

## 1 理解光流与 IMU 数据流

为了有效测量和补偿延迟，深入理解光流和 IMU 数据在 ArduPilot 生态系统中如何生成、处理和记录至关重要。

### 1.1 光流传感器：原理、输出及固有延迟

光流传感器通过分析视觉场景中亮度模式的表现运动来确定运动。对于无人机而言，一个向下指向的摄像头捕捉地面图像，机载处理器计算连续帧之间的相对位移。这通常会产生 X/Y 轴的平移变化和 Z 轴的旋转。为了精确估计速度，光流数据必须与测距仪的测量结果结合，以确定到观测表面的距离。

**数据输出：**光流传感器通常输出集成后的 X 和 Y 方向光流值（例如 ArduPilot 日志中的 OF.flowX、OF.flowY），代表表现运动。有些传感器还会提供其板载 IMU 的集成陀螺仪数据（OF.bodyX、OF.bodyY）。

**固有处理延迟：**光流计算，特别是像 Lucas-Kanade 这样的方法，涉及图像采集、处理和数据传输。这个流程会引入延迟。内部处理速率（例如 PX4Flow 的 400 赫兹）通常高于数据发布到飞控的速率（例如 PX4Flow 通过 USB 传输时的 10 赫兹），这表明存在内部缓冲和通信延迟。

光流传感器延迟具有处理和通信的双重性质。例如，强调了光流传感器的内部处理速率（如 PX4Flow 的 400 赫兹），同时也提到了输出速率（如通过 USB 传输的 10 赫兹）。这揭示了两种不同的延迟来源：一是传感器内部处理器从原始图像数据计算光流所需的时间（固有处理延迟），二是计算出的数据传输到飞控所需的时间（通信延迟）。进一步阐明，ArduPilot 的 EKF 可能不会缓冲传感器值，这意味着如果 FLOW\_DELAY 参数与实际的端到端延迟（处理+通信）不匹配，数据可能会丢失或被错误使用，从而导致严重的性能问题。这表明测量的延迟并非简单的固定值，而是这些因素的综合，其数值可能因传感器硬件、固件和通信协议的不同而异。EK3\_FLOW\_DELAY 参数试图对此进行补偿，但其有效性取决于确切了解光流输出相对于物理事件的“时间”代表什么。这也意味着延迟不仅是通信总线的功能，还包括内部计算流程。

### 1.2 惯性测量单元（IMU）：运动传感的核心

IMU 是无人机中的基本组件，提供关于飞行器运动的关键数据。它通常集成了三轴加速度计（测量线加速度）和三轴陀螺仪（测量角速度或旋转速率）。

**数据输出：**IMU 沿其 X、Y 和 Z 轴输出原始加速度值（米/秒<sup>2</sup>）和角速率（度/秒或弧度/秒）。在 ArduPilot 日志中，这些数据通常以 IMU.GyrX/Y/Z 和 IMU.AccX/Y/Z 的形式出现。

**特性：**尽管 IMU 提供高频数据（飞控通常为 200 赫兹，但对于特定 IMU 可记录到 1 千赫兹或更高），但它们容易出现“随时间漂移”和“噪声”。与其他传感器相比，IMU 系统通常表现出“极低的延迟”，使其成为实时运动的主要参考。

在融合系统中，IMU 常被视为时间上的“真值”，尽管其本身存在缺陷。表明 IMU 与其他传感器相比具有“极低的延迟”。显示 ArduPilot 能够以非常高的速率（例如对于 Invensense 传感器，可达 1 千赫兹或传感器最高速率）记录 IMU 数据。这暗示 IMU 数据，特别是角速率，通常是飞行器运动最即时、最高频率的表示。因此，在测量光流与 IMU 之间的延迟时，IMU 被隐含地视为飞行器在该时刻运动的时间参考点或“真值”。然而，也强调了 IMU 的局限性，如“漂移”和“噪声”。这造成了一个微妙但重要的矛盾：

尽管 IMU 被用作时间参考，但其数据并非完美，需要进行滤波（如 EKF），并且如果不妥善处理（例如通过使用滤波后的 IMU 数据或理解噪声特性），可能会影响延迟测量的准确性。

## 2 测量传感器数据延迟的方法

### 数据采集的实验设置：

- 1、 在任何地面测试前务必拆除螺旋桨。
- 2、 日志配置：
  - 在 ArduPilot 参数中将 LOG\_DISARMED 设置为 1。这确保日志在飞控上电时就开始记录，捕获预解锁数据。
  - 启用高频 IMU 日志：设置 INS\_LOG\_BAT\_OPT=4（用于预滤波和后滤波的 1KHz 采样）和 INS\_LOG\_BAT\_MASK=1（用于收集第一个 IMU 的数据，通常是最高质量的）。确保在使用批处理采样时，LOG\_BITMASK 的 IMU\_RAW 位未被选中。
  - 确保旋翼机 SCHED\_LOOP\_RATE 设置为 300 赫兹或更高。
- 3、 为了生成光流和 IMU 清晰且相关的信号，执行受控运动：
  - 将飞行器保持水平，远离身体，与眼睛平齐。
  - 沿翻滚轴平稳并重复地旋转飞行器（例如，在约一秒钟内从-15 度到+15 度），重复 5-10 次。
  - 对俯仰轴重复相同的运动。关键是保持光流传感器中心相对于背景静止，同时围绕其旋转飞行器，以隔离运动的旋转分量。
- 4、 光流环境参考：在“有纹理的表面”上进行实验，并确保“良好的照明（自然光或强白炽灯）”。避免光面或具有重复图案的区域（例如，棋盘格、条纹），这可能会干扰光流算法。确保光流传感器镜头在典型操作高度上正确聚焦于高对比度物体。

