

IMU配置手冊

適用產品：CH0X0/HI14/CH10X系列(V1.6.6)

官方網站：<https://sealandtech.com.tw>

屬性：公開

採購、支援：sltech@ms28.hinet.net

IMU配置手冊

1. 模組配置簡述

- 1. 1. 地磁輔助場景(AHRS/9軸模式)
- 1. 2. 同步輸入與同步輸出(時間同步)
 - 1. 2. 1. 數據同步觸發(SIN)
 - 1. 2. 2. 同步輸出(SOUT)

2. 模組配置命令

- 2. 1. 配置命令總覽
- 2. 2. 指令詳解

- 2. 2. 1. REBOOT
- 2. 2. 2. SAVECONFIG
- 2. 2. 3. SERIALCONFIG
- 2. 2. 4. CONFIG

工作模式配置: 6軸 或者9軸(地磁輔助)模式

水平校準

手動設定航向角

座標系旋轉(改變安裝方式)

多功能IO複用功能配置

使用者級陀螺校準

- 2. 2. 5. LOG

ENABLE/DISABLE: 全域性打開/關閉數據輸出

VERSION: 顯示模組版本資訊

COMCONFIG: 顯示串列埠配置資訊

設定數據幀輸出型別及頻率

- 2. 2. 6. FRESET

3. RS-232/TTL/USB 數據協議(自定義二進制)

- 3. 1. 數據幀格式
- 3. 2. 出廠預設輸出
- 3. 3. 數據域內容
 - 3. 3. 1. 浮點型IMU數據幀(HI91)
 - 3. 3. 2. 整型IMU數據幀(HI92)
- 3. 4. CRC
- 3. 5. 數據幀結構示例(以HI91為例)
- 3. 6. C語言解析程式碼示例(以HI91為例)
- 3. 7. 最大傳輸速率

4. RS-485輸出協議(Modbus)

4.1. 數據幀格式

4.1.1. 讀暫存器(0x03)

4.1.2. 寫暫存器(0x06)

4.1.3. CRC校驗

4.2. 暫存器列表

4.3. 常用配置

4.3.1. 控制暫存器說明(0x00)

4.3.2. 配置波特率(0x04)

4.3.3. 配置節點ID(0x05)

4.3.4. 設定安裝方式 (0xA6)

4.3.5. 設定水平校準(0xA5)

4.3.6. 設定6軸或9軸模式(0x06)

4.4. 讀取模組版本資訊(0x70-0x82)

4.5. 讀取感測器數據(0x34-0x4B)

5. CAN數據協議(CANopen)

5.1. CANopen 預設設定

5.2. CANopen TPDO

5.3. 使用上位機連線CAN裝置

5.4. 配置指令(SDO協議)

5.4.1. SDO(Service Data Object)協議

修改節點ID (0x20A0)

儲存配置到Flash(0x2000)

復位(0x2000)

恢復出廠設定(0x2000)

修改CAN波特率(0x209A)

修改/關閉/開啟數據輸出速率(0x1800-0x1805)

設定傾角儀輸出正負號(0x209E)

設定傾角儀零點(0x20A5)

5.4.2. 同步協議

配置TPDO為同步模式

發送CANopen同步幀

設定心跳包

6. CAN數據協議(J1939)

6.1. PGN訊息列表

6.1.1. PGN65327(FF2F) 時間資訊

6.1.2. PGN65332(FF34) 加速度

6.1.3. PGN65335(FF37) 角速度

6.1.4. PGN65341(FF3D) 俯仰橫滾角

6.1.5. PGN65345(FF41) 航向角

- 6. 1. 6. PGN65354(FF4A) 傾角儀輸出
- 6. 2. 配置指令
 - 6. 2. 1. 配置格式
 - 6. 2. 2. 配置模組
- 7. CAN數據協議(NMEA2000)
- 8. 地磁校準
 - 8. 1. 地磁校準步驟
 - 8. 1. 1. 使用者地磁校準
 - 8. 1. 2. 空間磁場干擾
 - 8. 1. 3. 關於模組地磁校準演算法
 - 8. 2. 配置地磁校準(手動地磁校準)
 - 8. 3. 再次強調
- 9. 附錄1 四元數/歐拉角/旋轉矩陣互轉
 - 9. 1. 四元數轉旋轉矩陣
 - 9. 2. 四元數轉歐拉角 - 東北天(ENU)-312(先轉Z,然後X軸,最後Y軸)旋轉順序下的歐拉角
 - 9. 3. 四元數轉歐拉角 - 北東地(NED)-321(先轉Z軸,然後Y軸,最後X軸)旋轉順序下的歐拉角

1. 模組配置簡述

產品的預設配置已經可以滿足大多數使用者需求，因此在使用產品前需要仔細閱讀此章節，結合自身的使用需求，判斷是否需要進行使用者配置。

1.1. 地磁輔助場景(AHRS/9軸模式)

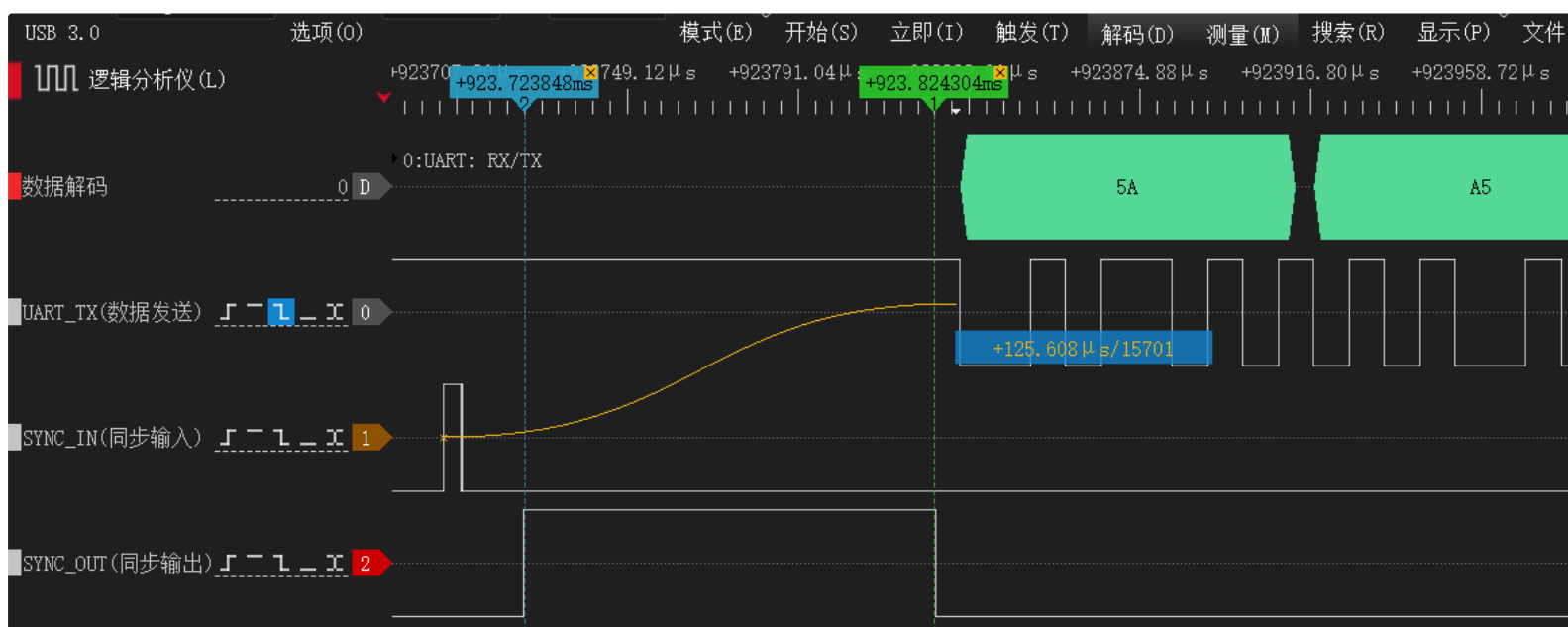
在絕對大多數情況下，機器人及室內環境，AHRS(9軸)模式很容易受到干擾導致航向角產生誤差。在少數空曠且無磁場干擾的環境下，可以嘗試使用地磁輔助模式，比如無人機，在使用前需要先將模組配置為地磁輔助模式並且進行地磁校準。詳見地磁校準章節。

序列介面配置請參考 CONFIG-模式配置

1.2. 同步輸入與同步輸出(時間同步)

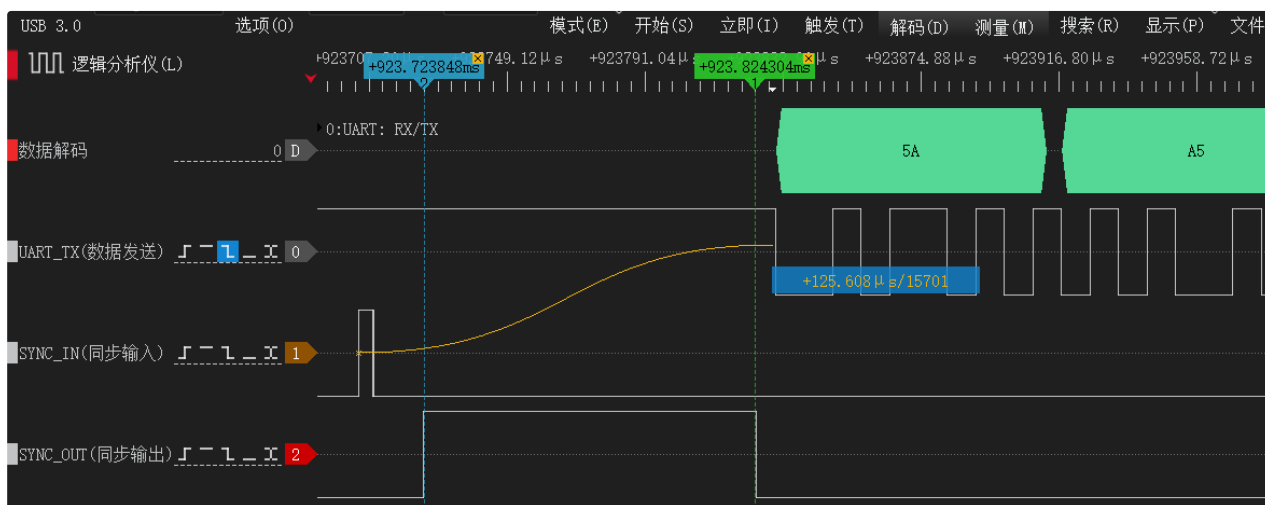
1.2.1. 數據同步觸發(SIN)

