

Supervisor

Febbraio 2026

Contents

1	Introduzione work-project	4
1.1	Architettura Hardware e Comunicazione	4
1.2	Dinamica di Movimento e Controllo	5
1.3	Sicurezza e Gestione degli Ostacoli	5
1.4	Resilienza e Modalità Degradata	6
2	Sensoristica del sistema	7
2.1	Sensori Board 1	7
2.2	Sensori Board 2	7
3	Condizioni di funzionamento	8
3.1	Condizioni di funzionamento nominale	8
	Rilevamento ostacoli	8
3.2	Condizioni di funzionamento critico o degradato	9
	Meccanismo di rilevazione dei guasti	9
	Encoder non funzionanti	10
	Coerenza di movimento del rover	11
	Board 2 non riceve	11
	Board 1 non riceve	12
4	Funzionamento generale del software di ciascuna board	14
4.1	Interazione tra Task e Meccanismo di Snapshot	14
4.2	Funzionamento task di Board 2	16
4.2.1	Task: acquisizione distanza dagli ostacoli	16
	Utilizzo DMA per la lettura dei segnali	17
4.2.2	Task: lettura comandi utente	20
4.2.3	Task: lettura giroscopio	21
4.2.4	Interfacciamento DualSense PS5 tramite ESP32	22
4.2.5	Task: supervisore Board 2	26
4.2.6	Task: log dei dati per il debug	30
4.3	Funzionamento task di Board 1	31
4.3.1	Task: lettura batteria e temperatura	31
4.3.2	Task: supervisore Board 1	33
4.3.3	Task: controllo motori	36
4.3.4	Task: log dei dati per il debug	36
4.3.5	Task: led	37
4.4	Task di trasmissione e ricezione tra le due Board	38

5	Supervisore Board 1	40
5.1	Panoramica generale	40
5.2	Input	41
5.3	Output	42
5.4	Rilevazione Faults	44
5.5	Decidere di far comandare la Board2	48
5.6	Costruzione maschere degradate e critiche	50
5.7	Calcolo riferimenti	51
6	Supervisore Board 2	54
6.1	Panoramica generale	54
6.2	Input	55
6.3	Output	56
6.4	Rilevazione Faults	57
6.5	Costruzione maschere degradate e critiche	61
6.6	Decidere se attuare	62
6.7	Rilevamento ostacoli	62
	6.7.1 Gestione ostacoli con sistema in stato <i>non degradato</i> .	63
	6.7.2 Gestione ostacoli con sistema in stato <i>degradato</i>	67
6.8	Attuazione	67

1 Introduzione work-project

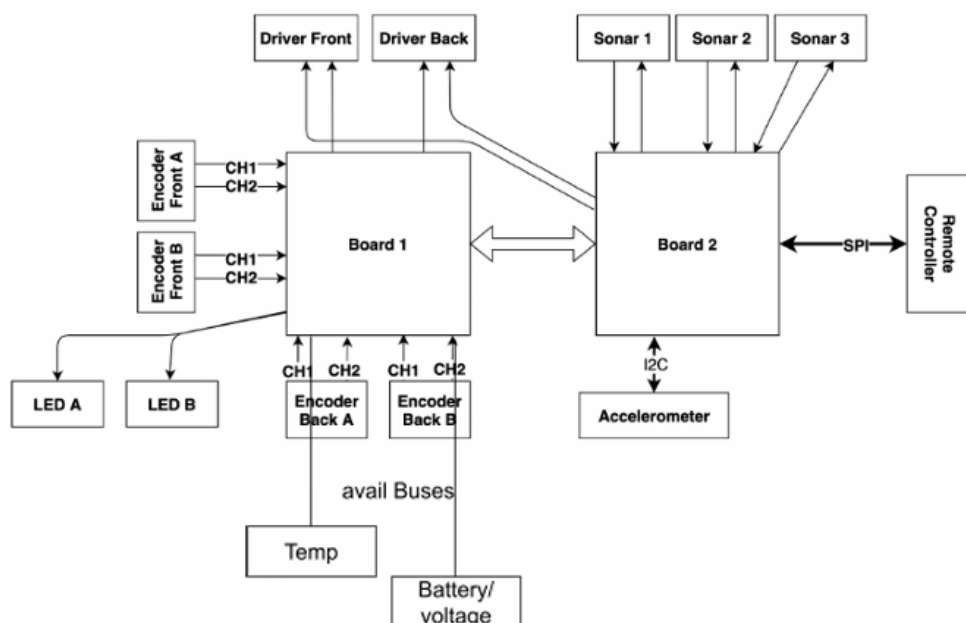


Figure 1: Architettura generale del rover distribuita su doppia board

Il presente progetto riguarda la progettazione e l'implementazione di un **sistema di controllo e supervisione distribuito** per un rover caratterizzato da un'architettura ad alta affidabilità. L'obiettivo principale è lo sviluppo di un veicolo capace di muoversi in modo coordinato, reagire prontamente agli stimoli ambientali rilevati tramite sensoristica avanzata e gestire scenari di guasto attraverso logiche di ridondanza e modalità di funzionamento degradate.

