

本文引用格式: 卢进,吴昌隆,柳建鑫.基于 ICM20948 多传感器系统的 FPGA 数据同步采集方法[J].自动化与信息工程,2023,44(4):28-32.

LU Jin, WU Changlong, LIU Jianxin. FPGA data synchronization acquisition method based on ICM20948 multi-sensor system[J]. Automation & Information Engineering, 2023,44(4):28-32.

## 基于 ICM20948 多传感器系统的 FPGA 数据同步采集方法\*

卢进 吴昌隆 柳建鑫

(广东人工智能与先进计算研究院, 广东 广州, 510000)

**摘要:** 针对多个 ICM20948 九轴传感器在采样率上存在微小差异, 且无法从芯片端输入同步参考时钟进行多片同步的问题, 提出一种基于 ICM20948 多传感器系统的 FPGA 数据同步采集方法。利用划分置信区间的方法实现多个 ICM20948 九轴传感器数据的同步采集, 确保数据同步采集精度为毫秒级别。实验结果表明, 多个 ICM20948 九轴传感器的加速度计和陀螺仪的数据同步采集精度约为 10 ms, 磁力计的数据同步采集精度约为 100 ms, 验证了该方法的有效性。

**关键词:** ICM20948 九轴传感器; 数据同步采集; 多传感器系统; 现场可编程门阵列; 置信区间

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2023)04-0006-05

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2023.04.006

## FPGA Data Synchronization Acquisition Method Based on ICM20948 Multi-sensor System

LU Jin WU Changlong LIU Jianxin

(Guangdong Institute of Artificial Intelligence and Advanced Computing, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** A FPGA data synchronization acquisition method based on the ICM20948 multi-sensor system is proposed to address the issue of small differences in sampling rates among multiple ICM20948 nine axis sensors and the inability to input synchronous reference clocks from the chip for multi-chip synchronization. The method of dividing confidence intervals is used to achieve synchronous collection of data from multiple ICM20948 nine axis sensors, ensuring that the accuracy of data synchronous collection is at the millisecond level. The experimental results show that the data synchronization acquisition accuracy of accelerometers and gyroscopes with multiple ICM20948 nine axis sensors is about 10 ms, and the data synchronization acquisition accuracy of magnetometers is about 100 ms, verifying the effectiveness of this method.

**Keywords:** ICM20948 nine axis sensor; synchronous data collection; multi-sensor system; field programmable gate array; confidence interval

### 0 引言

随着虚拟现实技术的快速发展, 惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 在智能设备的目标定位<sup>[1-3]</sup>、目标追踪<sup>[4-6]</sup>等方面的应用越来越广。其中, ICM20948 九轴传感器 (包含三轴加速度计、三轴陀螺仪、三轴磁力计) 应用较为广泛。文献[7]基于 IMU 研究了多传感信息融合的机械臂末端位姿测量技术,

将姿态传感器与视觉传感器进行融合测量, 利用各个传感器的互补优势, 先通过测量关节角并利用 D-H 模型得到末端位姿, 再通过固定在末端的 IMU 得到末端姿态信息, 提升了测量精度。文献[8]将单个 ICM20948 九轴传感器与蓝牙芯片结合, 设计人体姿态检测器, 实现角度解算与过偏提示、计步等功能。文献[9]研制了一款基于 ICM20948 九轴传感器的地磁数据采集设备, 采集室内地磁数据来构建室内地磁导航图, 进行

移动机器人的全局定位。文献[10]基于 ICM20948 九轴传感器设计了多模态精准康复系统,有效避免了个体生理性差异导致康复治疗困难的情况。上述方法普遍采用单个 ICM20948 九轴传感器实现了数据采集的功能,但使用单个 ICM20948 九轴传感器的系统识别精度有限,在对大型、复杂系统进行目标识别的场合存在瓶颈。