### 使用 Mission Planner 进行日志分析：

- 1、 下载日志：通过 USB 连接飞控，打开 Mission Planner 的“飞行数据”屏幕，选择“DataFlash 日志”选项卡，然后点击“通过 Mavlink 下载 DataFlash 日志。或者，如果适用，直接取出 SD 卡并访问。
- 2、 初步目视检查：
  - 在 Mission Planner 的“查看日志”功能中打开下载的.bin 日志文件。
  - 绘制 OF.flowX 和 OF.bodyX（或 OF.flowY 和 OF.bodyY），以及 IMU.GyrX（或 IMU.GyrY）。
  - OF.flowX/Y 代表光流测量的速度分量（或集成位移），而 IMU.GyrX/Y 代表 IMU 的角速率。OF.bodyX/Y 是光流传感器内部的陀螺仪数据（如果可用）。
  - 目视检查图表的相关性。在摇摆运动期间，光流和 IMU 数据中应出现相似的模式。寻找光流信号相对于 IMU 信号的峰谷之间是否存在一致的时间偏移。这提供了延迟的粗略估计。
  - 如果 OF.flowX 始终大于或小于 OF.bodyX，这表明存在比例因子问题，可以使用 FLOW\_FXSCALER 进行校正。这与时间延迟不同，但对于融合同样重要。
  - 同步不良或数据质量差的症状包括 flowX 和 flowY 与 IMU.GyrX/Y 或 BODY.X/Y 不相关。

目视检查是初步评估的有效方法，但其精度有限。绘制 OF.flowX/Y 与 IMU.GyrX/Y 的图表可以快速目视评

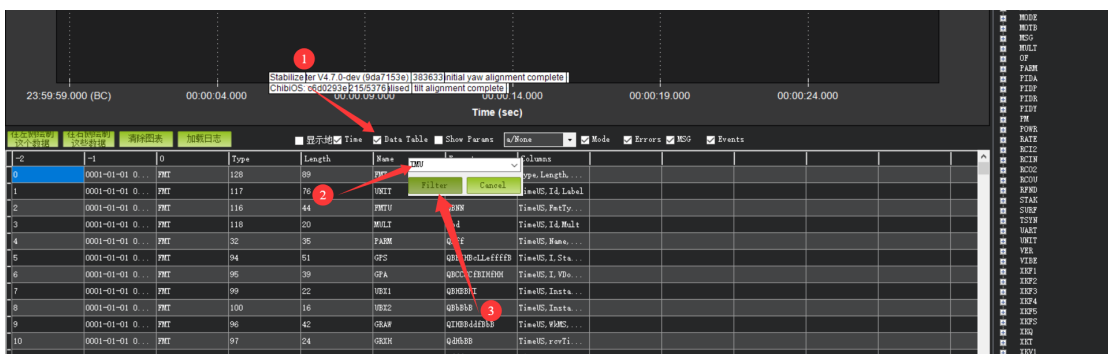
估相关性并粗略估计延迟。这是一种实用且门槛较低的调试方法。然而，人工目视检查本质上是不精确的，特别是对于小延迟（几十毫秒）或嘈杂数据而言。它能确认是否存在相关性及大致偏移，但不足以满足传感器融合中通常所需的“亚毫秒”精度。这意味着虽然目视绘图是一个很好的诊断工具，但必须辅以更严格的定量方法以进行精确校准。

#### 互相关进行精确延迟估计：

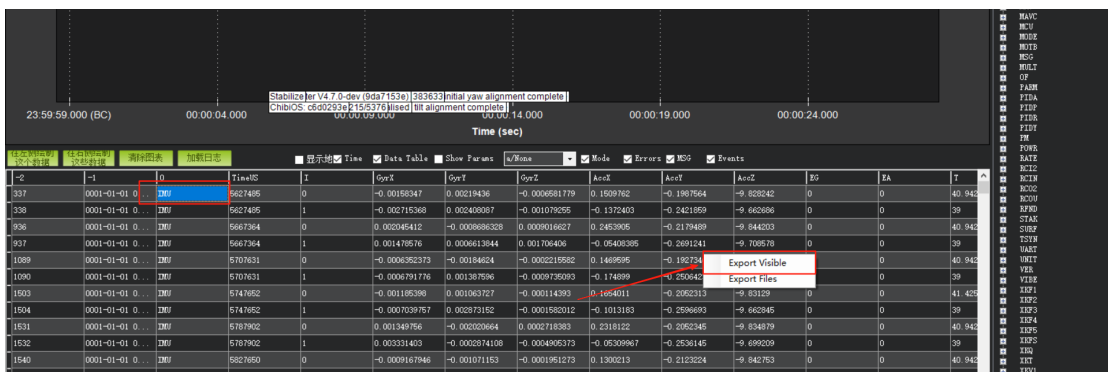
- 1、数据提取：使用 Mission Planner 地面站自带的工具将.bin 日志文件转换为.csv 格式。这便于导入到 Python 或 MATLAB 等数据分析环境中。（本例程使用 Python 进行数据分析）

#### 操作步骤：

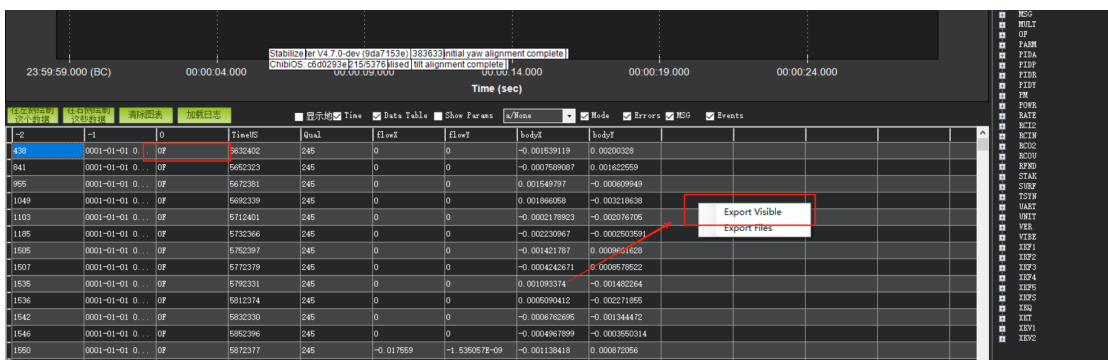
- (1) 用 MP 打开.bin 日志后，左键单击，在弹出的下拉菜单中选择“IMU”和“OF”项目，即日志中记录的参数项目。