1.1 Architettura Hardware e Comunicazione

Il cuore del sistema è costituito da un'architettura a **doppia scheda** (Board 1 e Board 2), basata su microcontrollori STM32. Questa configurazione implementa il concetto di **diversità di livello 2**, dove le due board collaborano per la ricostruzione dello stato globale del sistema pur operando su partizioni di dati e algoritmi distinti.

- La Board 1 gestisce l'interfacciamento con i driver dei motori (Front e Back), gli encoder di posizione e i LED di segnalazione.
- La Board 2 è dedicata alla sensoristica ambientale, interfacciandosi con tre sensori Sonar, un accelerometro tramite protocollo I^2C e il sistema di controllo remoto, che avviene tramite l'utilizzo di un joystick che invia dati a una scheda ESP32 tramite protocollo BLE.

1.2 Dinamica di Movimento e Controllo

Il rover deve garantire una movimentazione precisa sincronizzando i quattro motori per procedere in linea retta o ruotare attorno al proprio baricentro.

- **Controllo PID:** La velocità richiesta dal controller viene gestita tramite un algoritmo PID software per definire le dinamiche di raggiungimento del target e di frenata.

1.3 Sicurezza e Gestione degli Ostacoli

Il sistema di supervisione utilizza i dati provenienti dai sensori ad ultrasuoni per garantire l'integrità del veicolo:

- **Rilevamento Preventivo:** Identificazione di ostacoli fino a 3 metri di distanza con un angolo di copertura di 45° .
- **Manovre di Emergenza:** In caso di ostacoli improvvisi a meno di 70 cm, il rover esegue una frenata d'emergenza seguita da una rotazione verso un lato libero.
- **Evitamento Dinamico:** Capacità di evitare ostacoli in movimento tra 0.7 e 1,5 metri sterzando senza interrompere la marcia.

1.4 Resilienza e Modalità Degradata

Una specifica fondamentale del progetto è la capacità di operare in presenza di malfunzionamenti. Il sistema monitora costantemente lo stato delle board, dei motori, della batteria e della temperatura interna. In caso di determinati fallimenti, il rover entra in **Modalità Degradata** o in **Emergency Stop**.

2 Sensoristica del sistema

2.1 Sensori Board 1

La Board 1 è responsabile del loop di controllo dei motori, della gestione dei led presenti sul rover e del monitoraggio della batteria e della temperatura interna del rover (Board Health). I sensori e gli attuatori gestiti direttamente da questa board includono:

- **Encoder incrementali:** Quattro encoder (Front/Back, SX/DX) per il feedback sulla velocità reale delle ruote.
- **Driver Motori:** Due driver sabertooth 2x12, uno che si occupa di controllare le ruote anteriori e un altro che si occupa del controllo delle ruote posteriori. Entrambi i driver sono configurati in modalità Serial Packetized.
- **Sensore di Tensione e Temperatura:** Sensori per il monitoraggio dello stato della batteria e della temperatura.
- **LED di stato:** Due indicatori luminosi (LED A e LED B) per il feedback visivo immediato (es. stato di emergenza).

2.2 Sensori Board 2

La Board 2 funge da interfaccia di input del Rover. Il suo compito principale è raccogliere i dati dall'ambiente esterno e dai comandi dell'operatore, elaborarli e trasmetterli alla Board 1 per l'attuazione fisica. I componenti e i sensori gestiti da questa board sono:

- **Modulo BLE (Bluetooth Low Energy):** Per la ricezione dei pacchetti dati dal controller remoto (Direzione, Velocità, Modalità).
- **IMU (Inertial Measurement Unit):** Accelerometro e giroscopio per il monitoraggio dell'assetto e della stabilità del Rover.
- **Sonar (Ultrasuoni):** Tre sensori posizionati strategicamente per la navigazione ed il superamento degli ostacoli fino a 3 metri di distanza.

3 Condizioni di funzionamento

Il rover è dotato di due schede di controllo, denominate Board 1 e Board 2, che collaborano per garantire il funzionamento del sistema. In Figura 2 è mostrata l'architettura generale del sistema.

