  为重心  $C$  的质量;  $a_t$  为切向加速度;  $g$  为重力加速度。当  $\theta$  较小时,  $\theta \approx \sin \theta$ , 由牛顿第二定律得物体的运动微分方程为

$$ml \frac{d^2\theta}{dt^2} + \gamma l \frac{d\theta}{dt} + mg\theta = 0. \quad (5)$$

令  $\frac{\gamma}{m} = 2\delta$ ,  $\frac{g}{l} = \omega_0^2$ , 则(5)式可表示为

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\delta \frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2\theta = 0, \quad (6)$$

式中:  $\omega_0$  为单摆阻尼为 0 时的固有角频率;  $\delta$  为阻尼系数。  $\delta^2 < \omega_0^2$  时为弱阻尼振动, 则微分方程的解为

$$\theta = \theta_m e^{-\delta t} \cos(\omega' t + \varphi), \quad (7)$$

式中:  $\theta_m$  为初始摆幅;  $\varphi$  为初始相位角;  $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ 。对(7)式求导, 可得

$$\omega = \theta_m e^{-\delta t} [-\delta \cos(\omega' t + \varphi) - \omega' \sin(\omega' t + \varphi)]. \quad (8)$$

当  $|\delta| \ll |\omega_0|$  时,  $\omega' = \omega_0$ , (8)式可以写成

$$\omega \approx -\theta_m \omega_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \varphi). \quad (9)$$

从(7)、(9)式可知, 重心  $C$  的角位移方程和角速度方程具有相同的角频率, 但相位上相差  $1/4$  周期。在单个周期内, 重心  $C$  的角位移方程和角速度方程可拟合为

$$f(t) \approx P_1 \sin(P_2 t + P_3) + P_4, \quad (10)$$

式中:  $f(t)$  为角位移和角速度函数的通用表示;  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  分别为待确定的幅值、角频率、初相位、偏移参数。

3) 视觉传感器数据与惯性传感器数据的时间偏差分析。单摆结构中, 重心  $C$  的理想角位移函数和角速度函数基于以传感器采集时间定义的时间戳。将角速度函数和角位移函数相邻极大(极小)值点的对应时间分别记为  $t_1$  和  $t_3$ , 则有  $t_1 = t_3 - T/4$ , 其中  $T$  表示拟合函数的周期, 如图 2 所示。

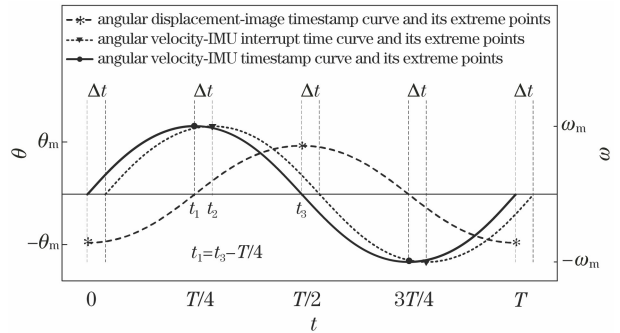


图 2 基于单摆结构的视觉传感器和惯性传感器的时间标定原理

Fig. 2 Time calibration principle of vision sensor and inertial sensor based on pendulum

真实传感器对物理量的测量存在延时输出情况。惯性传感器延时  $\Delta t$  时输出对应的极大(极小)值点为  $t_2$ , 对角位移拟合函数和角速度拟合函数求极值, 分别获得极值点对应的时间  $t_3$ 、 $t_2$  以及单摆的周期  $T$ , 则惯性传感器的中断输出延时  $\Delta t$  可表示为

$$\Delta t = t_2 - t_1 = t_2 - t_3 + T/4. \quad (11)$$

至此, 则完成了基于单个摆动周期数据的惯性传感器的中断输出延时标定, 但单周期数据的噪声可能对标定结果产生较大的影响。完成所有周期内数据的求解后, 去除标定结果中的异常数据并取均值, 得到的结果即为单次延时标定的最终结果。

## 2.2 时间偏差标定装置及标定流程

本文设计的基于单摆结构的时间标定装置如图 3 所示。为避免处理负刻度, 刻度盘以  $45^\circ$  为中心并覆盖  $0^\circ \sim 90^\circ$  刻度范围。将以现场可编程门阵

列(FPGA)为核心并集成 CMOS 图像传感器(CIS)和两个惯性测量单元(IMU)的视觉惯性传感器系统固定在摆锤上。

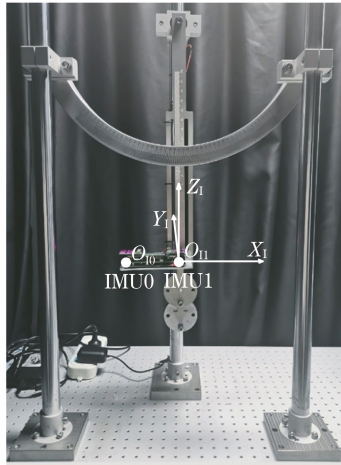


图 3 基于单摆的 CIS 和 IMU 的时间标定装置  
Fig. 3 Time calibration device of CIS and IMU based on pendulum