- (2) 选择完成后，点击“Filter”执行筛选，可以看到属于“IMU”项目的数据被提取出来，此时右键单击表格中的任意位置，选择“Export Visible”可以保存成.csv 即可。



- (3) 对光流数据进行重复操作，可以看到属于“OF”项目的数据被提取出来，此时右键单击表格中的任意位置，选择“Export Visible”可以保存成.csv 即可。



## 2、文件预处理:

- (1) 使用 Excel 表格打开导出的光流和 IMU 的.csv 文件，其中数据内容应与 Mission Planner 地  
面站上的内容保持一致。

## IMU:

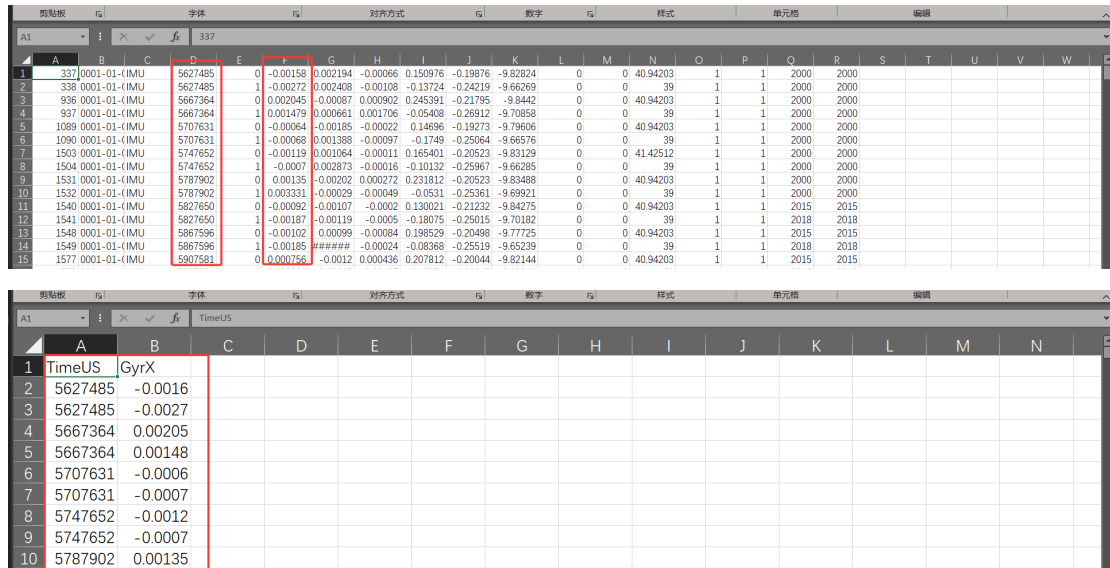
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1	337	0001-01-IMU	5627485	0	-0.00158	0.002194	-0.00066	0.150976	-0.19876	-9.82824	0	0	0	40.94203	1	1	2000	2000						
2	338	0001-01-IMU	5627485	1	-0.00272	0.002408	-0.00108	-0.13724	-0.24219	-9.66269	0	0	39	1	1	2000	2000							
3	936	0001-01-IMU	5667364	0	0.002045	-0.00087	0.000902	0.245391	-0.21795	-9.8442	0	0	0	40.94203	1	1	2000	2000						
4	937	0001-01-IMU	5667364	1	0.001479	0.000661	0.001706	-0.05408	-0.26912	-9.70858	0	0	39	1	1	2000	2000							
5	1089	0001-01-IMU	5707631	0	-0.00064	-0.00185	-0.00022	0.14696	-0.19273	-9.79606	0	0	0	40.94203	1	1	2000	2000						
6	1090	0001-01-IMU	5707631	1	-0.00068	0.001388	-0.00097	-0.1749	-0.25064	-9.66576	0	0	39	1	1	2000	2000							
7	1503	0001-01-IMU	5747652	0	-0.00119	0.001064	-0.00011	0.165401	-0.20523	-9.83129	0	0	0	41.42512	1	1	2000	2000						
8	1504	0001-01-IMU	5747652	1	-0.00007	0.002873	-0.00016	-0.10132	-0.25967	-9.66285	0	0	39	1	1	2000	2000							
9	1531	0001-01-IMU	5787902	0	0.00135	-0.00202	0.000272	0.231812	-0.20523	-9.83488	0	0	0	40.94203	1	1	2000	2000						
10	1532	0001-01-IMU	5787902	1	0.003331	-0.00029	-0.00049	-0.0531	-0.25361	-9.69921	0	0	39	1	1	2000	2000							
11	1540	0001-01-IMU	5827650	0	-0.00092	-0.00107	-0.00002	0.130021	-0.21232	-9.84275	0	0	0	40.94203	1	1	2015	2015						
12	1541	0001-01-IMU	5827650	1	-0.00187	-0.00119	-0.00005	-0.18075	-0.25015	-9.70182	0	0	39	1	1	2018	2018							
13	1548	0001-01-IMU	5867596	0	-0.00102	0.00099	-0.00084	0.188529	-0.20490	-9.77725	0	0	0	40.94203	1	1	2015	2015						
14	1549	0001-01-IMU	5867596	1	-0.00185	#####	-0.00024	-0.08368	-0.25519	-9.65239	0	0	39	1	1	2018	2018							
15	1577	0001-01-IMU	5907581	0	0.000756	-0.0012	0.000436	0.207812	-0.20044	-9.82144	0	0	0	40.94203	1	1	2015	2015						
16	1578	0001-01-IMU	5907581	1	0.000223	-0.00217	0.00137	-0.10571	-0.23917	-9.69319	0	0	39	1	1	2018	2018							
17	1585	0001-01-IMU	5947388	0	-0.00013	-0.00032	0.000151	0.144165	-0.21795	-9.812	0	0	0	40.94203	1	1	2015	2015						
18	1586	0001-01-IMU	5947388	1	0.000381	-0.00368	0.001031	-0.15465	-0.26324	-9.68502	0	0	39	1	1	2018	2018							
19	1613	0001-01-IMU	5987713	0	-0.00187	-0.00141	0.00014	0.209105	-0.20494	-9.76849	0	0	0	40.94203	1	1	2015	2015						
20	1614	0001-01-IMU	5987713	1	-0.00267	0.002978	0.001996	-0.05954	-0.23838	-9.61521	0	0	39	1	1	2018	2018							
21	1619	0001-01-IMU	6027434	0	-0.00023	-0.00298	0.000567	0.181272	-0.20217	-9.79597	0	0	0	41.42512	1	1	2015	2015						
22	1620	0001-01-IMU	6027434	1	-0.00462	-0.0011	0.000475	-0.10255	-0.22883	-9.68058	0	0	39	1	1	2018	2018							
23	1627	0001-01-IMU	6067458	0	-0.00013	-0.00153	0.000212	0.154527	-0.21028	-9.80686	0	0	0	41.42512	1	1	2015	2015						