部分產品有同步輸入引腳(SIN)，用於IMU時間同步，不使用時可懸空。當某個輸出幀被配置為同步觸發時(ONMARK觸發，見LOG指令)，每當SIN引腳檢測到上升沿，都會輸出一幀該數據。該功能主要用於接收主控產生的高精度方波脈衝，以觸發高頻同步IMU數據。從SIN引腳檢測到上升沿到數據幀發出的延遲為125us(見下圖)。



1.2.2. 同步輸出(SOUT)

- 數據同步輸出(SYNC_OUT)：輸出引腳，無數據輸出時為低電平(空閑)，一幀數據開始發送前會發送一個高脈衝，高脈衝結束(下降沿)後緊接數據輸出，見下圖。



- 在使用同步輸入功能時，先關閉所有非同步定時輸出訊息，然後再使用 LOG <MSG> ONMARK 1 打開同步觸發輸入功能，詳情見請參見LOG命令

2. 模組配置命令

模組配置採用ASCII字串命令，每條命令必須以回車換行 `\r\n` 結束(類似AT指令)，才能被系統識別。

2.1. 配置命令總覽

指令	功能	備註
REBOOT	復位模組	和重新上電等效
SAVECONFIG	儲存所有配置參數	立即生效
SERIALCONFIG	波特率設定	立即生效
CONFIG	設定使用者參數及模式	立即生效
LOG	列印模組資訊或配置輸出數據	立即生效
FRESET	恢復出廠設定	立即生效

所有配置指令需要復位或重新上電後才能生效

2.2. 指令詳解

2.2.1. REBOOT

復位模組，立即生效，和重新上電效果相同。

2.2.2. SAVECONFIG

儲存所有使用者配置到Flash。

2.2.3. SERIALCONFIG

設定串列埠波特率，可選值：9600/115200/256000/460800/921600

配置串列埠波特率為115200

`SERIALCONFIG 115200`

`SAVECONFIG`

使用此指令需要特別注意，輸入錯誤波特率後會導致無法和模組通訊。

2.2.4. CONFIG

用於配置模組工作參數，絕大多數命令執行後立即生效，且需要 `SAVECONFIG` 才能掉電儲存

工作模式配置: 6軸 或者9軸(地磁輔助)模式

- `CONFIG ATT MODE 0` 配置模組為6DOF模式
- `CONFIG ATT MODE 1` 配置模組為AHRS(9軸)模式

水平校準

- `CONFIG ATT RST 2` 設定相對水平(設定相對零點): 將目前Pitch/Roll角度設定為零。
- `CONFIG ATT RST 5` 取消水平校平: 清除由 `CONFIG ATT RST 2` 設定的相對俯仰橫滾角度。
- `CONFIG ATT RST 3` 自動校平(適用於機器人IMU產品): 如果目前俯仰角/橫滾角接近0°,0°(水平正面放置), 則自動校準到0,0。如果目前俯仰角/橫滾角接近0° 或 180°(水平倒放), 則自動校準到 0°,180°。其中, 「接近」定義為 Pitch Roll均小於5°

- 執行 `CONFIG ATT RST` 命令時，模組需要保持靜止，如果模組在運動中執行該命令，則有可能造成較大校平誤差
- ATT RST 2 和 ATT RST 3 的區別:
 - ATT RST 3 在執行校平時會檢測目前是否只是輕微傾斜，如果傾斜度很大，則放棄執行，而RST 2不會做任何執行前檢查。
 - ATT RST 3 會在校平時同時校平加速度計的輸出值，使得加速度計輸出值x,y接近於0。
 - ATT RST 3後,不能被 ATT RST 5 取消,會永久生效

手動設定航向角

使用者手動設定航向角: `CONFIG YAW <MODE> <VAL>` · MODE: 0:相對模式 1:絕對模式 · YAW: 設定值,範圍(-180 到 180,單位: deg) · 此命令立即生效 · 掉電不儲存。

- `CONFIG YAW 1 16` : 絕對設定模式: 將航向角設定為 16 deg
- `CONFIG YAW 0 1.5` : 相對設定模式 · 例: 如目前航向角為30 deg · 則設定後航向角變為 30 + 1.5= 31.5 deg

座標系旋轉(改變安裝方式)

`CONFIG IMU URFR C00,C01,C02,C10,C11,C12,C20,C21,C22`

其中 C_{nm} 支援浮點數

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_B = \begin{bmatrix} C00 & C01 & C02 \\ C10 & C11 & C12 \\ C20 & C21 & C22 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_U$$

其中 $\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_U$ 為旋轉後的感測器座標系下感測器數據 · $\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_B$ 為旋轉前感測器座標系下感測器數據

下面是幾種常用旋轉舉例：

- 新感測器座標系為 繞原座標系X軸 旋轉 -90°(Y軸正方向朝下的垂直安裝) · 配置命令：
`CONFIG IMU URFR 1,0,0,0,1,0,-1,0`
- 新感測器座標系為 繞原座標系X軸 旋轉 90°(Y軸正方向朝上的垂直安裝) · 配置命令：
`CONFIG IMU URFR 1,0,0,0,-1,0,1,0`
- 新感測器座標系為 繞原座標系X軸 旋轉180° · 配置命令：
`CONFIG IMU URFR 1,0,0,0,-1,0,0,-1`
- 新感測器座標系為 繞原座標系Y軸 旋轉 90°(X軸正方向朝上的垂直安裝) · 配置命令：
`CONFIG IMU URFR 0,0,-1,0,1,0,1,0`
- 新感測器座標系為 繞原座標系Y軸 旋轉-90°(X軸正方向朝下垂直安裝) · 配置命令：
`CONFIG IMU URFR 0,0,1,0,1,0,-1,0`
- 新感測器座標系為 繞原座標系Y軸 旋轉180° · 配置命令：
`CONFIG IMU URFR -1,0,0,0,1,0,0,-1`
- 新感測器座標系為 繞原座標系Z軸 旋轉90° · 配置命令：
`CONFIG IMU URFR 0,-1,0,1,0,0,0,1`
- 新感測器座標系為 繞原座標系Z軸 旋轉-90° · 配置命令：
`CONFIG IMU URFR 0,1,0,-1,0,0,0,1`
- 水平 · Z軸朝上安裝(預設值)：
`CONFIG IMU URFR 1,0,0,0,1,0,0,1`

- 設定URFR後需要軟體復位或重新上電才能生效 · 不需要每次上電都發送該指令。
- 如何確定URFR參數:(以繞原座標系X軸 旋轉 -90°(Y軸正方向朝下的垂直安裝) 為例) · 可寫出轉換後坐標與轉換前坐標的關係:

- $X_U = X_B$
- $Y_U = -Z_B$
- $Z_U = Y_B$

從而可以寫出轉換矩陣 =

1 0 0 (轉換後的X = 轉換前的X)
0 0 -1(轉換後的Y = 轉換前的-Z)
0 1 0(轉換後的Z = 轉換前的Y)

按照上述URFR定義公式 · URFR參數需要的實際上是上述矩陣的轉置 · 即:

1 0 0
0 0 1
0 -1 0

多功能IO複用功能配置

模組具有多個多功能引腳: IO1-IO9這些引腳可用作不同的功能·不同功能之間通過配置命令切換。

CONFIG <PMUX> <IO>

- PMUX: 複用功能: PMUX1 - PMUX5
- IO: 引腳號: IO1-IO9

例:

- 將IO2分配為LED(PMUX3)功能: CONFIG PMUX3 IO2

複用功能編號	複用名稱	方向	說明	預設分配IO
PMUX1	SIN	I	同步脈衝輸入(SIN/PPS): 輸入引腳, 見同步輸入與同步輸出章節	IO1
PMUX2	SOUT	O	同步輸出:無數據輸出時為低電平(空閑)·一幀數據開始發送時會發送一個高脈衝·脈衝寬度位80us·用於同步數據	IO2
PMUX3	LED	O	輸出, 執行狀態指示燈	IO5

- 並不是所有IO引腳在本產品上都引出·具體參見產品使用者手冊硬體部分。

使用者級陀螺校準

陀螺儀測量精度會受到時間老化(效能緩慢衰減)、安裝應力(PCB焊接變形)、溫度變化和機械應力(振動衝擊)等因素影響。本產品支援X、Y、Z三軸獨立校準,可提升旋轉角度測量精度(校準後可保證比例因子誤差在0.1%以內)·校準參數將永久儲存在Flash中·並具備即時監測功能確保校準有效性。

校準方式說明:

- Z軸校準:可直接放置在水平面上進行·無需特殊裝置,適用於AGV,大型機器這種無法特定安裝工裝的情況,但是請不要使用手或手動轉檯去校準,此種方法無法保證校準精度。
- X/Y軸校準:需要使用可以精確轉動的裝置(如專業轉檯)·確保轉動軸與待校準軸對齊,如果沒有專業轉檯裝置,不建議對X/Y軸進行校準。
- 三軸校準互相獨立,可只校準任意一個軸,校準時無需指定哪個軸旋轉,程式會自動判斷,校準成功後立即生效,掉電儲存。

校準步驟:

1. 準備工作
 - Z軸校準:將模組放置在水平,平整地面上。
 - X/Y軸校準:將模組固定在轉動裝置上·確保轉動軸與待校準軸對齊。
 - 確保環境溫度穩定·避免強烈振動干擾。
2. 發送開始命令: **CONFIG USRCAL START <ANGLE>**
 - <ANGLE>:校準角度(720-1800度·即2-5圈·圈數越多精度越高)
 - 示例: **CONFIG USRCAL START 720** 開始2圈校準(可以是X,Y,Z中任意一個軸)
3. 執行校準動作
 - 速度要求: 20-100 deg/s (建議50 deg/s·大約5-6秒轉一圈,旋轉方向任意)
 - 校準:通過轉檯或裝置勻速轉動
 - 整個過程需保持速度均勻·避免中途停頓,突然加減等
4. 發送結束命令: **CONFIG USRCAL STOP**
 - 返回"OK":校準成功·新參數自動儲存生效
 - 返回"ERR":校準失敗·繼續使用原參數

常見校準失敗原因:

1. 角度偏差過大:實際轉動角度與設定值相差超過5%
2. 旋轉操作不規範:Z軸:確保模組放置平穩·轉動時保持水平,X/Y軸:確保轉動軸與待校準軸準確對齊。
3. 操作不當:轉動太快或太慢·中途停頓。
4. 環境干擾:避免在有振動的裝置附近操作,機器人電機振動過大等。
5. 校準後誤差依然存在甚至更大:最有可能的原因是校準操作不規範(見1,2,3,4)。校準是一個精密的過程,假設標定時規定旋轉720°,實際確旋轉了725°,則比例因子則會錯誤的標定為 $5/720 = 0.6\%$,這已經遠超出廠精度。請確保裝置規範,校準過程精確,否則不建議執行使用者校準。

2.2.5. LOG

ENABLE/DISABLE: 全域性打開/關閉數據輸出

LOG ENABLE 全域性使能數據幀輸出(預設)