文献[11]采用多个 ICM20948 九轴传感器组成传感器阵列,设计了数据采集、分析、标定算法,通过并行数据总线实现多个传感器的同步数据获取,并对多个传感器进行多数据融合处理,其精度相较于单个惯性传感器提升至少 5.7 倍,实现位置和姿态数据的准确采集。但文献中没有考虑不同的 ICM20948 九轴

传感器存在的随机差异性,且没有给出并行采集后的同步精度数据,对后续数据融合处理误差有一定的影响。

本文针对多个 ICM20948 九轴传感器在同一采样率下出现的周期差异性,且无法从芯片端输入同步参考时钟进行多片同步的问题,本文提出一种基于 ICM20948 多传感器系统的 FPGA 数据同步采集方法。利用划分置信区间的方法实现数据同步采集,避免传感器数据没有被读完就更新的情况。

## 1 系统框架

基于 ICM20948 多传感器系统的 FPGA 数据同步采集方法框架如图 1 所示。

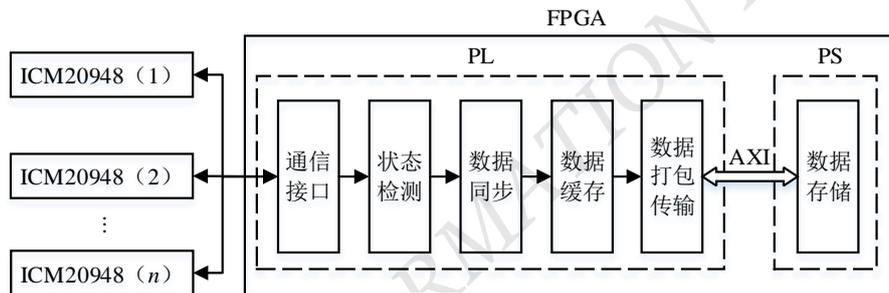


图 1 基于 ICM20948 多传感器系统的 FPGA 数据同步采集方法框架

现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 选用 XC7Z020CLG400-2 芯片,其 PL 端通过 SPI 通信接口与  $n$  ( $n$  为大于 3 的整数) 个 ICM20948 九轴传感器进行数据通信,检测每个 ICM20948 九轴传感器的状态,并经过数据同步、数据缓存、数据打包后,通过 AXI 接口传输至 PS 端存储。

## 2 数据同步采集

### 2.1 数据同步采集原理

首先,根据 ICM20948 九轴传感器的采样特点选择采样周期,以保证  $n$  个 ICM20948 九轴传感器的数据在同一个采样周期内被读取;然后,将采样周期划分为 3 个置信区间 ( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ),对 ICM20948 九轴传感器进行数据同步;最后,通过判断  $n$  个 ICM20948 九轴传感器在不同置信区间内的数据更新状态来采

集数据,保证每个采样周期采集的 ICM20948 九轴传感器数据同步且已更新完成。

$X$ 、 $Y$ 、 $Z$  置信区间数据就绪 (data ready, DRDY) 的时序关系图如图 2 所示。其中,DRDY 为 ICM20948 九轴传感器的数据更新状态指示信号。

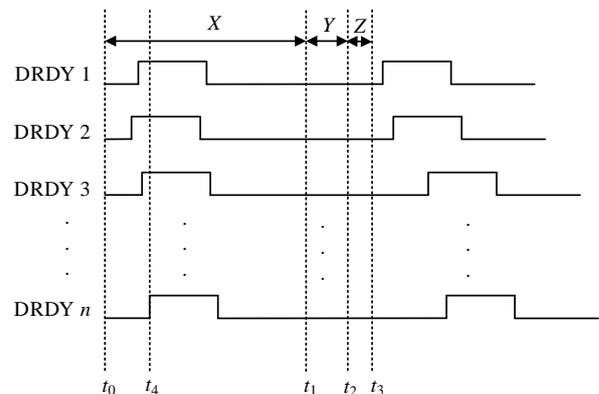


图 2  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  置信区间 DRDY 的时序关系图

图 2 中： $t_0-t_3$  为  $n$  个 ICM20948 九轴传感器数据的采集周期； $t_0-t_1$ 、 $t_1-t_2$ 、 $t_2-t_3$  分别对应 X、Y、Z 3 个置信区间； $t_4$  为最后一个 ICM20948 九轴传感器的数据更新状态指示信号 DRDY 的上升沿到来的时刻。