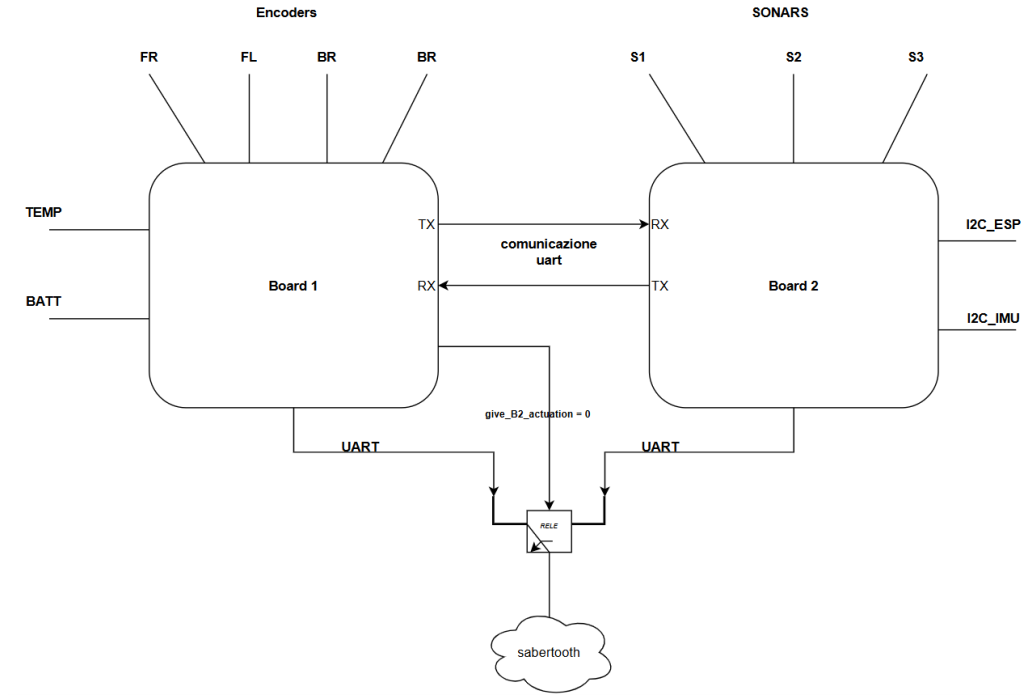


Figure 2: Architettura generale del sistema.

3.1 Condizioni di funzionamento nominale

In condizioni di funzionamento nominale la Board 1 è considerata il *Master*, occupandosi dell'attuazione dei motori, inviando tramite UART l'ingresso di controllo. La Board 2 è considerata *Slave* in quanto in condizioni nominali non comanda i motori. Questi ultimi possono raggiungere una velocità massima di $160RPM$. Il riferimento di velocità lineare o di rotazione è calcolato in base ai comandi utente inviati attraverso un joystick tramite protocollo *Bluetooth* ad un *ESP32* e ricevuti dalla Board 2 tramite protocollo *I2C*. La Board 2 quindi invia i comandi utente ricevuti alla Board 1, che si occupa di eseguirli.

Rilevamento ostacoli I riferimenti di velocità sono influenzati da condizioni di sicurezza quali la presenza di ostacoli statici o in movimento. In-

fatti, in presenza di ostacoli statici a meno di 70 cm, il supervisore di Board 2 forza un comando di *CMD_ESTOP*, mentre in presenza di ostacoli in movimento a distanza compresa tra 75 e 150 cm, il supervisore di Board 2, che si occupa di rilevare ostacoli, attiva delle procedure di deviazione o di aggiramento, come *CMD_AVOID_LEFT* o *CMD_GO_LEFT*. Essendo che in condizioni nominali Board 2 non attua, questi comandi vengono inviati dalla Board 2, tramite la comunicazione UART, alla Board 1 che si occupa di eseguirli.

3.2 Condizioni di funzionamento critico o degradato

Il ciclo di vita delle due board prevede la gestione di stati operativi *non* nominali:

- **Modalità degradata:** il sistema mantiene la funzionalità ma con velocità ridotte del 50%.
- **Modalità critica:** il sistema si ferma, interrompendo l'esecuzione dei comandi utente per motivi di sicurezza.

Meccanismo di rilevazione dei guasti Il passaggio a queste modalità avviene monitorando la frequenza di aggiornamento dei dati provenienti da sensori e periferiche. Ogni Board interroga i propri componenti e considera la lettura "corretta" solo quando la funzione software dedicata restituisce uno stato di successo. Ogni volta che viene convalidata una lettura, il sistema aggiorna un timestamp di riferimento, che rappresenta l'ultimo momento in cui i dati sono stati considerati affidabili. Invece di basarsi su un singolo ritardo isolato, il sistema calcola il periodo medio di ricezione tramite una media mobile degli ultimi 10 intervalli temporali. Questo approccio evita che piccoli ritardi casuali o singole letture perse causino inutili cambi di modalità.

Ogni Board agisce quindi in base al valore medio calcolato:

- **Soglia di allerta:** se il periodo medio di aggiornamento supera i 40 ms, il sistema passa in modalità degradata, segnalando un rallentamento eccessivo dei dati.
- **Soglia massima:** se la media degli intervalli supera i 120 ms, il guasto è considerato critico; il sistema viene bloccato per garantire la sicurezza del rover e dell'utente.

Per alcune periferiche specifiche, come gli encoder, la sola analisi temporale non è sufficiente; in questi casi viene applicata una logica di diagnostica più avanzata per verificare la validità del segnale.

Encoder non funzionanti Il rover è progettato per continuare a funzionare anche in presenza di guasti agli encoder delle ruote.