LOG DISABLE 全域性禁止數據幀輸出

VERSION: 顯示模組版本資訊

LOG VERSION 列印韌體版本資訊

COMCONFIG: 顯示串列埠配置資訊

LOG COMCONFIG 列印串列埠及輸出協議配置資訊

設定數據幀輸出型別及頻率

LOG <MSG> <TYPE> <VALUE>

定時輸出

- **MSG:** HI91, HI92
- **TYPE:** 固定為: ONTIME
- **VALUE:** 輸出幀週期，單位為s，取值範圍: 1(1Hz) · 0.5(2Hz) · 0.1(10Hz) · 0.02(50Hz) · 0.01(100Hz), 0.005(200Hz), 0.002(500Hz),以此類推

示例:

- **LOG HI91 ONTIME 0.01** 將目前串列埠的 91數據包輸出週期設定為0.01s(100Hz)
- **LOG HI92 ONTIME 0.05** 將目前串列埠的 92數據包輸出週期設定為0.05s(20Hz)
- **LOG HI91 ONTIME 0** 關閉91數據包輸出

同步(外部觸發)輸出

- **MSG:** HI91, HI92
- **TYPE:** 固定為: ONMARK
- **VALUE:** 固定為 1

示例:

- **LOG HI91 ONMARK 1** 將目前串列埠的 91數據包配置為同步輸出模式，當SIN/PPS引腳有脈衝輸入時，觸發一幀
- **LOG HI91 ONMARK ONCE** 指令手動觸發一次數據輸出，和SIN脈衝效果相同

當輸出幀率設定為比較高時(比如500Hz),預設的115200波特率不滿足輸出頻寬要求，此時需要將模組波特率設高(比如921600)後，模組才能正確的輸出數據。

波特率參數設定好後掉電儲存，復位模組生效。上位機或者其他主機的波特率也要做相應修改。

2.2.6. FRESET

恢復出廠設定

3. RS-232/TTL/USB 數據協議(自定義二進制)

該協議是私有的二進制協議，可以輸出全部感測器資訊，支援該協議的介面:RS-232/TTL/USB(虛擬串列埠)。預設串列埠格式為N-8-N-1(8位數據位，1位停止位，0位校驗位)

3.1. 數據幀格式

模組上電後，按照預設幀率(100Hz)輸出幀數據，幀格式如下：

域名稱	值	長度(位元組)	說明
幀頭	5A A5	2	幀頭
數據域長度	1-512	2	幀中數據域的長度，LSB(低位元組在前) 長度表示數據域的長度(不包含幀頭，幀型別，長度，CRC)
CRC校驗	-	2	除CRC 位元組外其餘所有欄位(幀頭,幀型別,長度, 數據域)的16 位CRC 校驗和。 LSB(低位元組在前)
數據域	-	1-512	一幀攜帶的數據，由若干個子數據包組成，數據包包含數據包標籤和數據兩部分。 標籤決定了數據的型別及長度。

3.2. 出廠預設輸出

出廠預設輸出: 浮點型IMU數據幀(HI91)

3.3. 數據域內容

3.3.1. 浮點型IMU數據幀(HI91)

數據域共76位元組。包含模組ID、溫度、IMU的原始數據、地磁、氣壓、融合後的姿態數據等。

開啟數據幀示例: LOG HI91 ONTIME 1, 具體詳見配置指令章節

位元組 偏移	名稱	數據型 別	大小 (Byte)	單位	比例因 子	說明
0	tag	uint8_t	1	-	-	數據包標籤:0x91
1	status	uint16_t	2	-	-	狀態字，保留
3	temperature	int8_t	1	°C	1	模組平均溫度
4	air_pressure	float	4	Pa	1	氣壓
8	system_time	uint32_t	4	ms	1	當GPS時間未同步成功時,該數據為本地時間戳: 即從系統開 機開始累加，每毫秒增加1。 當GPS時間同步成功時，該數據為UTC時間。
12	acc_b	float	4*3	G	1	經過出廠校準後的加速度,順序為：XYZ軸。 1G=1x當地重力加速度,可近似為9.8 m/s ²
24	gyr_b	float	4*3	deg/s(dps)	1	經過出廠校準後的角速度,順序為：XYZ軸
36	mag_b	float	4*3	uT	1	磁強度,順序為：XYZ軸
48	roll	float	4	deg	1	橫滾角
52	pitch	float	4	deg	1	俯仰角
56	yaw	float	4	deg	1	航向角
60	quat	float	4*4	-	-	節點四元數集合,順序為WXYZ

3.3.2. 整型IMU數據幀(HI92)

共48位元組，比浮點型數據幀數據量更小。開啟數據幀示例: LOG HI92 ONTIME 1, 具體詳見配置指令章節

位元組偏移	名稱	數據型別	大小 (Byte)	單位	比例因子	說明
0	tag	uint8_t	1	-	-	數據包標籤:0x92
1	status	uint16_t	2	-	-	狀態字·保留
3	temperature	int8_t	1	°C	1	系統平均溫度
4	reserved	uint16_t	2	-	-	保留
6	air_pressure	int16_t	2	Pa	1	大氣壓+100000Pa : 如2000表示 102000Pa
8	heave	int16_t	2	m	0.01	船舶升沉(垂向位移), 船舶垂向升沉位移(僅海洋測量類產品)
10	gyr_b	int16_t*3	6	rad/s	0.001	IMU角速度: X,Y,Z軸(出廠校準後)
16	acc_b	int16_t*3	6	m/s^(2)	0.0048828	IMU加速度: X,Y,Z軸(出廠校準後)
22	mag_b	int16_t*3	6	uT	0.030517	IMU磁強度: X,Y,Z軸(出廠校準後)
28	roll	int32_t	4	deg	0.001	橫滾角
32	pitch	int32_t	4	deg	0.001	俯仰角
36	yaw	int32_t	4	deg	0.001	航向角
40	quat	int16_t*4	8	-	0.0001	節點四元數集合,順序為WXYZ

3.4. CRC

16-bit CRC實現例程：

```

1  /*
2     correctCrc: previous crc value, set 0 if it's first section
3     src: source stream data
4     lengthInBytes: length
5  */
6  static void crc16_update(uint16_t *correctCrc, const uint8_t *src, uint32_t lengthInBytes)
7  {
8     uint32_t crc = *correctCrc;
9     uint32_t j;
10    for (j=0; j < lengthInBytes; ++j)
11    {
12        uint32_t i;
13        uint32_t byte = src[j];
14        crc ^= byte << 8;
15        for (i = 0; i < 8; ++i)
16        {
17            uint32_t temp = crc << 1;
18            if (crc & 0x8000)
19            {
20                temp ^= 0x1021;
21            }
22            crc = temp;
23        }
24    }
25    *correctCrc = crc;
26 }

```

3.5. 數據幀結構示例(以HI91為例)

使用串列埠助手採樣一幀數據(HI91數據幀),共82位元組,前6位元組為幀頭,長度和CRC校驗值。剩餘76位元組為數據域。假設數據接收到C語言陣列 `buf` 中。如下所示:

5A A5 4C 00 14 BB 91 08 15 23 09 A2 C4 47 08 15 1C 00 CC E8 61 BE 9A 35 56 3E 65 EA 72 3F 31 D0 7C BD 75 DD C5 BB 6B D7 24 BC 89 88 FC 40 01 00 6A 41 AB 2A 70 C2 96 D4 50 41 ED 03 43 41 41 F4 F4 C2 CC CA F8 BE 73 6A 19 BE F0 00 1C 3D 8D 37 5C 3F

欄位名稱	型別	原始值	解析值	描述
幀頭	/	5A A5	-	幀頭
數據域長度	/	4C 00	76	數據域長度=76位元組
CRC	/	14 BB	BB14	CRC校驗值
tag	/	91	91	0x91數據包(從次欄位開始為payload數據域)
狀態字,保留	uint16_t	08 15	5384	保留
temperature	int8_t	23	35	溫度: °C
air_pressure	float	09 A2 C4 47	100676	氣壓,Pa
system_time	uint32_t	08 15 1C 00	0x001C1508 = 1840392	時間戳, ms
acc_b_x	float	CC E8 61 BE	-0.220615	加速度X軸,G
acc_b_y	float	9A 35 56 3E	0.209189	加速度Y軸,G
acc_b_z	float	65 EA 72 3F	0.948889	加速度Z軸,G
gyr_b_x	float	31 D0 7C BD	-0.061722	角速度X軸, dps
gyr_b_y	float	75 DD C5 BB	-0.00603836	角速度Y軸, dps
gyr_b_z	float	6B D7 24 BC	-0.0100611	角速度Z軸, dps
mag_b_x	float	89 88 FC 40	7.89167	磁場X軸, uT
mag_b_y	float	01 00 6A 41	14.625	磁場Y軸, uT
mag_b_z	float	AB 2A 70 C2	-60.0417	磁場Z軸, uT
roll	float	96 D4 50 41	13.0519	橫滾角, deg
pitch	float	ED 03 43 41	12.1885	俯仰角, deg
yaw	float	41 F4 F4 C2	-122.477	航向角, deg
q_w	float	CC CA F8 BE	-0.485922	四元數W
q_x	float	73 6A 19 BE	-0.14982	四元數X
q_y	float	F0 00 1C 3D	0.0380868	四元數Y
q_z	float	8D 37 5C 3F	0.860223	四元數Z

3.6. C語言解析程式碼示例(以HI91為例)

1.校驗CRC

```

1  uint16_t payload_len;
2  uint16_t crc;
3  crc = 0;
4  payload_len = buf[2] + (buf[3] << 8);
5
6  /* calculate 5A A5 and LEN field crc */
7  crc16_update(&crc, buf, 4);
8
9  /* calculate payload crc */
10 crc16_update(&crc, buf + 6, payload_len);

```

得到CRC值為0x516C, 與幀中攜帶CRC值相同。CRC校驗通過。

2.定義數據接受結構

從 0x91 開始為數據包的數據域，定義數據結構體和常用轉換宏：

```
1 #include "stdio.h"
2 #include "string.h"
3 /* common type conversion */
4 #define U1(p) (*((uint8_t *) (p)))
5 #define I1(p) *((int8_t *) (p))
6 #define I2(p) *((int16_t *) (p))
7 static uint16_t U2(uint8_t *p) {uint16_t u; memcpy(&u,p,2); return u;}
8 static uint32_t U4(uint8_t *p) {uint32_t u; memcpy(&u,p,4); return u;}
9 static int32_t I4(uint8_t *p) {int32_t u; memcpy(&u,p,4); return u;}
10 static float R4(uint8_t *p) {float r; memcpy(&r,p,4); return r;}
11 typedef struct
12 {
13     uint8_t tag; /* item tag: 0x91 */
14     float acc[3]; /* acceleration */
15     float gyr[3]; /* angular velocity */
16     float mag[3]; /* magnetic field */
17     float eul[3]; /* attitude: eular angle */
18     float quat[4]; /* attitude: quaternion */
19     float pressure; /* air pressure */
20     uint32_t timestamp;
21 }imu_data_t;
```