23.59.59.000 (BC)										00:00.04.000										Time (sec)										00:00.14.000										00:00.19.000										00:00.24.000									
Stabilizer V4.7 0-dev (9da7f153e) [38363] [initial yaw alignment complete]										ChibiOS c6d0293e [155376] [aligned] [tilt alignment complete]																																																	
显示地图 Time Data Table Show Params k/Wave Mode Errors MSG Events																																																											
2	-1	0	TimeMS	I	GyrX	GyrY	GyrZ	AccX	AccY	AccZ	RG	RA	7	40.94203	1	1	2000	2000																																									
337	0001-01-01	IMU	5627485	0	-0.00158347	0.00219436	-0.000661779	0.1509762	-0.1987664	-9.828242	0	0	39	40.94203	1	1	2000	2000																																									
338	0001-01-01	IMU	5627485	1	-0.002715368	0.002408067	-0.001079285	-0.1372403	-0.2421899	-9.662686	0	0	39	40.94203	1	1	2000	2000																																									
936	0001-01-01	IMU	5667364	0	0.002045412	-0.000868638	0.0009016627	0.2453905	-0.2179489	-9.844203	0	0	39	40.94203	1	1	2000	2000																																									
937	0001-01-01	IMU	5667364	1	0.001478576	0.0006613844	0.001704046	-0.0540385	-0.2691241	-9.708578	0	0	39	40.94203	1	1	2000	2000																																									
1089	0001-01-01	IMU	5707631	0	-0.0006352373	-0.00184654	-0.0002218582	0.1469595	-0.1927346	-9.796056	0	0	39	40.94203	1	1	2000	2000																																									
1090	0001-01-01	IMU	5707631	1	-0.0006791776	0.001387596	-0.0009735093	-0.174899	-0.2506423	-9.665757	0	0	39	40.94203	1	1	2000	2000																																									
1503	0001-01-01	IMU	5747652	0	-0.001185398	0.001063727	-0.000114393	0.1654011	-0.2062313	-9.83129	0	0	41.42512	1	1	2000	2000																																										
1504	0001-01-01	IMU	5747652	1	-0.0007039757	0.002873152	-0.0001582012	-0.1013183	-0.2596693	-9.662845	0	0	39	40.94203	1	1	2000	2000																																									
1531	0001-01-01	IMU	5787902	0	0.001349756	-0.002020664	0.0002718393	0.2318122	-0.2062345	-9.834879	0	0	40.94203	1	1	2000	2000																																										
1532	0001-01-01	IMU	5787902	1	0.003331403	-0.002374108	-0.0004896373	-0.05309667	-0.2536145	-9.699329	0	0	39	40.94203	1	1	2000	2000																																									
1540	0001-01-01	IMU	5827650	0	-0.0009167946	-0.001071153	-0.0001951673	0.1300213	-0.2123024	-9.842753	0	0	40.94203	1	1	2015	2015																																										
1541	0001-01-01	IMU	5827650	1	-0.001871502	-0.001167029	-0.000493815	-0.1807474	-0.2501482	-9.701821	0	0	39	40.94203	1	1	2018	2018																																									
1548	0001-01-01	IMU	5867596	0	-0.001017955	0.000990018	-0.0008427438	0.1885285	-0.2049814	-9.777247	0	0	40.94203	1	1	2015	2015																																										
1549	0001-01-01	IMU	5867596	1	-0.001850957	-7.276613E-05	-0.000242457	-0.083676	-0.2551886	-9.652389	0	0	39	40.94203	1	1	2018	2018																																									
1577	0001-01-01	IMU	5907581	0	0.0007559152	-0.001195006	0.000435541	0.2078118	-0.2004438	-9.821437	0	0	40.94203	1	1	2015	2015																																										
1578	0001-01-01	IMU	5907581	1	0.0002226583	-0.002170225	-0.001302934	-0.1057008	-0.2391759	-9.693188	0	0	39	40.94203	1	1	2018	2018																																									