$t_0-t_1$  (X 置信区间) 对  $n$  个 ICM20948 九轴传感器的 DRDY 上升沿进行检测。若  $n$  个 ICM20948 九轴传感器的 DRDY 上升沿都在  $t_0-t_1$  内，表示在这个采样周期内， $n$  个 ICM20948 九轴传感器的数据都已更新完成，则在  $t_4$  时刻开始采集这  $n$  个 ICM20948 九轴传感器的数据。

$t_1-t_2$  (Y 置信区间) 为采集  $n$  个 ICM20948 九轴传感器数据所需的时间。当  $t_4 < t_1$  且接近  $t_1$  时刻时，在  $t_1$  时刻开始对  $n$  个 ICM20948 九轴传感器进行数据采集。

$t_2-t_3$  (Z 置信区间) 是根据 DRDY 上升沿的周期浮动设置的一个固定时间，大小由  $n$  个 ICM20948 九轴传感器采样周期差异的最大值决定。若没有 Z 置信区间，则在  $t_1-t_2$  采集  $n$  个 ICM20948 九轴传感器数据的过程中，某个 ICM20948 九轴传感器的 DRDY 出现一个上升沿，将导致该采样周期的数据没有被完整读取，进而影响 ICM20948 九轴传感器数据的解算。

## 2.2 软件设计流程

基于 ICM20948 多传感器系统的 FPGA 数据同步采集方法软件流程如图 3 所示。

基于 ICM20948 多传感器系统的 FPGA 数据同步采集方法的数据同步采集步骤主要包括：

1) 由于三轴磁力计的最大采样率只有 102 Hz，为保持采样率一致，将  $n$  个 ICM20948 九轴传感器的采样频率设置为 102 Hz (采样周期约为 9.8 ms)；

2) 将采样周期划分为 X、Y、Z 3 个置信区间，其中，Y 置信区间时长为读取寄存器数据的时间，为定值 0.027 ms，Z 置信区间时长为测试得到的经验值 0.023 ms，X 置信区间时长为采样周期 9.8 ms 减去 Y 置信区间时长 0.027 ms 和 Z 置信区间时长 0.023 ms，为 9.75 ms；

3) 根据 DRDY 的上升沿是否都出现在 X 置信区间来决定是否采集该采样周期内  $n$  个 ICM20948 九

轴传感器的数据。如果都出现在 X 置信区间内，则开始采集此采样周期内  $n$  个 ICM20948 九轴传感器的数据；如果有一个 ICM20948 九轴传感器的 DRDY 没有出现在 X 置信区间内，则这个采样周期的 ICM20948 九轴传感器数据被丢弃，数据采集结果保持上个采样周期的数值；