3. 接收數據，從buf[6]=0x91開始為payload部分：

```
1 imu_data_t i0x91 = {0};
2 int offset = 6; /* payload strat at buf[6] */
3 i0x91.tag = U1(buf+offset+0);
4 i0x91.pressure = R4(buf+offset+4);
5 i0x91.timestamp = U4(buf+offset+8);
6 i0x91.acc[0] = R4(buf+offset+12);
7 i0x91.acc[1] = R4(buf+offset+16);
8 i0x91.acc[2] = R4(buf+offset+20);
9 i0x91.gyr[0] = R4(buf+offset+24);
10 i0x91.gyr[1] = R4(buf+offset+28);
11 i0x91.gyr[2] = R4(buf+offset+32);
12 i0x91.mag[0] = R4(buf+offset+36);
13 i0x91.mag[1] = R4(buf+offset+40);
14 i0x91.mag[2] = R4(buf+offset+44);
15 i0x91.eul[0] = R4(buf+offset+48);
16 i0x91.eul[1] = R4(buf+offset+52);
17 i0x91.eul[2] = R4(buf+offset+56);
18 i0x91.quat[0] = R4(buf+offset+60);
19 i0x91.quat[1] = R4(buf+offset+64);
20 i0x91.quat[2] = R4(buf+offset+68);
21 i0x91.quat[3] = R4(buf+offset+72);
```

4. 列印接收到的數據：

```
1 printf("%-16s0x%X\r\n", "tag:", i0x91.tag);
2 printf("%-16s%8.4f %8.4f %8.4f\r\n", "acc(G):", i0x91.acc[0], i0x91.acc[1],
i0x91.acc[2]);
3 printf("%-16s%8.3f %8.3f %8.3f\r\n", "gyr(deg/s):", i0x91.gyr[0], i0x91.gyr[1],
i0x91.gyr[2]);
4 printf("%-16s%8.3f %8.3f %8.3f\r\n", "mag(uT):", i0x91.mag[0], i0x91.mag[1],
i0x91.mag[2]);
5 printf("%-16s%8.3f %8.3f %8.3f\r\n", "eul(deg):", i0x91.eul[0], i0x91.eul[1],
i0x91.eul[2]);
6 printf("%-16s%8.3f %8.3f %8.3f %8.3f\r\n", "quat:", i0x91.quat[0], i0x91.quat[1],
i0x91.quat[2], i0x91.quat[3]);
7 printf("%-16s%8.3f\r\n", "pressure(pa):", i0x91.pressure);
8 printf("%-16s%d\r\n", "timestamp(ms):", i0x91.timestamp);
```

3.7. 最大傳輸速率

協議	位元組數	9600bps	115200bps	230400bps	256000bps	460800bps	921600bps
91	76	10Hz	100Hz	250Hz	250Hz	500Hz	1000Hz
92	48	10Hz	200Hz	250Hz	250Hz	500Hz	1000Hz

4. RS-485輸出協議(Modbus)

- 支援該協議的介面: RS485
- 預設串列埠配置: 115200 - N8N1
- Modbus 指令：
 - RS485通訊協議遵循Modbus RTU協議規範，數據以暫存器為單位進行發送和接收，每個暫存器佔用2個位元組，採用大端模式(高位元組在前)
 - 寫入: 0x06 (Write Single Register) :寫單個暫存器(每個Modbus暫存器為2個位元組)
 - 讀取: 0x03 (Read Holding Registers): 讀取單個或多個暫存器數據
 - 自定義功能碼: 0x50, 用於 Modbus ID自動分配，方便量產部署，韌體升級等
- Modbus裝置地址可修改, 出廠預設: 80 (0x50)

4.1. 數據幀格式

4.1.1. 讀暫存器(0x03)

主機發送:

域名稱	值	說明
ID	1-0xFF	Modbus裝置地址
FUN_CODE	0x03	命令碼
ADDR_H	-	要讀取的暫存器地址高8位
ADDR_L	-	要讀取的暫存器地址低8位
LEN_H	-	要讀取暫存器長度高8位(以暫存器個數為單位)
LEN_L	-	要讀取暫存器長度低8位(以暫存器個數為單位)
CRC_L	-	CRC低8位
CRC_H	-	CRC高8位

從機(模組)返回:

域名稱	值	說明
ID	1-0xFF	Modbus裝置地址
FUN_CODE	0x03	命令碼
LEN	-	返回暫存器數據的長度(不算ID·FUN_CODE,LEN,CRC欄位)以位元組為單位
DATAH	-	返回數據高8位
DATAL	-	返回數據低8位
----	-	返回數據高8位
----	-	返回數據低8位
CRC_L	-	CRC低8位
CRC_H	-	CRC高8位

4.1.2. 寫暫存器(0x06)

域名稱	值	說明
ID	1-0xFF	Modbus裝置地址
FUN_CODE	0x06	命令碼
ADDR_H	-	暫存器地址高8位
ADDR_L	-	暫存器地址低8位
DATA_H	-	寫入數據高8位
DATA_L	-	寫入數據低8位
CRC_L	-	CRC低8位
CRC_H	-	CRC高8位

從機返回:

域名稱	值	說明
ID	1-0xFF	Modbus裝置地址
FUN_CODE	0x06	命令碼
ADDR_H	-	暫存器地址高8位
ADDR_L	-	暫存器地址低8位
DATA_H	-	寫入數據高8位
DATA_L	-	寫入數據低8位
CRC_L	-	CRC低8位
CRC_H	-	CRC高8位

4.1.3. CRC校驗

- 線上計算CRC : <https://www.23bei.com/tool/59.html>
- C程式碼 :

```

1 static const uint16_t modbus_crc_table[256] = {
2     0x0000, 0xc0c1, 0xc181, 0x0140, 0xc301, 0x03c0, 0x0280, 0xc241,
3     0xc601, 0x06c0, 0x0780, 0xc741, 0x0500, 0xc5c1, 0xc481, 0x0440,
4     0xcc01, 0x0cc0, 0x0d80, 0xcd41, 0x0f00, 0xcfc1, 0xce81, 0x0e40,
5     0x0a00, 0xcac1, 0xcb81, 0x0b40, 0xc901, 0x09c0, 0x0880, 0xc841,
6     0xd801, 0x18c0, 0x1980, 0xd941, 0x1b00, 0xdbc1, 0xda81, 0x1a40,
7     0x1e00, 0xdec1, 0xdf81, 0x1f40, 0xdd01, 0x1dc0, 0x1c80, 0xdc41,
8     0x1400, 0xd4c1, 0xd581, 0x1540, 0xd701, 0x17c0, 0x1680, 0xd641,
9     0xd201, 0x12c0, 0x1380, 0xd341, 0x1100, 0xd1c1, 0xd081, 0x1040,
10    0xf001, 0x30c0, 0x3180, 0xf141, 0x3300, 0xf3c1, 0xf281, 0x3240,
11    0x3600, 0xf6c1, 0xf781, 0x3740, 0xf501, 0x35c0, 0x3480, 0xf441,
12    0x3c00, 0xfcc1, 0xfd81, 0x3d40, 0xff01, 0x3fc0, 0x3e80, 0xfe41,
13    0xfa01, 0x3ac0, 0x3b80, 0xfb41, 0x3900, 0xf9c1, 0xf881, 0x3840,
14    0x2800, 0xe8c1, 0xe981, 0x2940, 0xeb01, 0x2bc0, 0x2a80, 0xea41,
15    0xee01, 0x2ec0, 0x2f80, 0xef41, 0x2d00, 0xedc1, 0xec81, 0x2c40,
16    0xe401, 0x24c0, 0x2580, 0xe541, 0x2700, 0xe7c1, 0xe681, 0x2640,
17    0x2200, 0xe2c1, 0xe381, 0x2340, 0xe101, 0x21c0, 0x2080, 0xe041,
18    0xa001, 0x60c0, 0x6180, 0xa141, 0x6300, 0xa3c1, 0xa281, 0x6240,
19    0x6600, 0xa6c1, 0xa781, 0x6740, 0xa501, 0x65c0, 0x6480, 0xa441,
20    0x6c00, 0xacc1, 0xad81, 0x6d40, 0xaf01, 0x6fc0, 0x6e80, 0xae41,
21    0xaa01, 0x6ac0, 0x6b80, 0xab41, 0x6900, 0xa9c1, 0xa881, 0x6840,
22    0x7800, 0xb8c1, 0xb981, 0x7940, 0xbb01, 0x7bc0, 0x7a80, 0xba41,
23    0xbe01, 0x7ec0, 0x7f80, 0xbf41, 0x7d00, 0xbdc1, 0xbc81, 0x7c40,
24    0xb401, 0x74c0, 0x7580, 0xb541, 0x7700, 0xb7c1, 0xb681, 0x7640,
25    0x7200, 0xb2c1, 0xb381, 0x7340, 0xb101, 0x71c0, 0x7080, 0xb041,
26    0x5000, 0x90c1, 0x9181, 0x5140, 0x9301, 0x53c0, 0x5280, 0x9241,
27    0x9601, 0x56c0, 0x5780, 0x9741, 0x5500, 0x95c1, 0x9481, 0x5440,
28    0x9c01, 0x5cc0, 0x5d80, 0x9d41, 0x5f00, 0x9fc1, 0x9e81, 0x5e40,

```

```

29     0x5a00, 0x9ac1, 0x9b81, 0x5b40, 0x9901, 0x59c0, 0x5880, 0x9841,
30     0x8801, 0x48c0, 0x4980, 0x8941, 0x4b00, 0x8bc1, 0x8a81, 0x4a40,
31     0x4e00, 0x8ec1, 0x8f81, 0x4f40, 0x8d01, 0x4dc0, 0x4c80, 0x8c41,
32     0x4400, 0x84c1, 0x8581, 0x4540, 0x8701, 0x47c0, 0x4680, 0x8641,
33     0x8201, 0x42c0, 0x4380, 0x8341, 0x4100, 0x81c1, 0x8081, 0x4040
34 };
35
36 uint16_t modbus_crc_calc(uint8_t *buf, uint16_t len)
37 {
38     uint16_t crc = 0xFFFFU;
39     uint8_t nTemp;
40
41     while (len--)
42     {
43         nTemp = *buf++ ^ crc;
44         crc >>= 8;
45         crc ^= modbus_crc_table[(nTemp & 0xFFU)];
46     }
47
48     return(crc);
49 }