1) 原始数据获取。将摆锤从最大摆幅静止释放,在其衰减至接近静止的摆动过程中,CIS 捕获刻度盘图像-时间戳信息,IMU 捕获角速度-中断时间信息。使用 25 mm 等效焦距的镜头,同时增加环形补光灯,拍摄到的刻度盘图如图 4 所示。

2) 刻度图像序列向角位移的转换。采用模板匹配的方法计算如图 4 所示的相邻帧图像以 pixel 为单位的水平平移量  $\Delta u$  和垂直平移量  $\Delta v$ ,其中水平平移量  $\Delta u$  和角位移变化量成正比,垂直平移量  $\Delta v$  近似为零。基于单摆的初始角位移将帧间角位移累加求和,即可获得所有刻度图像序列与时间戳对应的角位移。将单摆偏角从约  $17^\circ$  的初始状态衰减至约  $2^\circ$  的状态作为一次图像数据和惯性数据的采集过程。摆动的前几个周期的垂直平移量  $\Delta v$  较大,因此选择以  $15^\circ$  为初始偏角计算刻度图像序列对应的刻度值。基于图像曝光中间时刻得到的重心 C 的角位移数据如图 5 所示。

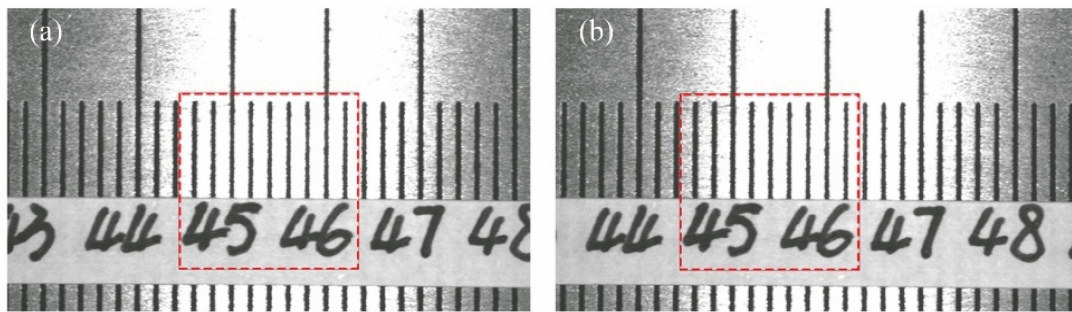


图 4 CIS 捕获的刻度盘图。(a)前一帧;(b)后一帧  
Fig. 4 Dial scale images captured by CIS. (a) Former frame; (b) later frame

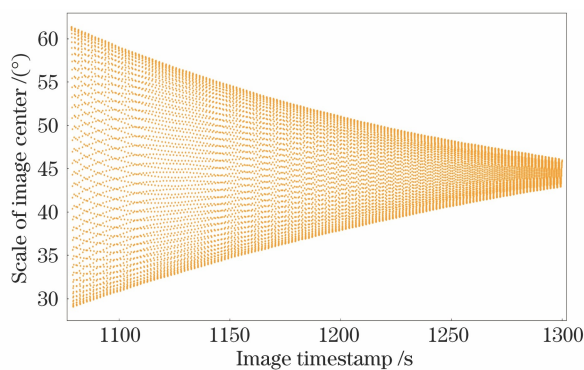


图 5 图像序列中心点对应的刻度值  
Fig. 5 Scale value corresponding to center point of image sequence

3) 角位移函数和角速度函数拟合。当单摆摆幅大于  $5^\circ$  时,摆动周期不能再近似为常数,因此基于(10)式对 CIS 测量的角位移数据和 IMU 测量的

角速度数据进行单周期拟合。选取单摆摆幅从  $15^\circ$  减小至  $12^\circ$  过程中的刻度数据和角速度数据进行拟合,并取得较好的拟合结果,如图 6 所示。进一步的拟合结果表明,利用单摆的摆动幅度从  $15^\circ$  减小至  $2^\circ$  范围内的传感器数据均获得较高的拟合精度。

4) 极值点计算与匹配。基于角位移和角速度的拟合曲线,分别求取拟合曲线的极值点并建立极值点的匹配关系。基于匹配的极值点和(11)式求解摆幅从  $15^\circ$  减小至  $2^\circ$  范围内的 IMU 输出时间偏差。