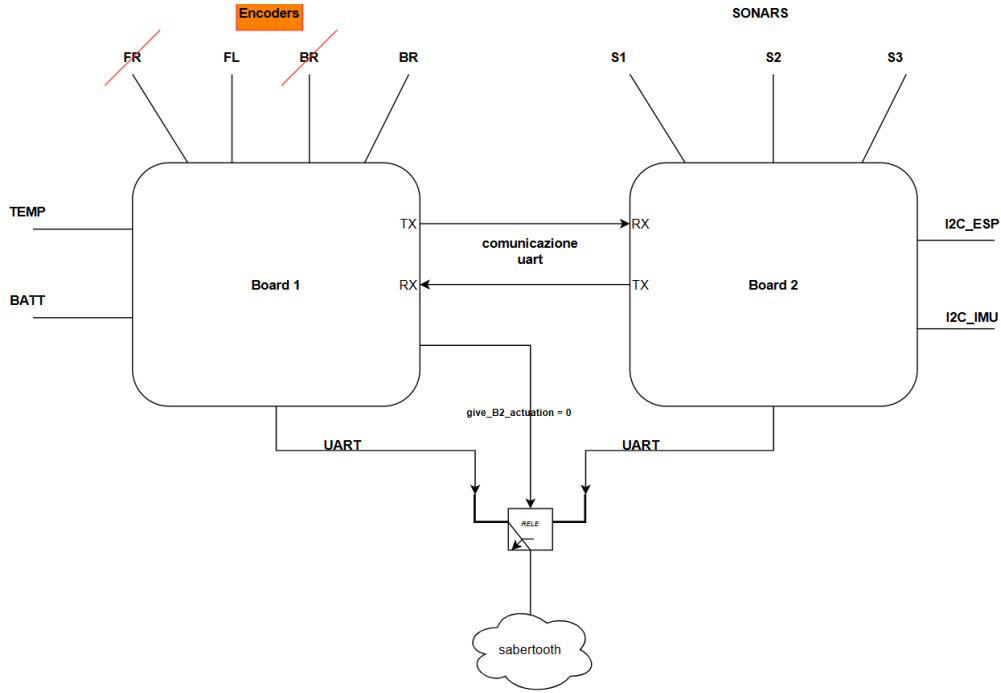


Figure 3: Logica di sostituzione in presenza di encoder non funzionanti.

Se uno o più encoder si rompono, il sistema stima la velocità mancante usando quella delle ruote sane. La logica di sostituzione è la seguente:

- *1 Fallimento:* Se si rompe l'encoder anteriore sinistro, il sistema "copia" il valore di quello posteriore sinistro.
- *2 Fallimenti:* Se si rompe un intero lato, copia i valori dall'altro lato.
- *3 Fallimenti:* Tutte le ruote assumono il valore dell'unica ruota superstite.

La rilevazione di un encoder non funzionante avviene attraverso una logica che monitora la potenza erogata al motore e la velocità rilevata dagli encoder. Se si alimenta un motore ma gli encoder non rilevano movimenti (velocità calcolata è nulla) per 20 cicli di esecuzione, si imposta la variabile *has_no_feedback(i)* associata al motore di riferimento a 1, indicando che l'encoder è considerato non funzionante e attivando la logica di sostituzione descritta sopra. In questo caso viene segnalato un guasto di tipo *Degraded* al supervisore di Board 1, che decide di limitare la potenza erogata ai motori.

In particolare si applica il 50% di potenza massima alle ruote, in modo da ridurre il rischio di slittamento o perdita di controllo dovuto alla mancanza di feedback dagli encoder.

Coerenza di movimento del rover La Board 2 monitora uno stato di coerenza tra la rotazione stimata dalla lettura della velocità dei motori (calcolata dagli encoder) e quella misurata dall'IMU. Se ci sono incoerenze, il supervisore di Board 2 imposta un flag *isMotionConsistent* a 0, indicando che il movimento del rover non è affidabile. Nel caso in cui, oltre a questa condizione di incoerenza, ci si trovi anche nella condizione di degrado di uno o più encoder e si riceva anche un segnale di incoerenza da parte dell'IMU, il supervisore di Board 1 decide di fermare il rover.

Board 2 non riceve Se la Board 2 non riceve dati dalla Board 1 per un periodo di tempo superiore a 120 ms, la Board 2 decide di inviare il comando di attuazione al rele. Tuttavia, dato che Board 1 continua a ricevere da Board 2, non cede i privilegi di attuazione, quindi Board 2 si limita ad inviare comandi di attuazione in open loop, basandosi esclusivamente sui comandi utente ricevuti e sui dati dei sensori, ma senza effettivamente attuare.