```

4.2. 暫存器列表

地址 (Hex)	地址 (Dec)	名稱	型別	功能	R/W	說明
0x00	0	CTRL	u16	控制	W	參見Modbus 設定模組章節
0x04	4	UART1_BAUD	u16	波特率	R/W	串列埠波特率
0x05	5	MD_ID	u16	Modbus ID	R/W	Modbus ID: 有效範圍: 1-128
0x06	6	HEADING_MODE	u16	航向角模式	R/W	0: 6軸模式(相對航向 · 航向角上電為0). 1: 9軸模式(地磁融合 · 絕對航向)
0x34	52	ACCX	i16	加速度X	R	單位G(1G=1重力加速度), 比例因子: 0.00048828
0x35	53	ACCY	i16	加速度Y	R	單位G(1G=1重力加速度), 比例因子: 0.00048828
0x36	54	ACCZ	i16	加速度Z	R	單位G(1G=1重力加速度), 比例因子: 0.00048828
0x37	55	GYRX	i16	角速度X	R	單位deg/s, 比例因子: 0.061035
0x38	56	GYRY	i16	角速度Y	R	單位deg/s, 比例因子: 0.061035
0x39	57	GYRZ	i16	角速度Z	R	單位deg/s, 比例因子: 0.061035
0x3A	58	MAGX	i16	磁強度X	R	單位uT, 比例因子: 0.030517
0x3B	59	MAGY	i16	磁強度Y	R	單位uT, 比例因子: 0.030517
0x3C	60	MAGZ	i16	磁強度Z	R	單位uT, 比例因子: 0.030517
0x3D	61	R_H	i32	橫滾角高16位	R	單位deg, 比例因子: 0.001
0x3E	62	R_L	-	橫滾角低16位	R	單位deg, 比例因子: 0.001
0x3F	63	P_H	i32	俯仰角高16位	R	單位deg, 比例因子: 0.001
0x40	64	P_L	-	俯仰角低16位	R	單位deg, 比例因子: 0.001
0x41	65	Y_H	i32	航向角高16位	R	單位deg, 比例因子: 0.001
0x42	66	Y_L	-	航向角低16位	R	單位deg, 比例因子: 0.001
0x43	67	TEMP	i16	溫度	R	單位°C, 比例因子: 0.01
0x44	68	PRS_H	i32	氣壓高16位	R	單位Pa, 比例因子: 0.01
0x45	69	PRS_L	-	氣壓低16位	R	單位Pa, 比例因子: 0.01
0x46	70	Q0	u16	四元數QW	R	四元數 · 比例因子: 0.0001
0x47	71	Q1	u16	四元數QX	R	四元數 · 比例因子: 0.0001
0x48	72	Q2	u16	四元數QY	R	四元數 · 比例因子: 0.0001
0x49	73	Q3	u16	四元數QZ	R	四元數 · 比例因子: 0.0001
0x4A	74	INCLI_X	i16	傾角儀X軸角度	R	雙軸傾角儀產品: X角度, ±180 · 單位deg, 比例因子: 0.011 單軸傾角儀產品: X角度, 0-360, 單位deg, 比例因子: 0.011
0x4B	75	INCLI_Y	i16	傾角儀Y軸角度	R	雙軸傾角儀Y角度: ±90, 單位deg, 比例因子: 0.011 單軸傾角儀: 此暫存器保留
0x4E	78	HEVAE	i16	船舶垂蕩	R	船舶垂蕩位移輸出, 單位 m, 比例因子 0.01
0x51	81	HEAVE_PERIOD	i16	船舶垂蕩週期	R	船舶垂蕩位移週期, 單位s, 比例因子 0.001
0x70-0x77	112-119	PNAME	u16	裝置名	R	裝置名字串, ASCII碼 · 共佔8個暫存器

地址 (Hex)	地址 (Dec)	名稱	型別	功能	R/W	說明
0x78	120	SW_VERSION	u16	軟體版本	R	軟體版本
0x79	121	BL_VERSION	u16	BL版本	R	BL版本
0x7F-0x82	127-130	SN	u16	產品唯一序列號	R	產品唯一序列號, 占4暫存器
0xA5	165	SET_LV	u16	自動校平	W	3: 執行一次自動調平: 如果目前俯仰角/橫滾角接近0°,0°(水平正面放置), 則自動校準到0,0. 前如果目前俯仰角/橫滾角接近0° 或 180°(水平倒放) · 則自動校準到 0°,180° 適用於機器人安裝環境。其中 · 「接近」定義為 Pitch Roll均小於15° 5: 取消自動調平 · 恢復絕對測量角度 其他值: 無效
0xA6	166	URFR	u16	安裝設定	W	0: 設定為水平安裝(預設模式) 1: 垂直安裝:Y軸正方向朝下 2: 垂直安裝:Y軸正方向朝上 3: 垂直安裝:X軸正方向朝上 4: 垂直安裝:X軸正方向朝下

4.3. 常用配置

以下所有配置示例預設Modbus地址為0x50(出廠預設), 如果Modbus ID已經被使用者修改, 則ID欄位和CRC欄位需要更改。

4.3.1. 控制暫存器說明(0x00)

命令	CTL暫存器寫入值	命令(Hex) ID=0X50(出廠預設)
儲存所有配置參數到Flash	0x0000	50 06 00 00 00 00 84 4B
恢復出廠設定	0x0001	50 06 00 00 00 01 45 8B
復位	0x00FF	50 06 00 00 00 FF C4 0B

4.3.2. 配置波特率(0x04)

配置目標波特率	指令(Hex) ID=0X50(出廠預設)
4800	50 06 00 04 00 00 C5 8A
9600	50 06 00 04 00 01 04 4A
19200	50 06 00 04 00 02 44 4B
38400	50 06 00 04 00 03 85 8B
57600	50 06 00 04 00 04 C4 49
115200	50 06 00 04 00 05 05 89
230400	50 06 00 04 00 06 45 88
460800	50 06 00 04 00 07 84 48
921600	50 06 00 04 00 08 C4 4C

4.3.3. 配置節點ID(0x05)

[CUR_ID] 06 00 05 00 [NEW_ID] CRC(2位元組)

- CUR_ID: 目前裝置Modbus ID.
- NEW_ID: 新(要設定的)ID號

示例(目前ID=0x50) :

- 設定NEW_ID為0x50: 50 06 00 05 00 50 94 76
- 設定NEW_ID為0x51: 50 06 00 05 00 51 55 B6
- 設定NEW_ID為0x52: 50 06 00 05 00 52 15 B7
- 設定NEW_ID為0x53: 50 06 00 05 00 53 D4 77

注意: 修改成功後Modbus地址會立即生效, 需要修改Modbus的發送CUR_ID欄位, 如果沒有Modbus協議基礎, 建議使用上位機操作。

4.3.4. 設定安裝方式 (0xA6)

配置目標安裝方式	指令(Hex) ID=0X50(出廠預設)
0: 設定為水平安裝(預設模式)	50 06 00 A6 00 00 64 68
1: 垂直安裝:y軸正方向朝下	50 06 00 A6 00 01 A5 A8
2: 垂直安裝:y軸正方向朝上	50 06 00 A6 00 02 E5 A9
3: 垂直安裝:x軸正方向朝上	50 06 00 A6 00 03 24 69
4: 垂直安裝:x軸正方向朝下	50 06 00 A6 00 04 65 AB

4.3.5. 設定水平校準(0xA5)

- 啟動自動水平校平: 50 06 00 A5 00 02 15 A9
- 取消自動水平校平: 50 06 00 A5 00 05 54 6B

4.3.6. 設定6軸或9軸模式(0x06)

- 設定為6軸模式: 50 06 00 06 00 00 64 4A
- 設定為9軸模式: 50 06 00 06 00 01 A5 8A

4.4. 讀取模組版本資訊(0x70-0x82)

讀取模組產品名, 軟體版本及SN號:

請求幀 50 03 00 70 00 14 49 9F

欄位	值	說明
裝置地址	0x50	模組地址
功能碼	0x03	讀保持暫存器
起始地址	0x0070	產品資訊起始地址
讀取長度	0x0014	讀取20個暫存器
CRC校驗	0x9F49	-

響應幀: 50 03 28 48 49 31 34 52 32 4E 2D 34 38 35 2D 30 30 00 00 98 00 6B 00 00 00 00 00 00 00 00 04 7D 95 5F 8D 2A 17 08 00 00 4D 0C

欄位	數據	說明
產品名	48 49...30 30	CH10x(M)
軟體版本	0x98	V1.52
引導版本	0x6B	V1.07
序列號	047D955F8D2A1708	SN碼

4.5. 讀取感測器數據(0x34-0x4B)

請求幀 50 03 00 34 00 18 09 8F

欄位	值	說明
裝置地址	0x50	模組地址
功能碼	0x03	讀保持暫存器
起始地址	0x0034	感測器數據起始地址
讀取長度	0x0018	讀取24個暫存器
CRC校驗	0x8F09	-

響應幀: 50 03 30 FF 01 03 B0 06 50 FC C9 FF 7C 00 91 01 D5 FD DB FD 27 00 00 21 FF 00 00 7F F6 FF FD 73 E7 00 00 00 00 00 10 A6 0D 59 DD 4E 86 A8 06 30 17 82 1E CE

加速度(單位:G, 可取9.8m/s²):

軸向	暫存器值(HEX)	原始值(DEC)	比例因子	計算得出物理值
X	FF 01	-255	0.00048828	-0.1245
Y	03 B0	944	0.00048828	0.4609
Z	06 50	1616	0.00048828	0.7891

角速度(單位: deg/s)

軸向	暫存器值(HEX)	原始值(DEC)	比例因子	計算得出物理值
X	FC C9	-823	0.061035	-50.2318
Y	FF 7C	-132	0.061035	-8.0566
Z	00 91	145	0.061035	8.8501

磁場(單位: uT)

軸向	暫存器值(HEX)	原始值(DEC)	比例因子	計算得出物理值
X	01 D5	469	0.030517	14.3125
Y	FD DB	-549	0.030517	-16.7538
Z	FD 27	-729	0.030517	-22.2469

歐拉角(單位: deg)

軸向	暫存器值(HEX)	原始值(DEC)	比例因子	計算得出物理值
橫滾(Roll)	00 00 21 FF	8703	0.001	8.703
俯仰角(Pitch)	00 00 7F F6	32758	0.001	32.758
航向角(Yaw)	FF FD 73 E7	-166937	0.001	-166.937

5. CAN數據協議(CANopen)

CAN介面符合CANopen協議，所有通訊均使用標準數據幀，使用TPDO1-7 傳輸數據。不接收/發送遠端幀和拓展數據幀，所有TPDO採用非同步定時觸發模式。

5.1. CANopen 預設設定

預設配置	值
CAN 波特率	500 kbit/s
節點ID	8
初始化狀態	Operational
TPDO輸出速率	1Hz - 200Hz(每個TPDO)