5) 异常数据处理并求均值。利用在单个摆动周期内采集到的传感器数据获得的时间偏差标定结果具有一定的随机性,剔除标定结果中的异常值是提高标定精度的必要过程。最后,通过对所有单周期标定结果取均值即可得到单次单摆标定实验的最终标定结果。

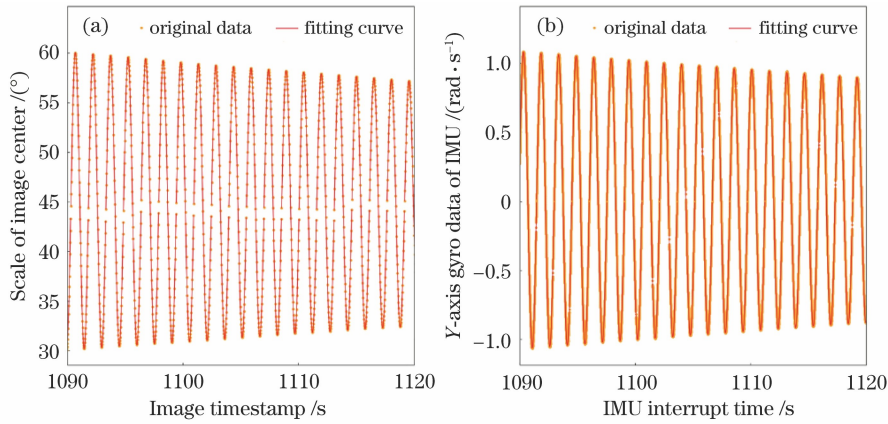


图 6 摆幅为 12°~15°时的传感器数据及拟合曲线。(a) CIS; (b) IMU

Fig. 6 Sensor data and fitting curves when swing amplitude is 12°-15°. (a) CIS; (b) IMU

### 3 分析与讨论

本节基于 CIS 和 IMU 的时间标定原理,通过实验对比传感器参数对时间偏差的影响。本文实验均设置 CIS 帧率为 50 frame/s、IMU 采样率为 1 kHz 不变,在此基础上,调整 IMU 的数据输出速率、滤波器延时、CIS 的曝光时间及时间戳模式 4 个变量开展对比实验,并基于实验结果分析各变量对标定结果的影响。CIS 时间戳模式对应时间戳选取的时间点,本文实验中的三种时间戳模式分别与 CIS 的曝光起始时刻、曝光中间时刻和曝光结束时刻对齐。

#### 3.1 IMU 的不同数据输出速率和滤波器延时对标定结果的影响

本实验固定 CIS 的曝光时间为 1 ms,并将其时间戳与曝光中间时刻对齐。首先,调整 IMU 低通滤波器的延时为 2.9 ms,并设置数据输出速率为 1000 Hz,则单个摆动周期的 IMU 中断输出延时

表 1 滤波器延时为 2.9 ms,IMU 温度为(46±1) °C,数据输出速率为 1000,500,250,200 Hz 时的 IMU 延时标定结果

Table 1 IMU delay calibration results for data output rates 1000, 500, 250, and 200 Hz when filter delay is 2.9 ms and IMU temperature is (46±1) °C

Data output rate of IMU /Hz	15°-10°		10°-5°		5°-2°	
	Delay /ms	Variance /10 <sup>-3</sup>	Delay /ms	Variance /10 <sup>-3</sup>	Delay /ms	Variance /10 <sup>-2</sup>
1000	3.186	3.33	3.078	8.99	2.822	6.27
500	4.570	3.94	4.490	15.20	4.255	7.49
250	7.411	4.46	7.324	11.20	7.001	6.64
200	8.901	2.39	8.754	14.00	8.416	4.40

调整 IMU 的低通滤波器在 1 kHz 采样率下的延时为 3.9 ms,并设置数据输出速率为 1000 Hz,则单个摆动周期的 IMU 延时标定结果随摆幅减小的变化如图 8 所示。

(IMU 延时) 标定结果随摆幅减小的变化如图 7 所示。

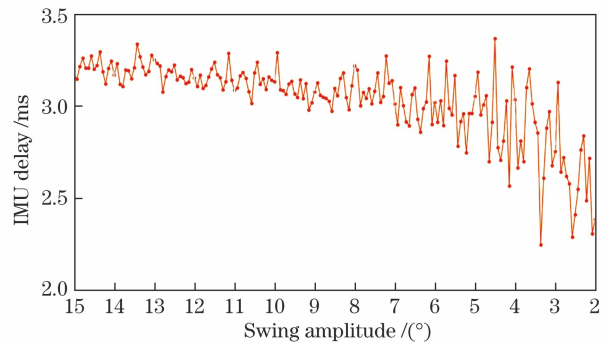


图 7 滤波器延时为 2.9 ms,IMU 温度为(46±1) °C 时的 IMU 延时标定结果

Fig. 7 IMU delay calibration results when filter delay is 2.9 ms and IMU temperature is (46±1) °C