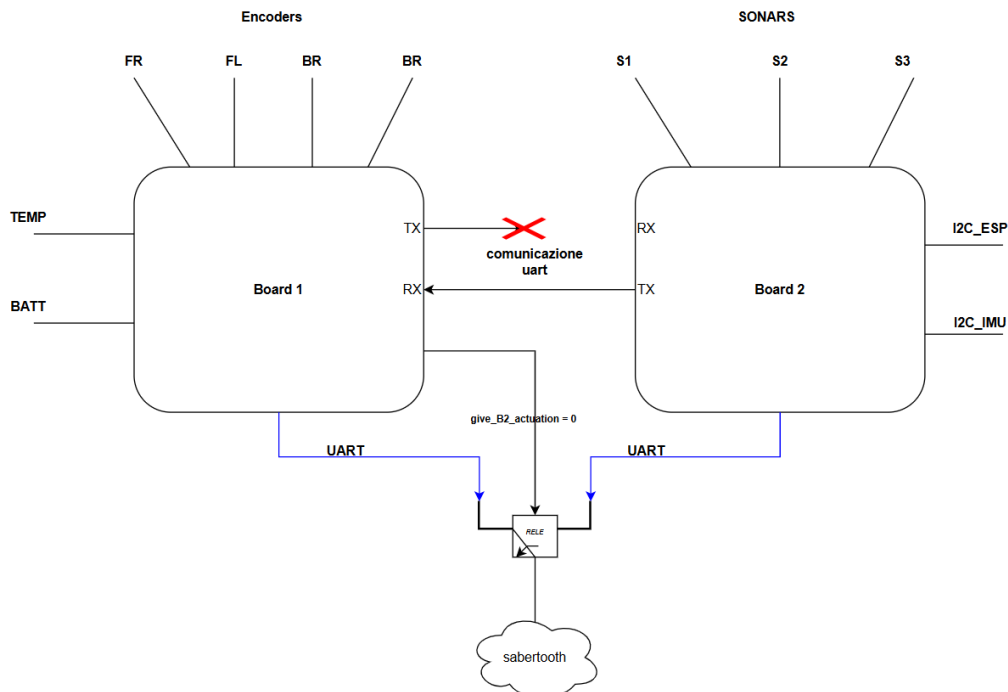


Figure 4: Board 2 non riceve dati dalla Board 1.

Un aspetto da notare è che la Board 2, come descritto nel paragrafo *Coerenza del movimento del rover*, continua a verificare che l'angolo di rotazione stimato dalla velocità delle ruote sia coerente con quello misurato dall'IMU. Questa coerenza, nel caso di mancata ricezione dalla Board 1, viene meno in quanto la stima dell'angolo di rotazione è basata sull'ultimo dato di velocità delle ruote che ovviamente cambia in quanto l'utente può ancora comandare il rover. Essendo che la rotazione del rover può essere possibile Board 2 imposterà il flag *isMotionConsistent* a 0, indicando che il movimento del rover non è affidabile.

A differenza di come descritto nel paragrafo *Encoder non funzionanti*, nel caso in cui uno o più encoder si rompano, la Board 1 deciderà di attuare uno stop di emergenza, perchè avrà uno stato di degrado di uno o più encoder in aggiunta ad un segnale di incoerenza del movimento del rover segnalato da Board 2.

Board 1 non riceve Se la Board 1 non riceve dati dalla Board 2 per un periodo di tempo superiore a 120 ms, la Board 1 decide di cedere i privilegi di attuazione alla Board 2, quindi aprendo il rele e lasciando che Board 2 possa attuare i comandi di movimento.

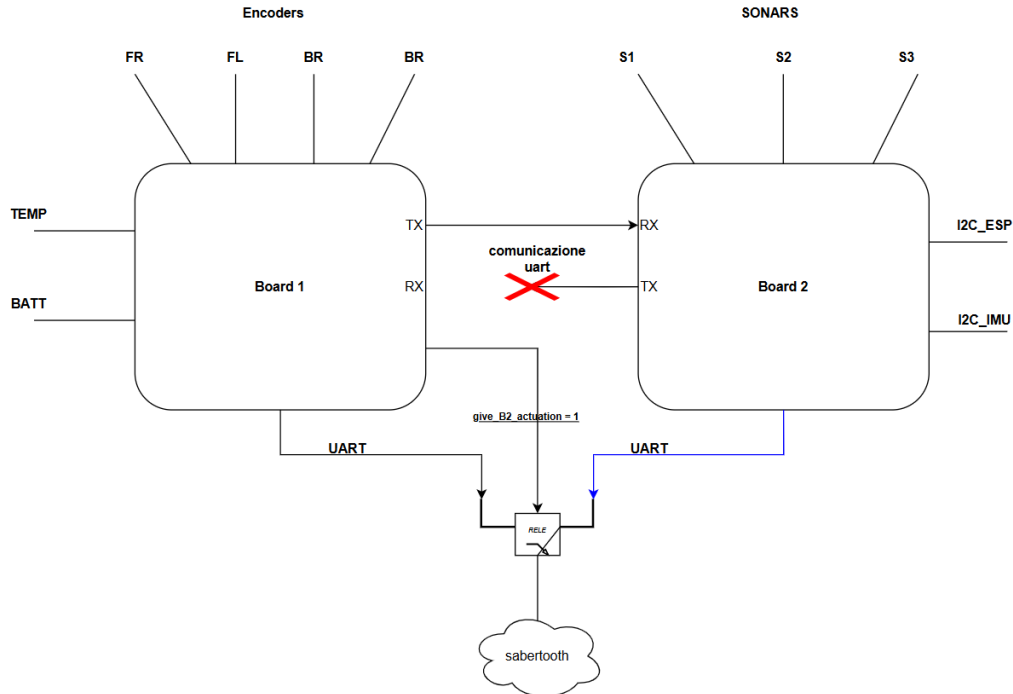


Figure 5: Board 1 non riceve dati dalla Board 2.

Il controllo di Board 2 avviene in open loop, basandosi esclusivamente sui comandi utente ricevuti e sui dati dei sensori, senza feedback diretto sulla velocità effettiva del rover. Essendo questa una modalità di funzionamento degradata, la velocità del rover viene dimezzata.