5.2. CANopen TPDO

通道	幀ID	數據長度 (DLC)	傳輸方式	輸出頻率 (Hz)	數據	說明
TPDO1	0x180+ID	6	非同步定時 (0xFE)	100	加速度	型別:int16 低位元組在前，每個軸2位元組，共6位元組分別為X,Y,Z軸加速度，單位為mG(0.001G)
TPDO2	0x280+ID	6	非同步定時 (0xFE)	100	角速度	型別:int16 低位元組在前，每個軸2位元組，共6位元組分別為X,Y,Z軸角速度，單位為0.1dps(°/s)
TPDO3	0x380+ID	6	非同步定時 (0xFE)	100	歐拉角	型別:int16 低位元組在前，每個軸2位元組，共6位元組順序分別為 橫滾角:Roll, 俯仰角:Pitch, 航向角:Yaw。單位為0.01°
TPDO4	0x480+ID	8	非同步定時 (0xFE)	100	四元數	型別:int16 低位元組在前,每個元素2位元組，共8位元組分別為 q_w q_x q_y q_z 。單位四元數擴大10000倍後結果。如四元數為1,0,0,0時，輸出10000,0,0,0.
TPDO6	0x680+ID	4	非同步定時 (0xFE)	20	氣壓	型別:int32 共4位元組。單位Pa
TPDO7	0x780+ID	8	非同步定時 (0xFE)	100	傾角儀角度	型別:int32 低位元組在前，每個軸4位元組，共8位元組順序分別為 X軸，Y軸。單位為0.01°

以加速度和角速度為例解析數據

加速度CAN幀：ID=0x188 · DATA = 4A 00 1F 00 C8 03

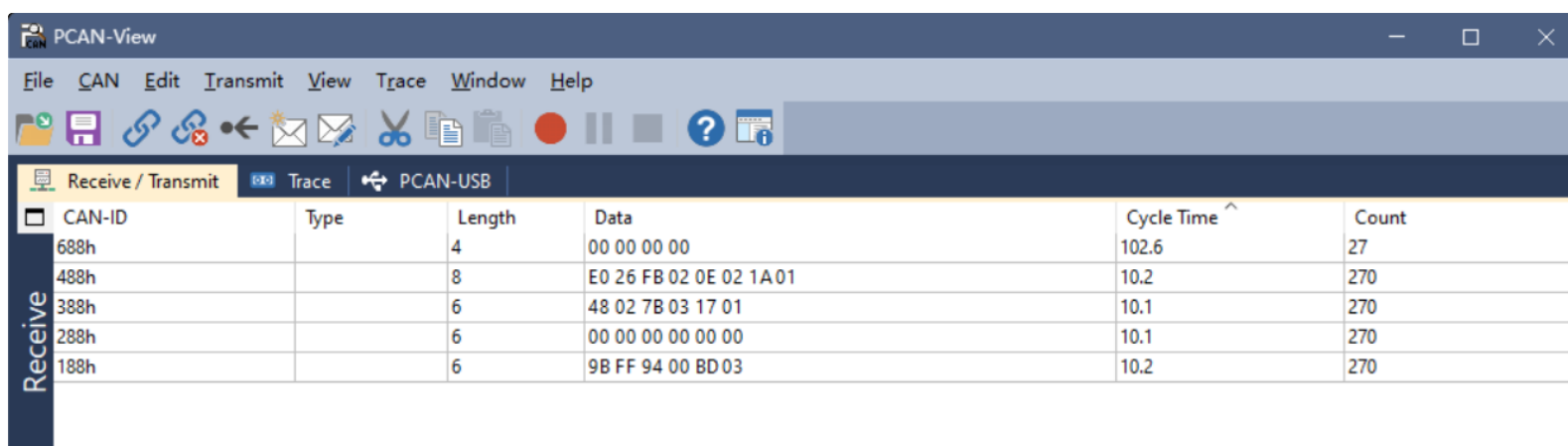
- ID=0x188: ID為8的裝置發送的加速度數據幀
- 加速度X軸 = 0x004A = 74 = 74mG
- 加速度Y軸 = 0x001F = 731 = 31mG
- 加速度Z軸 = 0x03C8 = 968 = 968mG

角速度CAN幀：ID=0x288 · DATA = 15 00 14 01 34 00

- ID=0x288: ID為8的裝置發送的角速度數據幀
- 角速度X軸 = 0x0015 = 21 = 2.1dps
- 角速度Y軸 = 0x0114 = 276 = 27.6dps
- 角速度Z軸 = 0x0034 = 52 = 5.2dps

5.3. 使用上位機連線CAN裝置

使用PCAN-View工具，配合PCAN，可以在接收框(Rx Message)中顯示收到的CAN訊息及幀率，如下圖所示：



5.4. 配置指令(SDO協議)

所有配置指令均採用快速SDO配置。所有配置更改後需要發送儲存配置指令才能儲存到Flash

5.4.1. SDO(Service Data Object)協議

快速SDO格式:

主機發送SDO命令到從機:

CAN_ID	CS命令符(1B)	數據字典索引(2B)	子索引(1B)	數據(4B)
0x600+ID	0x23(寫4B)	低位在前	子索引	數據·低位在前

從機回覆SDO命令到主機:

CAN_ID	SDO命令(1B)	數據字典索引(2B)	子索引(1B)	數據(4B)
0x580+ID	0x60(寫成功應答)	低位在前	子索引	保留

修改節點ID (0x20A0)

ID=0x608 · DATA=23,A0,20,00,[ID],00,00,00, ID修改範圍：1-127 · 修改後需要儲存配置到Flash且復位(或重新上電生效)。

儲存配置到Flash(0x2000)

ID=0x608 · DATA=23,00,20,00,00,00,00,00

復位(0x2000)

ID=0x608 · DATA=23,00,20,00,FF,00,00,00

恢復出廠設定(0x2000)

ID=0x608 · DATA=23 00 20 00 01 00 00 00 恢復出廠設定 · 將所有參數包括波特率 · 節點ID等恢復至出廠值 · 重新上電生效, 謹慎使用。

修改CAN波特率(0x209A)

ID=0x608 · DATA=23,9A,20,00,[ID] · 修改後需要儲存配置到Flash且復位(或重新上電)生效。

- CAN波特率修改為1000 kbit/s: ID=0x608 · DATA=23,9A,20,00,00,00,00,00
- CAN波特率修改為500kbit/s: ID=0x608 · DATA=23,9A,20,00,02,00,00,00
- CAN波特率修改為250kbit/s: ID=0x608 · DATA=23,9A,20,00,03,00,00,00
- CAN波特率修改為125kbit/s: ID=0x608 · DATA=23,9A,20,00,04,00,00,00

以下配置操作均使用快速SDO來寫數據字典, 其中TPDO通道與其對應的參數索引為：

通道	幀ID	參數索引地址	說明
TPDO1	0x180+ID	0x1800	加速度
TPDO2	0x280+ID	0x1801	角速度
TPDO3	0x380+ID	0x1802	歐拉角
TPDO4	0x480+ID	0x1803	四元數
TPDO6	0x680+ID	0x1804	氣壓
TPDO7	0x780+ID	0x1805	傾角儀輸出

修改/關閉/開啟數據輸出速率(0x1800-0x1805)

此項配置立即生效

- ID=0x608 · DATA=2B,00,18,05,00,00,00,00 關閉加速度輸出(1800.5=0)
- ID=0x608 · DATA=2B,00,18,05,05,00,00,00 加速度200Hz輸出(1800.5=5)
- ID=0x608 · DATA=2B,00,18,05,0A,00,00,00 加速度100Hz輸出(1800.5=10)
- ID=0x608 · DATA=2B,00,18,05,14,00,00,00 加速度50Hz輸出(1800.5=20)
- ID=0x608 · DATA=2B,00,18,05,32,00,00,00 加速度20Hz輸出(1800.5=50)
- ID=0x608 · DATA=2B,00,18,05,64,00,00,00 加速度10Hz輸出(1800.5=100)
- ID=0x608 · DATA=2B,01,18,05,00,00,00,00 關閉角速度輸出(1801.5=0)
- ID=0x608 · DATA=2B,01,18,05,05,00,00,00 角速度200Hz輸出(1801.5=5)
- ID=0x608 · DATA=2B,01,18,05,0A,00,00,00 角速度100Hz輸出(1801.5=10)
- ID=0x608 · DATA=2B,01,18,05,14,00,00,00 角速度50Hz輸出(1801.5=20)
- ID=0x608 · DATA=2B,01,18,05,32,00,00,00 角速度20Hz輸出(1801.5=50)
- ID=0x608 · DATA=2B,01,18,05,64,00,00,00 角速度10Hz輸出(1801.5=100)
- ID=0x608 · DATA=2B,02,18,05,00,00,00,00 關閉歐拉角輸出(1802.5=0)
- ID=0x608 · DATA=2B,02,18,05,05,00,00,00 歐拉角200Hz輸出(1802.5=5)
- ID=0x608 · DATA=2B,02,18,05,0A,00,00,00 歐拉角100Hz輸出(1802.5=10)
- ID=0x608 · DATA=2B,02,18,05,14,00,00,00 歐拉角50Hz輸出(1802.5=20)
- ID=0x608 · DATA=2B,02,18,05,32,00,00,00 歐拉角20Hz輸出(1802.5=50)
- ID=0x608 · DATA=2B,02,18,05,64,00,00,00 歐拉角10Hz輸出(1802.5=100)
- ID=0x608 · DATA=2B,03,18,05,00,00,00,00 關閉四元數輸出(1803.5=0)
- ID=0x608 · DATA=2B,03,18,05,05,00,00,00 四元數200Hz輸出(1803.5=5)
- ID=0x608 · DATA=2B,03,18,05,0A,00,00,00 四元數100Hz輸出(1803.5=10)
- ID=0x608 · DATA=2B,03,18,05,14,00,00,00 四元數50Hz輸出(1803.5=20)
- ID=0x608 · DATA=2B,03,18,05,32,00,00,00 四元數20Hz輸出(1803.5=50)
- ID=0x608 · DATA=2B,03,18,05,64,00,00,00 四元數10Hz輸出(1803.5=100)
- ID=0x608 · DATA=2B,04,18,05,00,00,00,00 關閉氣壓輸出(1804.5=0)
- ID=0x608 · DATA=2B,04,18,05,05,00,00,00 氣壓200Hz輸出(1804.5=5)
- ID=0x608 · DATA=2B,04,18,05,0A,00,00,00 氣壓100Hz輸出(1804.5=10)
- ID=0x608 · DATA=2B,04,18,05,14,00,00,00 氣壓50Hz輸出(1804.5=20)
- ID=0x608 · DATA=2B,04,18,05,32,00,00,00 氣壓20Hz輸出(1804.5=50)
- ID=0x608 · DATA=2B,04,18,05,64,00,00,00 氣壓10Hz輸出(1804.5=100)