保持 IMU 的滤波器延时设置不变,当 IMU 的数据输出速率为 1000,500,250,200 Hz 时,按摆幅区间求得 IMU 延时的均值和方差如表 1 所示。

保持 IMU 的滤波器延时设置不变,调整 IMU 的数据输出速率为 1000,500,250,200 Hz 时,按摆幅区间求得 IMU 延时的均值和方差如表 2 所示。

表 2 滤波器延时为 3.9 ms,IMU 温度为(46±1) °C,数据输出速率为 1000,500,250,200 Hz 时的 IMU 延时标定结果

Table 2 IMU delay calibration results for data rates 1000, 500, 250, and 200 Hz when filter delay is 3.9 ms and IMU temperature is (46±1) °C

Data output rate of IMU /Hz	15°-10°		10°-5°		5°-2°	
	Delay /ms	Variance /10 <sup>-3</sup>	Delay /ms	Variance /10 <sup>-3</sup>	Delay /ms	Variance /10 <sup>-2</sup>
1000	4.153	3.42	4.064	8.93	3.788	7.69
500	5.580	2.99	5.481	12.60	5.225	6.31
250	8.427	3.78	8.303	13.30	7.960	8.69
200	9.852	2.85	9.765	8.10	9.441	4.11

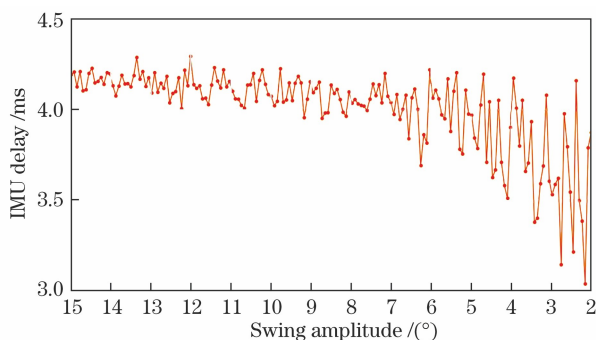


图 8 滤波器延时为 3.9 ms,IMU 温度为(46±1) °C,数据输出速率为 1000 Hz 时的 IMU 延时标定结果

Fig. 8 IMU delay calibration results when filter delay is 3.9 ms, IMU temperature is (46±1) °C, and data output rate is 1000 Hz

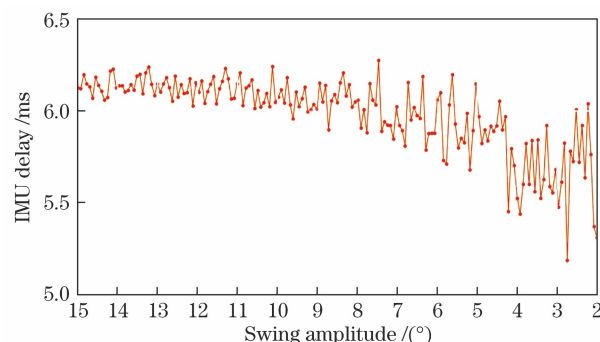


图 9 滤波器延时为 5.9 ms,IMU 温度为(46±1) °C,数据输出速率为 1000 Hz 时的 IMU 延时标定结果

Fig. 9 IMU delay calibration results when filter delay is 5.9 ms, IMU temperature is (46±1) °C, and data output rate is 1000 Hz

调整 IMU 的低通滤波器在 1 kHz 采样率下的延时为 5.9 ms,并设置数据输出速率为 1000 Hz,则单个摆动周期的 IMU 延时标定结果随摆幅减小的变化如图 9 所示。

保持 IMU 的滤波器延时设置不变,调整 IMU 的数据输出速率分别为 1000,500,250,200 Hz 时,按摆幅区间求得 IMU 延时的均值和方差如表 3 所示。

表 3 滤波器延时为 5.9 ms,IMU 温度为(46±1) °C,数据输出速率为 1000,500,250,200 Hz 时的 IMU 延时标定结果

Table 3 IMU delay calibration results for data output rates 1000, 500, 250, and 200 Hz when filter delay is 5.9 ms and IMU temperature is (46±1) °C

Data output rate of IMU /Hz	15°-10°		10°-5°		5°-2°	
	Delay /ms	Variance /10 <sup>-3</sup>	Delay /ms	Variance /10 <sup>-2</sup>	Delay /ms	Variance /10 <sup>-2</sup>
1000	6.135	2.64	6.034	1.22	5.765	4.50
500	7.554	9.21	7.449	1.36	7.171	5.48
250	10.437	3.49	10.339	1.03	10.007	9.94
200	11.841	3.89	11.744	92.30	11.453	6.66