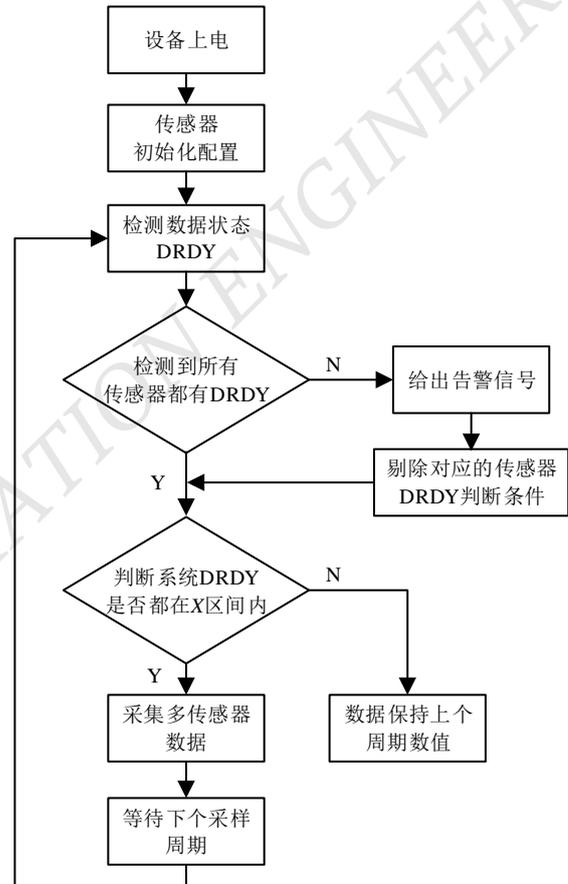


图 3 基于 ICM20948 多传感器系统的 FPGA 数据同步采集方法软件流程

4) 如果某个 ICM20948 九轴传感器连续 2 个采样周期内没有出现 DRDY 的上升沿指示信号，则输出告警信号；

5) 根据告警信号先剔除步骤 3) 中对应的异常 ICM20948 九轴传感器的 DRDY 判断条件，再根据其 余 ICM20948 九轴传感器的 DRDY 状态来采集数据，避免系统一直保持上个周期的数据而瘫痪；

6) 返回步骤 3) 继续检测 ICM20948 九轴传感

器的 DRDY 信号。

### 3 实验验证

为验证本文提出的基于 ICM20948 多传感器系统的 FPGA 数据同步采集方法的正确性，利用 4 个 ICM20948 九轴传感器组成的多传感器系统对以下 3 种情况分别进行验证：将 4 个 ICM20948 九轴传感器固定在水平桌面上，分别在绕 X 轴规律缓慢旋转、绕 Y 轴无规律快速旋转、绕 X 轴缓慢翻转 2 次。其中，SPI 接口时钟为 6 MHz，采样频率为 102 Hz，三轴加速度计、三轴陀螺仪、三轴磁力计量程分别为  $\pm 2\text{ g}$ 、 $\pm 250\text{ d/s}$ 、 $\pm 4\ 900\ \mu\text{T}$ 。

#### 3.1 三轴加速度计数据验证与分析

4 个 ICM20948 九轴传感器在绕 X 轴规律缓慢旋转时，采集的三轴加速度计 X 轴的数据如图 4 所示，放大图 4 后的 4 个 ICM20948 九轴传感器的数据比对结果如图 5 所示。