以 TPDO1(加速度)輸出速率為100Hz(每10ms輸出一次)為例：0x23為SDO寫四個位元組指令。0x00, 0x18為寫0x1800索引。0x05為子索引。0x00, 0x0A=(0x00<<8) + 0x0A = 10(單位為ms) · 後面不足補0。

設定傾角儀輸出正負號(0x209E)

- ID=0x608 · DATA=23,9E,20,00,00,00,00,00 X軸正負號為出廠預設方向
- ID=0x608 · DATA=23,9E,20,00,01,00,00,00 X軸正負號反向
- ID=0x608 · DATA=23,9F,20,00,00,00,00,00 Y軸正負號為出廠預設方向
- ID=0x608 · DATA=23,9F,20,00,01,00,00,00 Y軸正負號反向

設定傾角儀零點(0x20A5)

- ID=0x608 · DATA=23,A5,20,00,02,00,00,00 寫入後即設定目前位置為輸出零點(X=0,Y=0)
- ID=0x608 · DATA=23,A5,20,00,05,00,00,00 寫入後取消零點配置 · 輸出真實的X · Y角度(相當於X,Y offset=0)

5.4.2. 同步協議

遵循CANopen協議 · 模組可以將各個TPDO設定為同步模式 · 即停止非同步定時發送 · 而等待CANopen同步幀 · 當同步幀到來時 · 發送一幀TPDO數據。

配置TPDO為同步模式

將想設定為同步模式的TPDO配置為同步模式 · 通過TPDO通訊參數字典[0x180x.2] (Transmission type)設定為0x01同步模式即可 · 具體意義請檢視CANopen協議 · 以TPDO1(加速度資訊)為例:

ID=0x608 · DATA=2F,00,18,02,01,00,00,00 寫入[0x1800.2(US8型別)]=1, 設定TPDO1 通訊模式為同步模式

ID=0x608 · DATA=2F,00,18,02,FF,00,00,00 寫入[0x1800.2(US8型別)]=0xFF, 設定TPDO1 通訊模式為非同步通訊模式(出廠預設)

發送CANopen同步幀

發送CANopen同步幀 · CANopen 同步幀: ID:80 · DATA:空, 模組接收到同步幀後 · 所有配置為同步模式的TPDO會發送一幀數據 · 實現同步.

設定心跳包

心跳協議通過寫入[0x1017.0(US16)]設定,有效範圍0-65535,單位ms. 0表示禁用心跳包.

ID=0x608 · DATA=2B,17,10,00,64,00,00,00 設定心跳包週期為100ms.

6. CAN數據協議(J1939)

模組預設輸出協議為CANOpen, 如需SAE J1939協議, 請聯繫我司。

PGN	描述
通訊模式	廣播通訊
預設傳輸時間間隔	100ms
數據長度	每個PGN 8 位元組
PF(PDU format)	0xFF
PS(PDU specific)	PF > 0xF0時為拓展PGN地址(GE) · 否則為目的地址(DA)
優先順序	3
預設J1939地址	0x08
數據格式	所有幀中數據格式採用LSB(低位在前),無特殊說明均為有符號整型

6.1. PGN訊息列表

6.1.1. PGN65327(FF2F) 時間資訊

CANID=0x0CFF2F08

SPN 名稱	SPN 位置(byte)	說明
UTC年	0	20代表2020,以此類推, 如無法獲得UTC時間則此位為20
UTC月	1	如無法獲得UTC月份則此位為0
UTC日	2	如無法獲得UTC日期則此位為0
UTC時	3	
UTC分	4	
UTC秒	5	
UTC毫秒	6-7	單位:ms, 比例因子:1

6.1.2. PGN65332(FF34) 加速度

CANID=0x0CFF3408

名稱	位置(byte)	說明
加速度X	0-1	單位G(1G=1重力加速度), 比例因子:0.00048828
加速度Y	2-3	單位G(1G=1重力加速度), 比例因子:0.00048828
加速度Z	4-5	單位G(1G=1重力加速度), 比例因子:0.00048828
保留	6-7	-

6.1.3. PGN65335(FF37) 角速度

CANID=0x0CFF3708

名稱	位置(byte)	說明
角速度X	0-1	單位deg/s, 比例因子:0.061035
角速度Y	2-3	單位deg/s, 比例因子:0.061035
角速度Z	4-5	單位deg/s, 比例因子:0.061035
保留	6-7	

6.1.4. PGN65341(FF3D) 俯仰橫滾角

CANID=0x0CFF3D08

SPN 名稱	SPN 位置(byte)	說明
橫滾角(Roll)	0-3	單位°, 比例因子:0.001
俯仰角(Pitch)	4-7	單位°, 比例因子:0.001

6.1.5. PGN65345(FF41) 航向角

CANID=0x0CFF4108

SPN 名稱	SPN 位置(byte)	說明
航向角(Yaw)	0-3	0-360, 單位°, 比例因子:0.001, 順時針為正
保留	4-7	

6.1.6. PGN65354(FF4A) 傾角儀輸出

CANID=0x0CFF4A08 (只適用於輸出J1939協議的傾角儀產品)

名稱	位置(byte)	說明
X傾角角度	0-3	範圍0-360或 ±180, 單位:deg, 比例因子:0.001
Y傾角角度	4-7	範圍0-360或 ±90, 單位:deg, 比例因子:0.001

6.2. 配置指令

6.2.1. 配置格式

主機發送: ADDR+ CMD + STATUS + VAL, 從機響應: ADDR+ CMD + STATUS + VAL

欄位	大小(Byte)	說明
ADDR	2	暫存器地址
CMD	1	0x06:寫入, 0x03:讀取
STATUS	1	保留
VAL	4	寫入: 寫入的值 · 讀取: 保留

6.2.2. 配置模組

29'b 拓展幀地址	數據	描述	說明
0x0CEF08xx	34 01 06 00 [VAL]	VAL: 4位元組	PGN:FF34(加速度) 發送間隔 · 單位ms, 範圍:5 -1000
0x0CEF08xx	37 01 06 00 [VAL]	VAL: 4位元組	PGN:FF37(角速度) 發送間隔 · 單位ms, 範圍:5 -1000
0x0CEF08xx	3D 01 06 00 [VAL]	VAL: 4位元組	PGN:FF3D(俯仰橫滾) 發送間隔 · 單位ms, 範圍:5-1000
0x0CEF08xx	41 01 06 00 [VAL]	VAL: 4位元組	PGN:FF41(航向角) 發送間隔 · 單位ms, 範圍:5 -1000
0x0CEF08xx	4A 01 60 00 [VAL]	VAL: 4位元組	PGN:FF4A(傾角儀輸出) 發送間隔 · 單位ms, 範圍:5 -1000
0x0CEF08xx	9D 00 06 00 01 00 00 00	-	全域性使能節點數據輸出
0x0CEF08xx	9D 00 06 00 00 00 00 00	-	全域性關閉節點數據輸出(預設)
0x0CEF08xx	00 00 06 00 00 00 00 00	-	儲存所有配置參數到Flash
0x0CEF08xx	00 00 06 00 01 00 00 00	-	恢復出廠設定
0x0CEF08xx	00 00 06 00 FF 00 00 00	-	復位
0x0CEF08xx	9A 00 06 00 [VAL]	VAL: 4位元組	配置波特率(儲存設定 · 復位生效): 0:1000K, 1:800K, 2:500K, 3:250K, 4:125K
0x0CEF08xx	9C 00 06 00 [VAL]	VAL: 4位元組	設定J1939 節點ID: 1-128
0x0CEF08xx	A5 00 06 00 [VAL]	VAL: 4位元組	設定零位, 0x02:設定目前位置為零位 · 0x05 : 取消零位設定 · 輸出絕對物理角度
0x0CEF08xx	9E 00 06 00 [VAL]	VAL: 4位元組	設定X軸正負方向, 0:預設 1:反向
0x0CEF08xx	9F 00 06 00 [VAL]	VAL: 4位元組	設定Y軸正負方向, 0:預設 1:反向

地址域中xx: J1939協議中的源地址 · 可為任意位元組。

數據域中xx: 任意位元組

例: ID=0x0CEF0855, DATA = 37 01 06 00 64 00 00 00 : 將PGN:FF37設定為100ms週期(10Hz)

7. CAN數據協議(NMEA2000)

定製協議, 如需NMEA2000協議, 請聯繫我司。

8. 地磁校準

8.1. 地磁校準步驟

9軸模式(磁輔助絕對航向角模式)使用的前提是:

1. 首次使用9軸模式必須至少進行一次使用者地磁校準
2. 使用過程中沒有空間磁場干擾(室內等複雜磁環境下很難做到)

只有同時達到這兩個要求, 9軸模式下航向角才能達到手冊標稱精度。

8.1.1. 使用者地磁校準

當首次使用模組並且需要使用AHRS (9軸) 模式時, 應進行如下校準操作:



1. 首先需要將模組切換到9軸模式。
2. 檢查周圍是否存在磁場干擾: 實驗室鐵質或者含有鐵質的桌子、電腦、電機、手機等旁邊都屬於常見的干擾區域。建議將模組拿到室外空曠處, 即使沒有條件拿到室外, 儘量將模組遠離干擾源(30CM以上)。
3. 在儘量小範圍內(位置儘量不動, 只旋轉模組), 緩慢的讓模組旋轉, 讓模組經歷儘量多的姿態位置(每個軸至少都旋轉360°, 持續約1分鐘), 即可完成校準。如果始終沒能成功校準模組, 說明周圍地磁場干擾比較大。
4. 如果模組安裝位置改變(比如第一次校準是拿著模組單獨去校準的, 但最後需要安裝在您的PCB或者外殼中使用)。則需要帶著PCB或者外殼一起重新校準。如果模組是放到機器人/無人機上, 則需要帶著機器人/無人機一起校準。總之, 必須將模組和被安裝體(PCB/外殼/機器人/無人機等)視作一個剛性整體去校準。
5. 檢視地磁校準結果: 輸入 LOG MAGCONFIG, 返回結果如下:

```
1 | ...
2 | MB=14.14, -2.08, -8.75
3 | OK
```

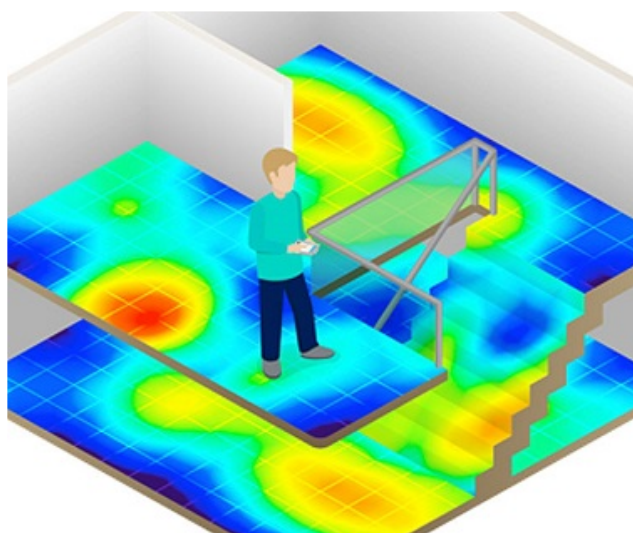
如果MAG_BIAS顯示三個值不是0,0,0。代表校準成功。

8.1.2. 空間磁場干擾

磁干擾可分為空間磁場干擾與感測器座標系下的磁場干擾, 如下圖所示

Distortions that move with the sensor	Distortions that do not move with the sensor
	
<ul style="list-style-type: none">• Calibration errors• Hard iron effects• Soft iron effects• Etc.	<ul style="list-style-type: none">• Spatial distortions• Temporal distortions• Etc.