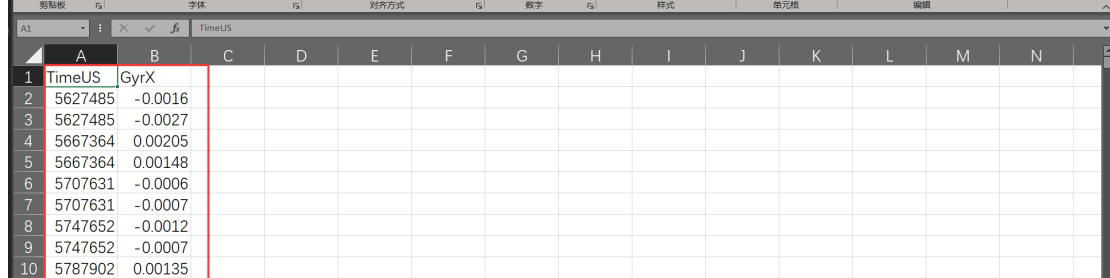
## 光流:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	438	0001-01-OF	5632402	245	0	0	-0.00153912	0.00200328											
2	841	0001-01-OF	5652323	245	0	0	-0.00075891	0.001622559											
3	955	0001-01-OF	5672381	245	0	0	0.001549797	-0.00060995											
4	1049	0001-01-OF	5692339	245	0	0	0.001866058	-0.00321864											
5	1103	0001-01-OF	5712401	245	0	0	-0.00021789	-0.00207671											
6	1185	0001-01-OF	5732366	245	0	0	-0.00223097	-0.00025036											
7	1505	0001-01-OF	5752397	245	0	0	-0.00142179	0.000966163											
8	1507	0001-01-OF	5772379	245	0	0	-0.00042427	0.000857852											
9	1535	0001-01-OF	5792331	245	0	0	0.001093374	-0.00148226											
10	1536	0001-01-OF	5812374	245	0	0	0.000509041	-0.00227186											
11	1542	0001-01-OF	5832330	245	0	0	-0.00067627	-0.00134447											
12	1546	0001-01-OF	5852396	245	0	0	-0.00049679	-0.00035503											
13	1550	0001-01-OF	5872377	245	-0.017559	-1.54E-09	-0.00113842	0.000872056											
14	1576	0001-01-OF	5892389	245	0	0	-0.00031671	0.000292924											
15	1579	0001-01-OF	5912380	245	-0.017479	-1.53E-09	0.000767012	-0.00110845											
16	1580	0001-01-OF	5932358	245	0	0	0.000702312	-0.00219392											
17	1587	0001-01-OF	5952379	245	0	0	-0.00022036	-0.00083394											
18	1589	0001-01-OF	5972338	245	-0.017512	-1.53E-09	-0.00015901	-0.00032339											
19	1617	0001-01-OF	5992411	245	-0.022475	-1.96E-09	-0.00154488	-0.00115507											
20	1618	0001-01-OF	6012350	245	-0.017541	-1.53E-09	-0.00128659	-0.00203292											
21	1621	0001-01-OF	6032407	245	0	0	-0.00014596	-0.00284731											

- (2) 新建表格将 IMU 表格中的时间戳 TimeUS 和 GyrX 复制到新表格中，并在添加 TimeUS 和 GyrX 的表头。



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	337	0001-01-(IMU)	5627485	0	-0.00158	0.002194	-0.00066	0.150976	-0.19876	-9.82824	0	0	40.94203	1	1	2000	2000						
2	338	0001-01-(IMU)	5627485	1	-0.00272	0.002408	-0.00108	-0.13724	-0.24219	-9.66269	0	0	39	1	1	2000	2000						
3	936	0001-01-(IMU)	5667364	0	0.002045	-0.00087	0.000902	0.245391	-0.21795	-9.8442	0	0	40.94203	1	1	2000	2000						
4	937	0001-01-(IMU)	5667364	1	0.001479	0.000661	0.001706	-0.05408	-0.28912	-9.70858	0	0	39	1	1	2000	2000						
5	1089	0001-01-(IMU)	5707631	0	-0.00064	-0.00185	-0.00022	0.14696	-0.19273	-9.79606	0	0	40.94203	1	1	2000	2000						
6	1090	0001-01-(IMU)	5707631	1	-0.00068	0.001388	-0.00097	-0.1749	-0.25064	-9.66576	0	0	39	1	1	2000	2000						
7	1503	0001-01-(IMU)	5747652	0	-0.00119	0.001064	-0.00011	0.165401	-0.20523	-9.83129	0	0	41.42512	1	1	2000	2000						
8	1504	0001-01-(IMU)	5747652	1	-0.0007	0.002873	-0.00016	-0.10132	-0.25967	-9.66285	0	0	39	1	1	2000	2000						
9	1531	0001-01-(IMU)	5787902	0	0.00135	-0.00202	0.000272	0.231812	-0.20523	-9.83488	0	0	40.94203	1	1	2000	2000						
10	1532	0001-01-(IMU)	5787902	1	0.003331	-0.00029	-0.00049	-0.0531	-0.25361	-9.69921	0	0	39	1	1	2000	2000						
11	1540	0001-01-(IMU)	5827650	0	-0.00092	-0.00107	-0.0002	0.130021	-0.21232	-9.84275	0	0	40.94203	1	1	2015	2015						
12	1541	0001-01-(IMU)	5827650	1	-0.00187	-0.00119	-0.0005	-0.18075	-0.25015	-9.70182	0	0	39	1	1	2018	2018						
13	1548	0001-01-(IMU)	5867596	0	-0.00102	0.00099	-0.00084	0.198529	-0.20498	-9.77725	0	0	40.94203	1	1	2015	2015						
14	1549	0001-01-(IMU)	5867596	1	-0.00185	#####	-0.00024	-0.08368	-0.25519	-9.65239	0	0	39	1	1	2018	2018						
15	1577	0001-01-(IMU)	5907581	0	0.000756	-0.00012	0.000436	0.207812	-0.20044	-9.82144	0	0	40.94203	1	1	2015	2015						