图 7~9 中,当单摆摆幅大于 8°时标定结果波动较小且均值平稳,摆幅小于 8°时波动明显增强并伴随着均值下降,摆幅小于 5°时标定结果波动继续增强,均值继续下降并低于 IMU 滤波器延时值。从表 1、表 2 和表 3 的标定结果来看,当摆幅大于 10°时标定结果的方差较小,但随着摆幅的减小,当摆幅小于 5°时标定结果的方差明显变大。因此,本文应选择摆幅较大的传感器数据进行 IMU 延时标定。

时,IMU 滤波器延时和输出数据速率变化的 12 组延时标定结果,摆幅范围[15°,9°]比[15°,8°]的延时标定结果平均增加 0.0078 ms,摆幅范围[15°,10°]比[15°,9°]的延时标定结果平均增加 0.015 ms。三个摆幅范围的延时标定结果总体保持平稳。综合多种测试情况,单摆摆幅在[15°,9°]时可兼顾单次采样点数量及数据稳定性,对应的标定结果如表 4 所示,表 4 同时记录了相同传感器配置下使用文献[20]的 Kalibr 时间标定方法的标定结果。

比较摆幅范围为[15°,8°]、[15°,9°]、[15°,10°]

表 4 摆幅为  $15^\circ\sim 9^\circ$ , IMU 温度为  $(46\pm 1)^\circ\text{C}$  时 IMU 延时标定结果及比较Table 4 IMU delay calibration results and comparison when swing amplitude is  $15^\circ\sim 9^\circ$  and IMU temperature is  $(46\pm 1)^\circ\text{C}$ 

Data output rate of IMU /Hz	Calibration method	IMU filter delay			IMU delay difference		
		D1 (2.9 ms)	D2 (3.9 ms)	D3 (5.9 ms)	D2-D1	D3-D2	D3-D1
1000	Ours	3.177	4.145	6.128	0.968	1.983	2.951
	Kalibr	4.960	4.967	5.970	0.007	1.003	1.010
500	Ours	4.567	5.548	7.546	0.981	1.998	2.979
	Kalibr	5.996	5.972	5.968	-0.024	-0.004	-0.028
250	Ours	7.409	8.417	10.431	1.008	2.014	3.022
	Kalibr	7.959	8.909	9.907	0.950	0.998	1.948
200	Ours	8.829	9.842	11.830	1.013	1.988	3.001
	Kalibr	9.942	9.960	10.867	0.019	0.906	0.925

从表 4 中可以看出:1)当 IMU 滤波器的延时分别为 2.9 ms、3.9 ms 和 5.9 ms 时,标定出的 IMU 总延时分别比标称值高出 0.277 ms、0.245 ms 和 0.228 ms,考虑到 IMU 的总延时应稍大于滤波器延时标称值,故认为标定结果有效;2)IMU 滤波器延时从 2.9 ms 增加至 3.9 ms 和 5.9 ms 时,IMU 滤波器延时增加值分别为 1 ms、2 ms 和 3 ms,相应地 IMU 延时标定结果平均增加 0.9925 ms、1.9958 ms 和 2.9883 ms,相对误差分别为 0.75%、0.21% 和 0.39%;3)随着 IMU 数据输出速率从 1000 Hz 降低至 200 Hz,IMU 标称的数据输出间隔从 1 ms 增加到 5 ms。IMU 数据输出间隔的增加带来 IMU 延时的正比例增加,在 IMU 的滤波器延时分别为 2.9 ms、3.9 ms 和 5.9 ms 时,直线拟合误差的均方差分别为  $6.56 \times 10^{-3}$ 、 $1.20 \times 10^{-2}$  和  $1.65 \times 10^{-2}$ ,如图 10 所示。

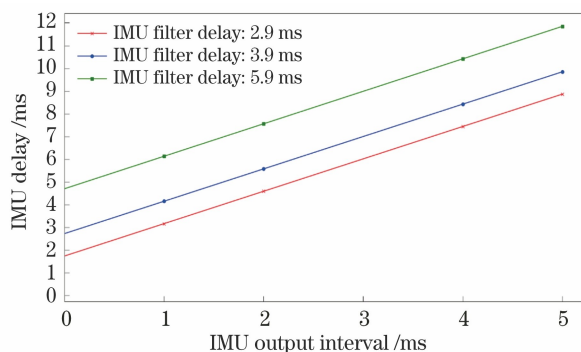


图 10 IMU 延时与数据输出间隔的变化关系

Fig. 10 Relationship between IMU delay and data output interval

本节 IMU 延时标定实验结果表明本文所提时间同步偏差标定方法的有效性。

表 4 中基于 Kalibr 方法的标定结果表明,当 IMU 滤波器延时相同时,标定结果随着 IMU 数据

输出速率的减小而增加,与本文方法所得结果的变化趋势相似;当 IMU 数据输出速率相同时,标定结果之间的差值与 IMU 滤波器延时的差值相差较大。

### 3.2 CIS 的不同时间戳模式和曝光时间对标定结果的影响

设置 IMU 的数据输出速率为 1000 Hz,低通滤波器延时为 2.9 ms。设置 CIS 的曝光时间分别为 1.0 ms、1.5 ms 和 2.0 ms 时,对应三种时间戳模式的 IMU 延时标定结果如表 5 所示,其中,error 列表表示相同曝光时间下,不同时间戳模式的标定结果与时间戳为曝光中间时刻时的标定结果的差值。表 5 同时记录了不同曝光时间下 Kalibr 方法的标定结果。