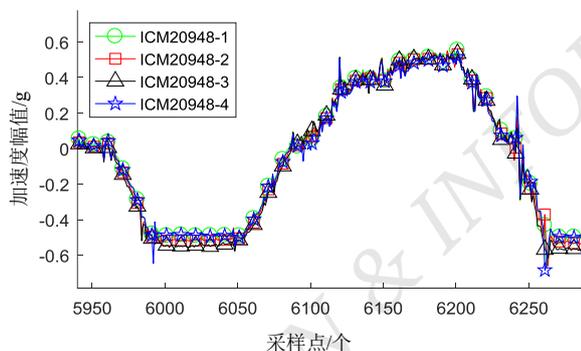


图 4 4 个 ICM20948 九轴传感器加速度 X 轴数据

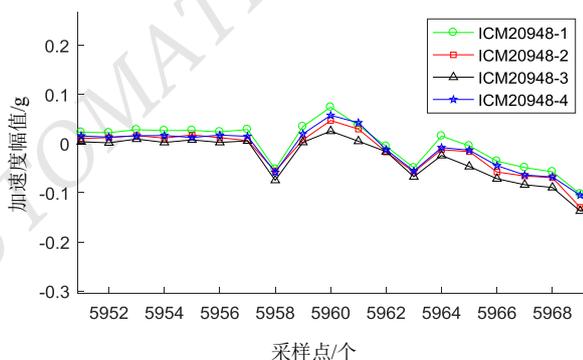


图 5 4 个 ICM20948 九轴传感器加速度 X 轴数据放大后效果

由图 4、图 5 可以看出：4 个 ICM20948 九轴传感器在采样点 5 952~5 968 范围内数据变化趋势、曲线相位关系保持一致，没有超过 1 个点，即加速度计数据采集同步精度约为 10 ms，与本文设置的每 2 个采样点间的时间间隔 9.8 ms 一致。

#### 3.2 三轴陀螺仪数据验证与分析

4 个 ICM20948 九轴传感器在绕 Y 轴无规律快速旋转时，采集的三轴陀螺仪 Y 轴的角度数据如图 6 所示，放大图 6 后的 4 个 ICM20948 九轴传感器的数据比对结果如图 7 所示。

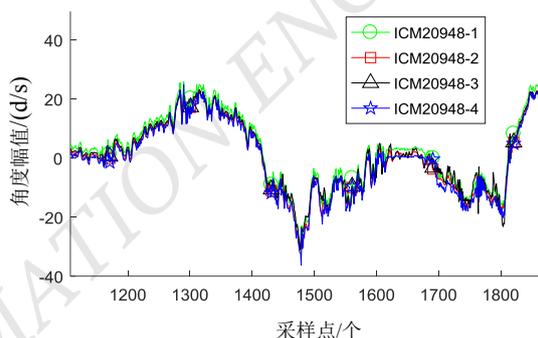


图 6 4 个 ICM20948 九轴传感器陀螺仪 Y 轴数据

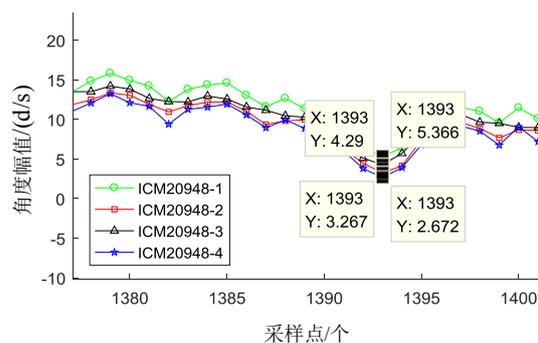


图 7 4 个 ICM20948 九轴传感器陀螺仪 Y 轴数据放大后效果

由图 7 可以看出，4 个 ICM20948 九轴传感器的数据最低点的 X 轴数据都为 1 393，且所有采样点的数据变化趋势基本一致，三轴陀螺仪数据同步采集精度保持在 10 ms 左右。

#### 3.3 三轴磁力计数据验证与分析

4 个 ICM20948 九轴传感器在绕 X 轴缓慢翻转 2 次时采集的三轴磁力计 X 轴数据如图 8 所示，放大图

8 后的 4 个 ICM20948 九轴传感器的数据比对结果如

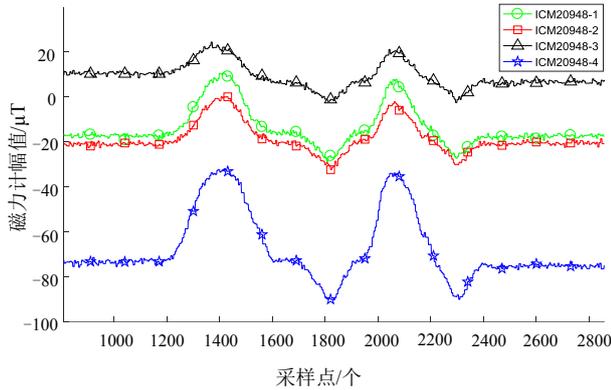


图 8 4 个 ICM20948 九轴传感器磁力计 X 轴数据

图 8 中, 三轴磁力计数据曲线不重合是由于每个 ICM20948 九轴传感器的磁力计数据基线值不同, 且 ICM20948 九轴传感器摆放位置也不同, 翻转后受到的磁强变化幅度也不同。