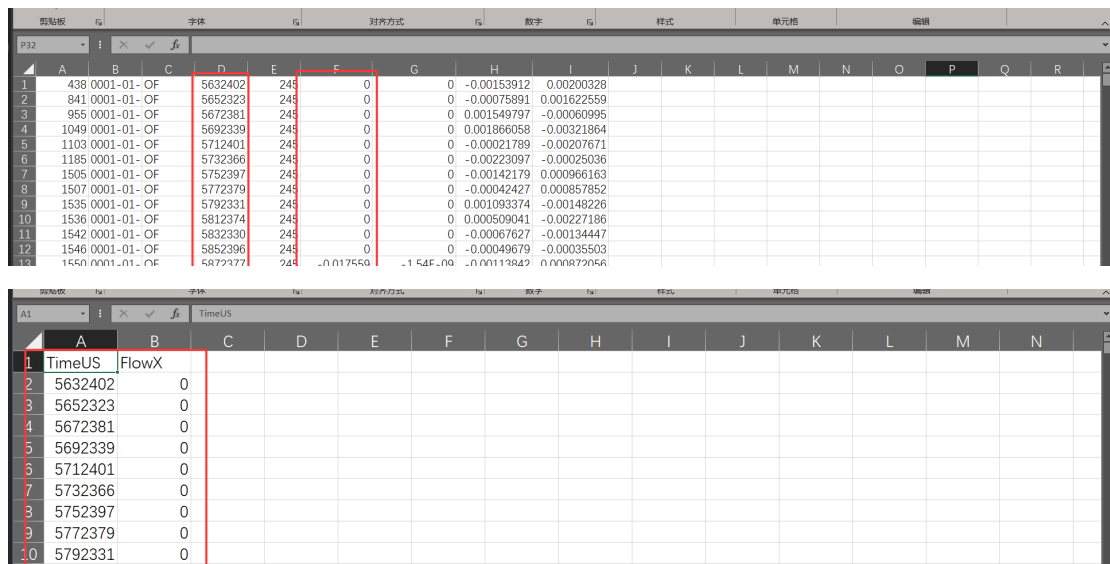
  


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	TimeUS	GyrX												
2	5627485	-0.0016												
3	5627485	-0.0027												
4	5667364	0.00205												
5	5667364	0.00148												
6	5707631	-0.0006												
7	5707631	-0.0007												
8	5747652	-0.0012												
9	5747652	-0.0007												
10	5787902	0.00135												

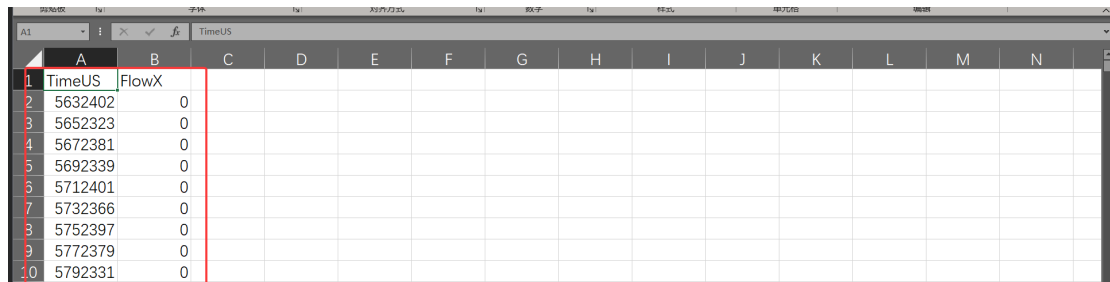
- (3) 保存为 csv 文件并取名为 imu.csv



- (4) 新建表格将 IMU 表格中的时间戳 TimeUS 和 flowX 复制到新表格中，并在添加 TimeUS 和 FlowX 的表头。

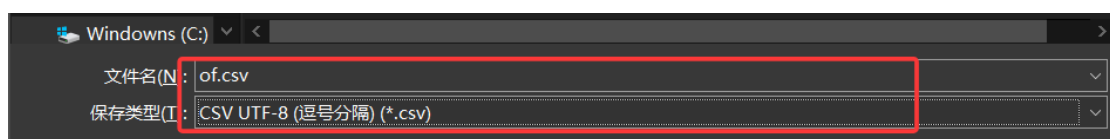


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	438	0001-01-OF	5632402	245	0	0	-0.00153912	0.00200328										
2	841	0001-01-OF	5652323	245	0	0	-0.00075891	0.001622559										
3	955	0001-01-OF	5672381	245	0	0	0.001549797	-0.00060995										
4	1049	0001-01-OF	5692339	245	0	0	0.001866058	-0.00321864										
5	1103	0001-01-OF	5712401	245	0	0	-0.00021789	-0.00207671										
6	1185	0001-01-OF	5732366	245	0	0	-0.00223097	-0.00025036										
7	1505	0001-01-OF	5752397	245	0	0	-0.00142179	0.000966163										
8	1507	0001-01-OF	5772379	245	0	0	-0.00042427	0.000857852										
9	1535	0001-01-OF	5792331	245	0	0	0.001093374	-0.00148226										
10	1536	0001-01-OF	5812374	245	0	0	0.000509941	-0.00227186										
11	1542	0001-01-OF	5832330	245	0	0	-0.00067627	-0.00134447										
12	1546	0001-01-OF	5852396	245	0	0	-0.00049679	-0.00035503										
13	1550	0001-01-OF	5872377	245	-0.0017550	-1.54E-00	-0.00113842	0.000872056										