表 5 中标定结果表明:1)曝光长度为 1.0 ms、1.5 ms 和 2.0 ms 时,时间戳对齐曝光开始时刻时比对齐曝光中间时刻时的标定结果增加值,相对半曝光时间 0.5 ms、0.75 ms 和 1.0 ms 的差值分别为 0.010 ms、0.009 ms 和 0.006 ms,相对误差分别为 2.0%、1.2% 和 0.6%;而时间戳对齐曝光结束时刻时比对齐曝光中间时刻时的标定结果减小值,相对半曝光时间的差值分别为 0.015 ms、0.016 ms 和 0.010 ms,相对误差分别为 3.0%、2.1% 和 1.0%,标定结果的差值符合预期;2)时间戳与曝光开始时刻对齐时标定结果远大于 IMU 滤波器延时,时间戳与曝光结束时刻对齐时标定结果小于 IMU 滤波器延时,这两种情况均与事实不符。而时间戳设置为曝光中间时刻时的标定结果保持不变的情况与事实一致,因此,图像时间戳对齐曝光中间时刻是正确的。与本文使用曝光中间时刻的标定结果相比,表 5 中使用 Kalibr 方法在三种曝光时间下的标定结果波动较大。

表 5 不同曝光时间和时间戳模式下的 IMU 延时标定结果

Table 5 IMU delay calibration results with different exposure time and different timestamp mode ms

Method		Exposure time of 1.0 ms		Exposure time of 1.5 ms		Exposure time of 2.0 ms	
		Delay	Error	Delay	Error	Delay	Error
Our method (with different timestamp mode)	Begin mode	3.687	0.510	3.926	0.759	4.161	1.006
	Middle mode	3.177	0	3.167	0	3.155	0
	End mode	2.692	-0.485	2.433	-0.734	2.165	-0.990
Kalibr		4.960		4.963		1.688	

### 3.3 视觉与惯性融合传感器的温度相关性及其重复精度测试

为了验证本文提出的标定方法具有高可重复性,基于前两个实验的实验结论并结合摆动角度从 15°减小至 9°的传感器数据,开展 IMU 延时参数的重复性测试。设置 CIS 的曝光时间为 1 ms,并将其时间戳与曝光中间时刻对齐。调整 IMU 的低通滤波器在 1 kHz 采样率下的延时为 2.9 ms,并设置数据输出速率为 1000 Hz。

调整 IMU 的环境温度并使 IMU 与环境温度达到平衡时,多次重复记录传感器数据并进行图 3 中 IMU0 和 IMU1 与视觉传感器的延时标定,两个 IMU 的标定结果随温度的变化情况如图 11 所示。

图 11 中,IMU 工作温度从 23 °C 缓慢上升至 50 °C,IMU 延时标定结果随着温度的升高而增加并在 40 °C 附近达到最大值,随后小幅下降,但当温度变化较小时标定结果趋于稳定。表 6 和表 7 分别记录了基于本文方法和 Kalibr 方法的 IMU 延时的重复测试结果。

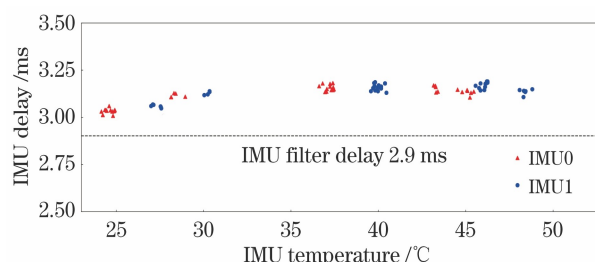


图 11 不同温度下的 IMU 延时

Fig. 11 IMU delay for different temperature

重复测试结果表明,IMU 的平衡温度接近时,多次测试的均方差小于 0.018 ms,但 IMU 的平衡温度不同时,IMU 的标定结果表现出与温度的相关性,但波动小于 0.15 ms。基于本文方法,通过多次重复实验求均值的方法可获得更加稳定可靠的标定结果。

表 6 和表 7 中,Kalibr 方法的标定结果与本文方法的标定结果除了在均值上存在一定的偏差外,前者的标准方差高出后者近两个数量级,因此,本文方法具有更高的重复精度。