由图 9 可以看出, 4 个 ICM20948 九轴传感器的数据变化趋势基本一致, 4 个最低点的 X 轴数据最大值为 2 308, 最小值为 2 298, 得到磁力计的数据同步采集精度为 98 ms。

#### 4 结论

由 4 个 ICM20948 九轴传感器组成的多传感器系统同步采集的数据结果可以看出, 本文提出的划分置信区间的方法可以实时、准确地实现数据同步采集, 避免了多传感器系统中每个传感器都要提供精确的参考工作时钟的需求, 且在多传感器采样频率存在差异的情况下, 可确保数据同步采集精度为毫秒级别。

#### 参考文献

[1] 李根龙. 面向机器人装配的目标识别与位姿获取技术研究

#### 作者简介:

卢进, 男, 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 传感器融合、超导量子计算测控系统、生物电数字信号处理。

E-mail: 249510357@qq.com

吴昌隆, 男, 1995 年生, 本科, 工程师, 主要研究方向: 自动化。E-mail: changlong.wu@giaiac.cn

柳建鑫, 男, 1995 年生, 本科, 工程师, 主要研究方向: 数字信号处理。E-mail: jianxin.liu@giaiac.cn

图 9 所示。

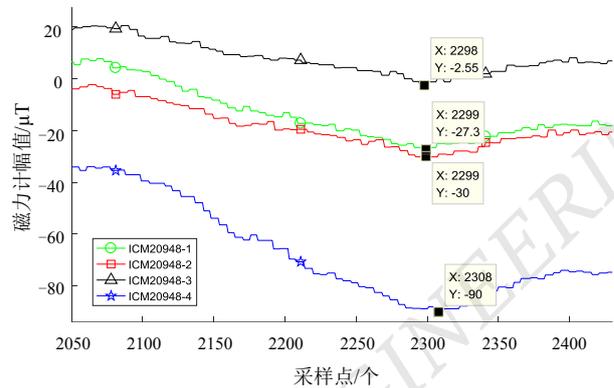


图 9 4 个 ICM20948 九轴传感器磁力计 X 轴数据放大后效果

[D].西安:西安理工大学,2021.

[2] 白宇强. 无人汽车的 IMU/5G 毫米波组合定位方法[D].北京:北京交通大学,2021.

[3] 李锦明,刘梦欣,成乃朋,等.基于 FPGA 的多路无线数据采集系统设计[J].中国测试,2019,45(12):102-105;118.

[4] 张金艺,徐德政,李若涵,等.9 轴 MEMS-IMU 实时姿态估算算法[J].上海大学学报(自然科学版),2015,21(5):547-559.

[5] 唐悦.IMU 的行人室内定位研究[D].杭州:浙江工商大学,2018.

[6] 白悦章.基于多传感器融合的目标追踪与定位估计技术研究[D].长春:吉林大学,2019.

[7] 张天麟.多传感信息融合的机械臂末端位姿测量[D].南京:南京邮电大学,2019.

[8] 陈飞.基于 nRF52832 蓝牙芯片与 ICM20948 九轴传感器的人运动姿态检测器设计[D].南京:南京理工大学,2020.

[9] 李鹏飞.基于室内地磁信息的移动机器人定位方法[D].西安:电子科技大学,2019.

[10] 陈海鲁.骨折康复的多模态诊疗系统研究[D].杭州:浙江大学,2023.

[11] 朱辰霄,颜陆胜,刘东滢,等.阵列式 MEMS-IMU 系统的设计与实现[J].电子制作,2022,30(11):11-14.