磁干擾型別	隨感測器座標系的磁場干擾, 也稱硬磁干擾/軟磁干擾 (Distortion that move with the sensor)	空間磁場干擾(Distortion that do not move with the sensor)
特點	干擾源隨感測器運動而運動	干擾源不隨感測器運動而運動
典型干擾源	與模組固定在一起的PCB·金屬外殼·將模組固定後的無人機等等	傢俱·家用電器·線纜·房屋內的鋼筋結構等·不能隨著感測器移動而移動。還有人形機器人:本身作為一次磁性剛體磁場分佈不停變化(走動)
是否可能被校準	可以	不可能
抗干擾措施	可以通過使用者磁校準過程消除	無論如何校準·這些空間磁場的干擾(或者說環境磁場不均勻)都會使得空間地磁場發生畸變·理論上就無法獲得正確的航向角。空間磁場干擾是造成室內地磁融合難以使用的主要原因。這種干擾不能被校準, 會嚴重影響航向角誤差。空間磁場干擾在室內尤其是靠近桌椅家電等地方尤其嚴重。見下圖為一個典型的室內空間磁場干擾: 藍色為弱干擾區·紅色為強干擾區



8.1.3. 關於模組地磁校準演算法

模組內部自帶主動地磁校準系統·不需要使用者發送任何指令·該系統在後臺自動採集一段時間內地磁場數據·並做分析比較·剔除異常數據·一旦數據足夠·就會嘗試地磁校準·校準成功後·會自動將校準參數儲存到Flash。所以·當使用地磁輔助(9軸)模式時·不需要使用者任何干預即可完成地磁校準。但是模組仍然提供介面來讓使用者檢查目前校準狀態。**自動校準的前提是首次需要模組有充分的姿態變化(緩慢的讓模組經歷儘量多的姿態變化)**·內部校準系統才能蒐集不同姿態下的地磁場資訊·從而完成校準·靜止狀態下是無法進行地磁校準的。

8.2. 配置地磁校準(手動地磁校準)

預設情況下·只要配置為9軸模式·模組就會在後臺不停的嘗試估計地磁校準參數。儘管如此·本產品依然提供了關閉地磁校準的API:

- **CONFIG IMU_EN_MCAL 1** : 啟動後臺即時地磁校準(出廠預設)。
- **CONFIG IMU_EN_MCAL 0** : 關閉後臺即時地磁校準。

如果您只想手動執行一次地磁校準·而不想讓模組即時後臺嘗試地磁校準·可以按如下步驟操作:

1. 在無地磁干擾的情況下(室外)讓模組(包括與其剛性固連的載體·如機器人·無人機等)進行1-2分鐘緩慢8字運動·讓模組完成一次自動地磁校準·並使用LOG_MAGCONFIG檢查校準已經完成。
2. 輸入 **CONFIG IMU_EN_MCAL 0** 並 **SAVECONFIG** 掉電儲存該配置·此後模組無論重啟與否·後臺不再進行任何自動地磁校準嘗試。

8.3. 再次強調

在室內環境下·空間磁場干擾尤其嚴重·而且空間磁場干擾並不能通過校準來消除。在室內環境下儘管模組內建均質磁場檢測及遮蔽機制·但地磁輔助(9軸)模式航向角的準確度很大程度上取決於室內磁場畸變程度·如果室內磁場環境很差(如電腦機房旁·實驗室·車間·地下車庫等)·即使校準後航向角精度可能還不如6軸模式甚至會出現大角度誤差。

模組的自動地磁校準系統只能處理和模組安裝在一起的·固定的磁場干擾。安裝環境如果有磁場干擾·這種干擾必須是固定的·並且這個干擾磁場與模組安裝之後不會再發生距離變化(例: 模組安裝在一個導磁剛體(機器人/機械裝置/車輛/船舶/三腳架/PCB板等)之上·以機器人為例: 因為機器人金屬材料會有磁場干擾·這時就需要把機器人與模組一起旋轉校準·並且模組在使用當中是不會和機器人再分開的(發生相對位移)·一旦分開是需要重新校準。

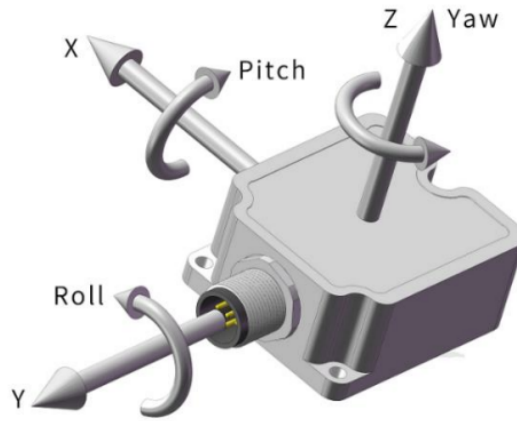
9. 附錄1 四元數/歐拉角/旋轉矩陣互轉

9.1. 四元數轉旋轉矩陣

給定四元數 $[Q_{b2n} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T]$ ，方向餘弦矩陣為：

$$C_{b2n} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

9.2. 四元數轉歐拉角 - 東北天(ENU)-312(先轉Z,然後X軸,最後Y軸)旋轉順序下的歐拉角



給定四元數 $Q_{b2n} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ ，其中 q_0 為標量部分， $[q_1, q_2, q_3]$ 為向量部分。 Q_{b2n} 代表b繫到n系的座標旋轉四元數：其中：

- pitch(θ)：繞X軸的旋轉角度，範圍 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$
- roll(ϕ)：繞Y軸的旋轉角度，範圍 $[-\pi, \pi]$
- yaw(ψ)：繞Z軸的旋轉角度，範圍 $[-\pi, \pi]$

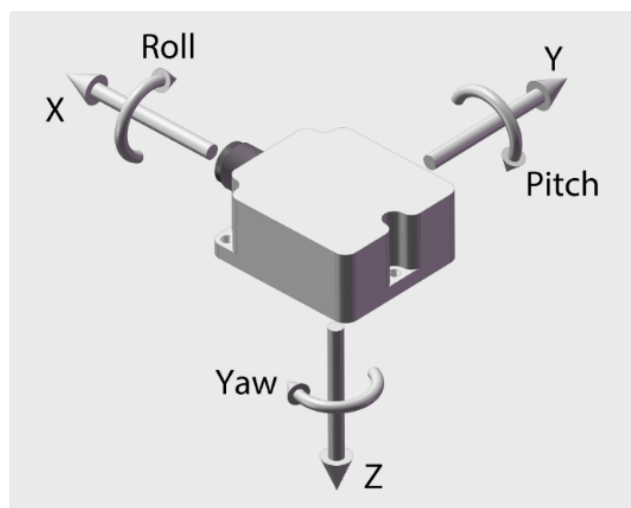
四元數轉歐拉角：

$$\begin{aligned} pitch &= \arcsin(2(q_0q_1 + q_2q_3)) \\ roll &= -\arctan 2(2(q_1q_3 - q_0q_2), q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \\ yaw &= -\arctan 2(2(q_1q_2 - q_0q_3), q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2) \end{aligned}$$

歐拉角轉四元數：

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{pitch}{2}) \cos(\frac{roll}{2}) \cos(\frac{yaw}{2}) - \sin(\frac{pitch}{2}) \sin(\frac{roll}{2}) \sin(\frac{yaw}{2}) \\ \cos(\frac{roll}{2}) \cos(\frac{yaw}{2}) \sin(\frac{pitch}{2}) - \cos(\frac{pitch}{2}) \sin(\frac{roll}{2}) \sin(\frac{yaw}{2}) \\ \cos(\frac{pitch}{2}) \cos(\frac{yaw}{2}) \sin(\frac{roll}{2}) + \cos(\frac{roll}{2}) \sin(\frac{pitch}{2}) \sin(\frac{yaw}{2}) \\ \cos(\frac{pitch}{2}) \cos(\frac{roll}{2}) \sin(\frac{yaw}{2}) + \sin(\frac{pitch}{2}) \sin(\frac{roll}{2}) \cos(\frac{yaw}{2}) \end{bmatrix}$$

9.3. 四元數轉歐拉角 - 北東地(NED)-321(先轉Z軸,然後Y軸,最後X軸)旋轉順序下的歐拉角



給定四元數 $Q_{b2n} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ ，其中 q_0 為標量部分， $[q_1, q_2, q_3]$ 為向量部分。 Q_{b2n} 代表b繫到n系的座標旋轉四元數：其中：

- pitch(θ) : 繞Y軸的旋轉角度 · 範圍 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$
- roll(ϕ) : 繞X軸的旋轉角度 · 範圍 $[-\pi, \pi]$
- yaw(ψ) : 繞Z軸的旋轉角度 · 範圍 $[-\pi, \pi]$

四元數轉歐拉角：

$$\begin{aligned} roll &= \arctan 2(2(q_0q_1 + q_2q_3), 1 - 2(q_1^2 + q_2^2)) \\ pitch &= \arcsin(2(q_0q_2 - q_1q_3)) \\ yaw &= \arctan 2(2(q_0q_3 + q_1q_2), 1 - 2(q_2^2 + q_3^2)) \end{aligned}$$

歐拉角轉四元數：

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{roll}{2}) \cos(\frac{pitch}{2}) \cos(\frac{yaw}{2}) + \sin(\frac{roll}{2}) \sin(\frac{pitch}{2}) \sin(\frac{yaw}{2}) \\ \sin(\frac{roll}{2}) \cos(\frac{pitch}{2}) \cos(\frac{yaw}{2}) - \cos(\frac{roll}{2}) \sin(\frac{pitch}{2}) \sin(\frac{yaw}{2}) \\ \cos(\frac{roll}{2}) \sin(\frac{pitch}{2}) \cos(\frac{yaw}{2}) + \sin(\frac{roll}{2}) \cos(\frac{pitch}{2}) \sin(\frac{yaw}{2}) \\ \cos(\frac{roll}{2}) \cos(\frac{pitch}{2}) \sin(\frac{yaw}{2}) - \sin(\frac{roll}{2}) \sin(\frac{pitch}{2}) \cos(\frac{yaw}{2}) \end{bmatrix}$$