表 6 IMU0 延时标定重复测试结果

Table 6 Repeat test results of IMU0 delay calibration ms

Calibration method	Our method					Kalibr
IMU0 temperature /°C	24.5±0.5	28.5±0.5	37.0±0.5	43.0±0.5	45.0±0.5	44.2±1.7
Average	3.033	3.116	3.157	3.153	3.134	3.240
Standard deviation /10 <sup>-2</sup>	1.28	1.03	1.64	1.74	1.38	93.90

表 7 IMU1 延时标定重复测试结果

Table 7 Repeat test results of IMU1 delay calibration ms

Calibration method	Our method					Kalibr
IMU1 temperature /°C	27.5±0.5	30.5±0.5	40.0±0.5	46.0±0.5	48.5±0.5	42.2±1.6
Average	3.058	3.128	3.159	3.170	3.136	4.161
Standard deviation /10 <sup>-3</sup>	7.56	10.30	16.70	17.10	0.15	1.97

文献[19]中基于高精度 IMU 取得了较好的标定结果,文献[20]在图像帧率为 20 Hz 和 IMU 输出数据率为 200 Hz 的情况下也获得了较好的标定结果。本文的对比标定实验基于普通 IMU MPU9250,

图像帧率为 50 Hz,IMU 最大输出数据率达到 1000 Hz,对比结果表明:本文标定方法对 IMU 噪声不敏感,可支持更高速率的传感器数据,标定结果具有更高的重复精度。



### 3.4 本文标定方法的实际应用

本文实验装置如图 3 所示, CIS 与 IMU 安装在同一平面。以 CIS 成像面中心为原点、行方向为  $U$  轴、列方向为  $V$  轴建立图像坐标系, 光轴与成像面垂直, 则 CIS 的  $U$  轴与 IMU 的  $X_I$  轴平行, 同时与单摆平面平行。当 CIS 光轴与刻度盘弧面垂直时, 仅使用 CIS 的  $U$  轴平移量及 IMU 的  $Y_I$  轴角速度测量值即可分别获得单摆重心的角位移和角速度函数, 此时 IMU 的  $Y_I$  轴角速度能取得最大有效测量数据和最大信噪比。

在实际应用中, 当视觉传感器和惯性传感器的设计与本文实验相同时, 使用本文所示基于单轴数据计算角速度的方法, 可获得最高的信噪比。当 CIS 的  $U$  轴或  $V$  轴与 IMU 的三轴均不同向时, 在保证 CIS 光轴与刻度盘垂直的前提下, 将图像平移检测从单轴扩展为双轴, 使用  $U$  轴平移量和  $V$  轴平移量的矢量和表示单摆重心的角位移; 同时, 将 IMU 对单摆重心角速度的检测从单轴测量扩展为三轴测量, 同样使用三轴角速度的矢量和表示单摆重心的角速度, 最终完成时间标定。

不同惯性传感器的输出电路参数, 如采样与输出帧率、数据处理延时等不影响本文标定方法的有效性。当惯性传感器具有外部触发功能, 可将外部触发信号代替中断时间作为时间参考, 此时标定目标参数为惯性传感器的触发提前时间。与此对应, 视觉传感器均通过外部触发实现同步, 图像数据采集的关键是基于统一的时钟计时捕获图像触发信号时间或图像输出信号时间作为图像时间参考, 而后结合图像传感器的时序参数和曝光时间参数获得图像曝光中间时刻对应的的时间戳。图像时间参考的选择取决于图像传感器的曝光对齐方式。惯性传感器的不同输出电路参数可能对应着不同的输出延时参数, 当惯性传感器的输出电路参数不同时, 应当重新标定 IMU 输出延时, 以保证图像传感器和惯性传感器的数据同步。

## 4 结 论

为了准确获取视觉惯性传感器以采集时刻对齐的时间戳, 提出了基于单摆结构的时间标定方法。该方法利用平面单摆运动中的角位移和角速度的相位差关系, 建立视觉数据时间戳和惯性数据时间戳的对应关系, 并最终标定惯性传感器的输出延时。

设计了以惯性传感器的数据输出速率、滤波器延时、视觉传感器的时间戳模式和曝光时间为 4 个

变量的对比实验, 验证了惯性传感器延时标定装置及方法的有效性。实验结果表明: 1) IMU 延时标定结果与 IMU 滤波器延时的绝对值和相对值的对比结果一致, 与不同时间戳模式和曝光时间变化时的相对值对比结果一致; 2) 视觉传感器以曝光中间时刻为时间戳是正确的; 3) 惯性传感器的输出延时与温度变化具有相关性。在  $25\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$  范围内, 单体视觉惯性传感器的工作温度变化较小 ( $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ) 时, IMU 延时重复标定结果的均方差优于  $0.018\text{ ms}$ ; 当 IMU 温度变化较大时, IMU 延时标定结果随温度出现小于  $0.15\text{ ms}$  的变化, 因此, 应避免 IMU 在工作过程中出现较大的温度波动。与 Kalibr 方法的对比实验证明, 本文方法使用普通 IMU 并在更高传感器数据率的条件下取得了更高的重复精度。