4 Funzionamento generale del software di ciascuna board

4.1 Interazione tra Task e Meccanismo di Snapshot

Ciascuna board gestisce sette task, ognuno dei quali attinge, secondo necessità, alle informazioni richieste dalla propria logica di controllo tramite gli snapshot, ovvero variabili globali condivise. Si consideri, ad esempio, la Figura 6 che illustra il funzionamento dei task *SupervisorB1* e *Transmit* che vengono eseguiti sulla Board 1. Al termine della propria esecuzione, ogni task può aggiornare tali snapshot, rendendo i nuovi dati disponibili agli altri task. Nell'esempio, il task *SupervisorB1* aggiorna lo snapshot **supervisor_snapshot**, che viene poi utilizzato dal task *Transmit* per l'invio dei dati verso la Board2. Allo stesso modo, la Board 2 tiene e scrive i propri snapshot, come illustrato nella Figura 7.

Ogni snapshot integra, oltre ai dati specifici, due variabili di monitoraggio temporale:

- *data_last_valid_ms*: indica l'istante temporale dell'ultimo aggiornamento dei dati ritenuto valido (ad esempio, l'ultima lettura coerente ricevuta dagli encoder).
- *task_last_run_ms*: riporta l'ultimo istante in cui il task è stato effettivamente eseguito.

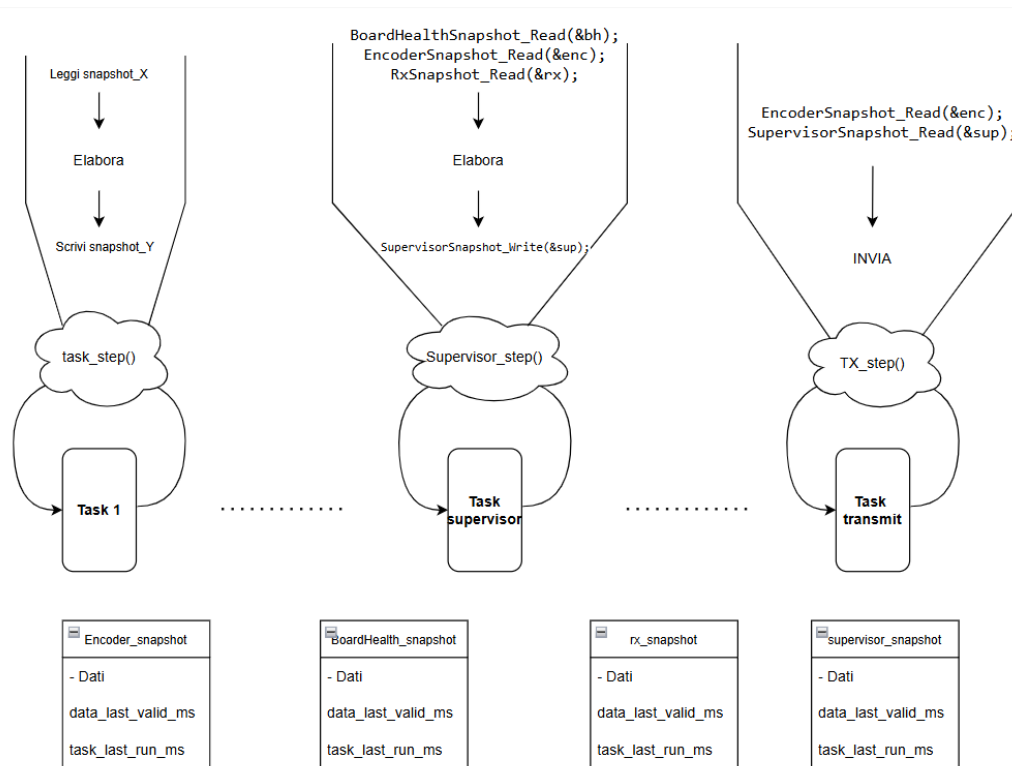


Figure 6: Funzionamento generale del software di Board 1.