  


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	TimeUS	FlowX												
2	5632402	0												
3	5652323	0												
4	5672381	0												
5	5692339	0												
6	5712401	0												
7	5732366	0												
8	5752397	0												
9	5772379	0												
10	5792331	0												

- (5) 保存为 csv 文件并取名为 of.csv



- (6) 创建一个名为 test 文件夹（文件名可随意设置），在文件夹中创建名为 compare\_imu\_of.py 的文件，并将 imu.csv 和 of.csv 放入文件夹中。

名称	修改日期	类型	大小
 compare_imu_of.py	2025/7/15 12:27	Python 源文件	3 KB
 imu.csv	2025/7/15 11:39	Microsoft Excel ...	22 KB
 of.csv	2025/7/15 9:11	Microsoft Excel ...	19 KB

- (7) 将以下代码复制到 compare\_imu\_of.py 文件中

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import detrend

# -----
# 1. 读取 CSV 文件
# -----
imu_file = 'imu.csv'
of_file = 'of.csv'

# 读取 IMU 数据
imu_df = pd.read_csv(imu_file)
imu_df['TimeSec'] = imu_df['TimeUS'] / 1e6

# 去掉重复时间戳（每对只留第一行）
imu_df = imu_df.groupby('TimeSec').first().reset_index()

# 读取 OF 数据（不做去重）
of_df = pd.read_csv(of_file)
of_df['TimeSec'] = of_df['TimeUS'] / 1e6

# -----
# 2. 插值光流数据到 IMU 时间轴
# -----
of_interp = np.interp(
    imu_df['TimeSec'],
    of_df['TimeSec'],
    of_df['FlowX']
)

# -----
# 3. 绘制原始波形
# -----
plt.figure(figsize=(12,6))
plt.plot(imu_df['TimeSec'], imu_df['GyrX'], label='IMU.GyrX')
plt.plot(imu_df['TimeSec'], of_interp, label='OF.FlowX (interpolated)')
plt.xlabel('Time (s)')
plt.ylabel('Value')
plt.title('IMU vs OF (Interpolated)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```



```
# -----
# 4. 去趋势处理
# -----
imu_signal = detrend(imu_df['GyrX'].values)
of_signal = detrend(of_interp)

# -----
# 5. 互相关分析
# -----
correlation = np.correlate(of_signal, imu_signal, mode='full')
lag_index = np.argmax(correlation) - (len(imu_signal) - 1)

# 采样间隔
intervals = np.diff(imu_df['TimeSec'])
intervals = intervals[intervals > 0]
sampling_interval = np.median(intervals)

delay_sec = lag_index * sampling_interval

print()
print("Estimated delay: {:.1f} ms".format(delay_sec*1000))
print("Lag index:", lag_index)
print("Sampling interval (s):", sampling_interval)
print()

# -----
# 6. 绘制互相关曲线
# -----
lags = np.arange(-len(imu_signal)+1, len(imu_signal))
plt.figure(figsize=(12,6))
plt.plot(lags * sampling_interval * 1000, correlation)
plt.xlabel('Lag (ms)')
plt.ylabel('Correlation')
plt.title('Cross-correlation between IMU and OF')
plt.grid(True)
plt.show()

# -----
# 7. 平移光流再绘图
# -----
shifted_time = imu_df['TimeSec'] - delay_sec

plt.figure(figsize=(12,6))
plt.plot(imu_df['TimeSec'], imu_df['GyrX'], label='IMU.GyrX')
plt.plot(shifted_time, of_interp, label='OF.FlowX shifted ({:.1f} ms)'.format(delay_sec*1000))
plt.xlabel('Time (s)')
plt.ylabel('Value')
plt.title('Aligned IMU and OF after delay compensation')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

(9) 安装依赖库，打开命令行，执行：