通过多次实验表明了标定结果数据的一致性, 并可利用重复实验提高数据的稳定性和可靠性, 本文方法为视觉惯性传感器的时间偏差提供了一种可量化的标定方法。

## 参 考 文 献

- [1] Shi J H, Meng Q H, Dai X Y. Loop closure detection of visual SLAM based on improved LBD and data-dependent measure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0615001.  
史佳豪, 孟庆浩, 戴旭阳. 基于改进 LBD 和数据依赖度量的视觉 SLAM 回环检测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(6): 0615001.
- [2] Sun Y L, Wu Q X. An improved simultaneous localization and mapping system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(16): 161013.  
孙云雷, 吴清潇. 一种改进的即时定位与地图构建系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(16): 161013.
- [3] Xu G F, Zeng J C, Liu X X. Visual odometer based on optical flow method and feature matching [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 201501.  
许广富, 曾继超, 刘锡祥. 融合光流法和特征匹配的视觉里程计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 201501.
- [4] Cadena C, Carlone L, Carrillo H, et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: toward the robust-perception age [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(6): 1309-1332.
- [5] Corke P, Lobo J, Dias J. An introduction to inertial and visual sensing [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2007, 26(6): 519-535.
- [6] Liu R X, Shen J, Chen C, et al. SLAM for robotic

- navigation by fusing RGB-D and inertial data in recurrent and convolutional neural networks [C] // 2019 IEEE 5th International Conference on Mechatronics System and Robots (IC msR), May 3-5, 2019, Singapore. New York: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [7] 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.
- [8] Zheng F, Liu Y H. SE(2)-constrained visual inertial fusion for ground vehicles [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(23): 9699-9707.
- [9] Xiao J H, Xiong D, Yu Q H, et al. A real-time sliding-window-based visual-inertial odometry for MAVs [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(6): 4049-4058.
- [10] Müller M G, Steidle F, Schuster M J, et al. Robust visual-inertial state estimation with multiple odometries and efficient mapping on an MAV with ultra-wide FOV stereo vision [C] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 1-5, 2018, Madrid, Spain. New York: IEEE Press, 2018: 3701-3708.
- [11] Chen C, Zhu H, Li M G, et al. A review of visual-inertial simultaneous localization and mapping from filtering-based and optimization-based perspectives [J]. *Robotics*, 2018, 7(3): 45.
- [12] Alves J, Lobo J, Dias J. Camera-inertial sensor modelling and alignment for visual navigation [J]. *Machine Intelligence and Robotic Control*, 2003, 5(3): 103-112.
- [13] Lobo J, Dias J. Relative pose calibration between visual and inertial sensors [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2007, 26(6): 561-575.
- [14] Harrison A, Newman P. TICSynC: knowing when things happened [C] // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 9-13, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011: 356-363.
- [15] Mair E, Fleps M, Suppa M, et al. Spatio-temporal initialization for IMU to camera registration [C] // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December 7-11, 2011, Karon Beach, Thailand. New York: IEEE Press, 2011: 557-564.
- [16] Kelly J, Sukhatme G S. A general framework for temporal calibration of multiple proprioceptive and exteroceptive sensors [M] // Khatib O, Kumar V, Sukhatme G. *Experimental robotics. Springer tracts in advanced robotics*. Heidelberg: Springer, 2014, 79: 195-209.
- [17] English A, Ross P, Ball D, et al. TriggerSync: a time synchronisation tool [C] // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 26-30, 2015, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 6220-6226.
- [18] Furgale P, Barfoot T D, Sibley G. Continuous-time batch estimation using temporal basis functions [C] // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 14-18, 2012, Saint Paul, MN, USA. New York: IEEE Press, 2012: 2088-2095.
- [19] 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.
- [20] Furgale P, Sommer H, Maye J, et al. Camera IMU calibration [EB/OL]. (2018-10-23) [2021-06-10]. <http://github.com/ethz-asl/kalibr/wiki/camera-imu-calibration>.
- [21] Nikolic J, Rehder J, Burri M, et al. A synchronized visual-inertial sensor system with FPGA pre-processing for accurate real-time SLAM [C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31-June 7, 2014, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2014: 431-437.
- [22] Fu F J, Wu L, Guo Y B, et al. Data synchronization method and device of image sensor and inertial sensor: CN109922260A [P]. 2019-06-21. 付凤杰, 吴丽, 郭远博, 等. 图像传感器和惯性传感器的数据同步方法和同步装置: CN109922260A [P]. 2019-06-21.