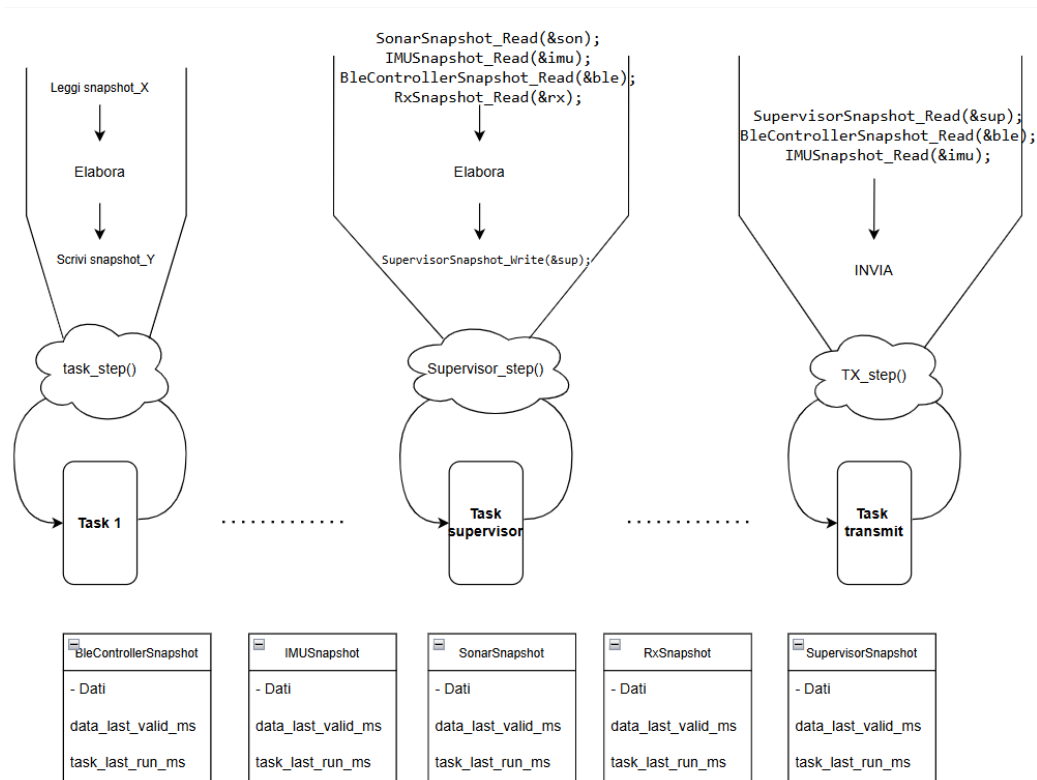


Figure 7: Funzionamento generale del software di Board 2.

4.2 Funzionamento task di Board 2

4.2.1 Task: acquisizione distanza dagli ostacoli

La Board 2 è equipaggiata con tre sensori ad ultrasuoni **HC-SR04** per il rilevamento di ostacoli. Questi sono disposti a 45° l'uno dall'altro, come mostrato in Figura 8.

Ogni sensore emette onde sonore ad alta frequenza e produce segnali di tipo onda quadra la cui durata è proporzionale all'ostacolo rilevato.

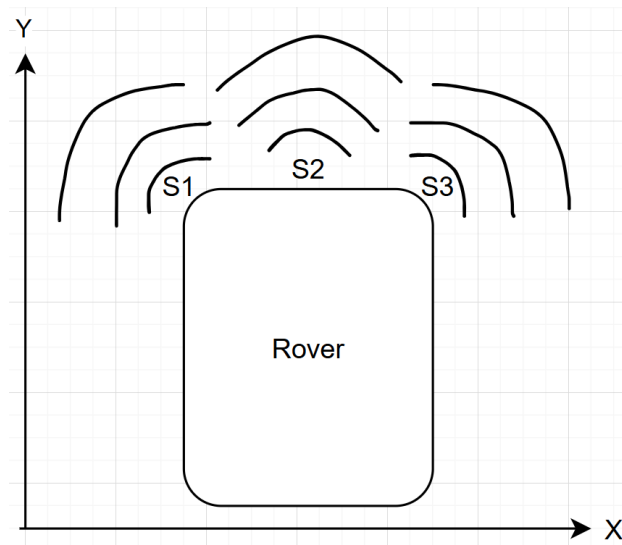


Figure 8: Disposizione dei sensori sulla Board 2.



Figure 9: Segnale generato dal sensore HC-SR04 in presenza di un ostacolo a 3 metri di distanza.

La board2, rilevando i fronti di salita e discesa, può misurare l'intervallo tra i due fronti e utilizzare questa informazione per calcolare la distanza dall'ostacolo e prendere decisioni appropriate per evitare collisioni.

Utilizzo DMA per la lettura dei segnali Per ottimizzare la lettura dei segnali dai sensori ad ultrasuoni, la Board 2 utilizza il Direct Memory Access (DMA). Il DMA consente di trasferire i dati direttamente tra la periferica (i sensori ad ultrasuoni) e la memoria, senza l'intervento della CPU. Il timer

utilizzato è il *Timer1*, con i canali 1, 2 e 3 configurati in modalità *input capture* per catturare i fronti di salita e discesa generati dai tre sensori.

DMA Request	Channel	Direction	Priority
TIM1_CH1	DMA1 Channel 1	Peripheral To Memory	Low
TIM1_CH2	DMA1 Channel 2	Peripheral To Memory	Low
TIM1_CH3	DMA1 Channel 3	Peripheral To Memory	Low

Add Delete

DMA Request Settings

Mode: Circular

Increment Address: ☐

Peripheral: ☐ Memory: ☒

Data Width: Half Word

DMA Request Synchronization Settings

Enable synchronization: ☐

Synchronization signal:

Signal polarity:

Enable event: ☐

Request number:

Figure 10: Configurazione del DMA per la lettura dei segnali dai sensori.