```
pip install pandas numpy matplotlib scipy
```

3、 运行脚本

(1) 在命令行进入脚本目录：

```
cd C:\Users\Administrator\Desktop\test
```

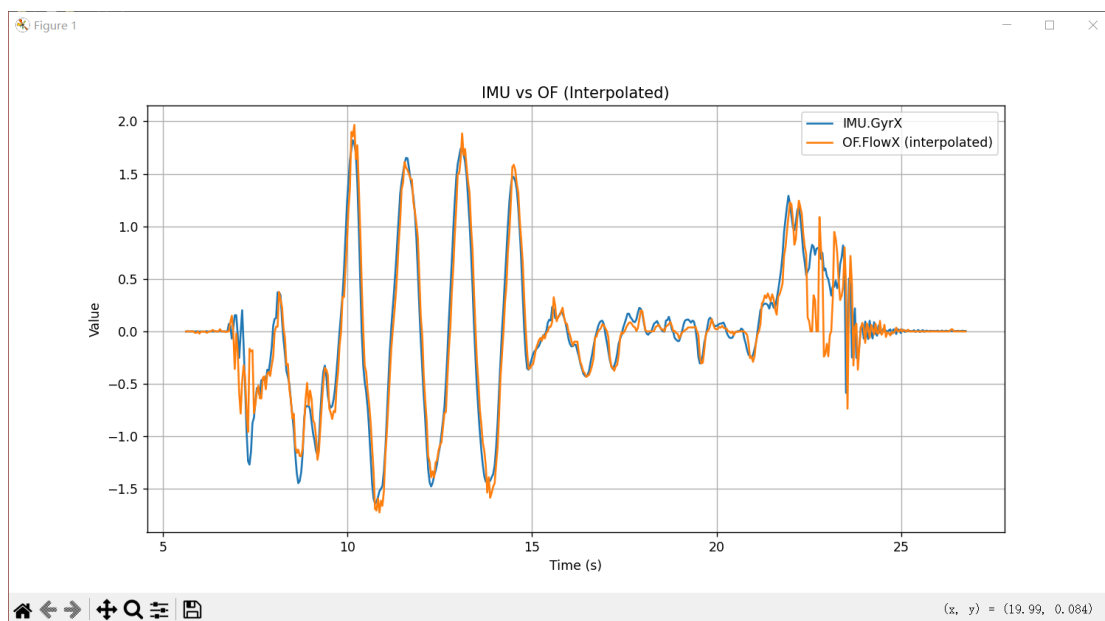
注:根据自己的实际情况修改脚本目录.

(2) 执行

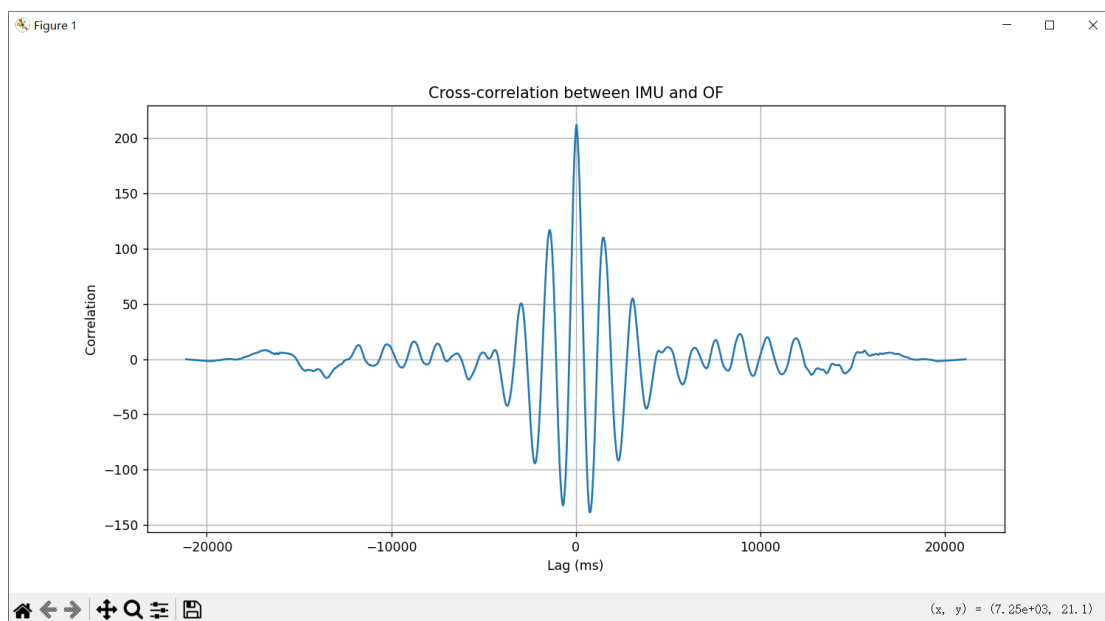
```
python compare_imu_of.py
```

4、 运行结果

IMU vs OF 原始波形：

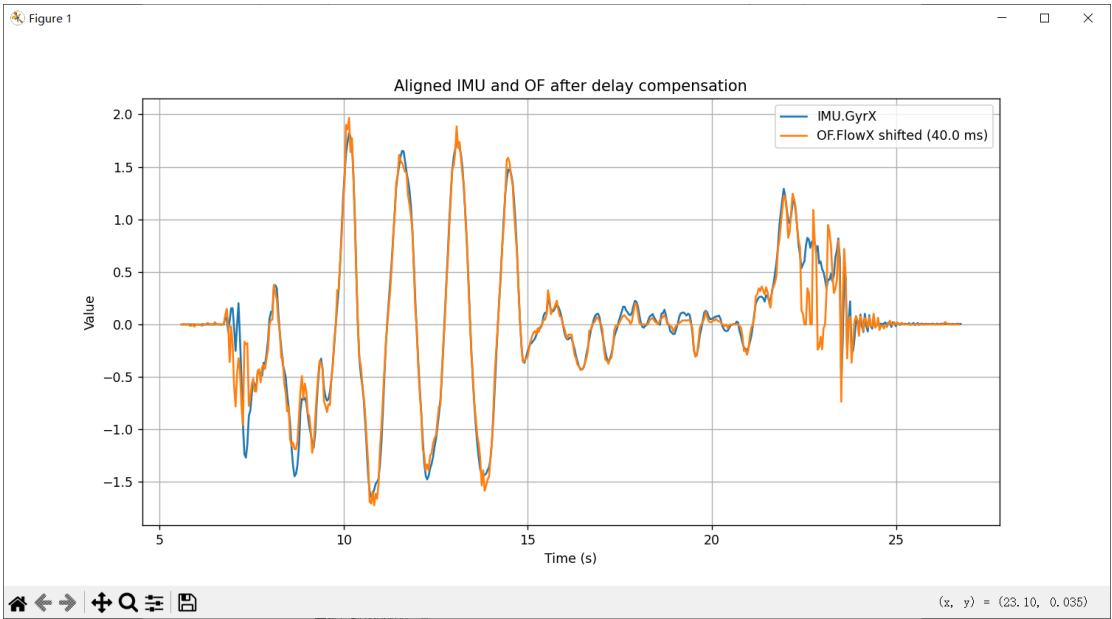


互相关曲线：





平移后的对齐波形：



命令行打印延迟：

```
C:\Users\Administrator\Desktop\test>python compare_imu_of.py
Estimated delay: 40.0 ms
Lag index: 1
Sampling interval (s): 0.0400039999999999706
|
```

测试结果表明该次的延迟为 40ms，实际的结果需多次测试取平均值。

测试总结：

经过多次测试取平均值得方式，分别得到 T1、T2 在使用 MAVlink 协议时的延迟为

T1	T2
40ms	40ms