Ogni canale del DMA è configurato in modalità interrupt, permettendo, alla fine della rilevazione dei due fronti (salita e discesa), di eseguire una *Callback* che imposta dei flag a 1. Questo flag indica che i fronti sono stati rilevati e che la distanza dall'ostacolo può essere calcolata. In totale vengono eseguite solo 3 callback, attivate solo quando uno specifico canale DMA ha terminato la lettura di entrambi i fronti. La Figura 11 mostra un esempio di callback eseguita al termine della rilevazione dei fronti.

```

void HAL_TIM_IC_CaptureCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
{
    BaseType_t xHigherPriorityTaskWoken = pdFALSE;

    if(htim->Instance == TIM1){
        switch(htim->Channel){
            case HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_1:
                if(flag.sonar1_ok == 0){
                    flag.sonar1_ok = 1;
                    sonar_count ++;
                }
                break;
            case HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_2:
                if(flag.sonar2_ok == 0){
                    flag.sonar2_ok = 1;
                    sonar_count ++;
                }
                break;
            case HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_3:
                if(flag.sonar3_ok == 0){
                    flag.sonar3_ok = 1;
                    sonar_count ++;
                }
                break;
            default:
                break;
        }
    }

    if (sonar_count >= 3) {
        // Notifica il task e richiedi uno switch immediato se necessario
        xTaskNotifyFromISR(sonarTaskHandle, 0, eNoAction, &xHigherPriorityTaskWoken);
        portYIELD_FROM_ISR(xHigherPriorityTaskWoken);
    }
}

```

Figure 11: Callback eseguita al termine della rilevazione dei fronti.

Alla fine della lettura, il task aggiorna lo snapshot **SonarsSnapshot** con le distanze rilevate dai tre sensori, come mostrato in Figura 12.

```

typedef struct
{
    uint16_t dist_cm[3];

    uint32_t task_last_run_ms; /* ultima esecuzione del task */
    uint32_t data_last_valid_ms[3]; /* ultimo istante in cui i dati sono validi */
} SonarSnapshot_t;

```

Figure 12: Struttura dati dello snapshot SonarsSnapshot.

4.2.2 Task: lettura comandi utente

La Board 2 riceve i comandi utente provenienti da un joystick che comunica con un'ESP32 tramite Bluetooth. La Board 2, attraverso un task dedicato, riceve i comandi provenienti dalla *ESP32* con il protocollo **I2C** e li integra nello snapshot **BleControllerSnapshot**. In Figura 13 è mostrata lo step del task dedicato alla ricezione dei comandi utente, in cui viene eseguita la lettura dei dati provenienti dalla *ESP32* e l'aggiornamento dello snapshot **BleControllerSnapshot**.

```
void BleController_TaskStep(void)
{
    static BleControllerSnapshot_t snap;
    BleRawFrame_t frame;

    uint32_t now = osKernelGetTickCount();
    snap.task_last_run_ms = now;

    BleI2CStatus_t st = BleController_I2C_ReadFrame(&frame);

    if (st == BLE_I2C_COMPLETE)
    {
        snap.data_last_valid_ms = now;

        /* Normalizzazione assi joystick A */
        snap.ax_norm = NormalizeAxis(frame.ax);
        snap.ay_norm = NormalizeAxis(frame.ay);

        snap.bx_norm = NormalizeAxis(frame.bx);
        snap.by_norm = NormalizeAxis(frame.by);

        /* Pulsanti */
        snap.a_btn = frame.a_btn;
        snap.b_btn = frame.b_btn;
        snap.btn1 = frame.btn1;
        snap.btn2 = frame.btn2;
    }

    BleControllerSnapshot_Write(&snap);
}
```

Figure 13: Step del task dedicato alla ricezione dei comandi utente.

La funzione *BleController_I2C_ReadFrame* si occupa di leggere i dati provenienti dalla *ESP32* e di restituirli in una struttura dati, che viene poi utilizzata per aggiornare lo snapshot **BleControllerSnapshot**.

In Figura 14 è mostrata la struttura dati dello snapshot **BleController-**

Snapshot, in cui sono presenti i comandi utente normalizzati (x_{norm} e y_{norm}).

```
typedef struct
{
    uint32_t task_last_run_ms; /* ultima esecuzione del task */
    uint32_t data_last_valid_ms; /* ultimo istante in cui i dati sono validi */

    /* Stick A normalizzato */
    float ax_norm;
    float ay_norm;

    /* Stick B normalizzato */
    float bx_norm;
    float by_norm;

    /* Pulsanti */
    uint8_t a_btn;
    uint8_t b_btn;
    uint8_t btn1;
    uint8_t btn2;
} BleControllerSnapshot_t;
```

Figure 14: Struttura dati dello snapshot BleControllerSnapshot.

4.2.3 Task: lettura giroscopio

La Board 2 è equipaggiata con un sensore IMU **MPU-6050**, che integra un accelerometro e un giroscopio a 3 assi. Poiché il sensore non fornisce direttamente l'orientamento assoluto, l'angolo di yaw (la rotazione del rover attorno al suo asse verticale) viene calcolato nel firmware integrando nel tempo i dati della velocità angolare provenienti dal giroscopio. All'accensione, il sistema esegue una calibrazione per impostare lo zero relativo alla direzione di avvio. La comunicazione con l'IMU avviene tramite protocollo I2C, e i dati elaborati aggiornano ciclicamente lo snapshot IMUSnapshot (Figura 21).

4.2.4 Interfacciamento DualSense PS5 tramite ESP32

Per la generazione dei comandi remoti è stato utilizzato un controller **Sony DualSense (PS5)**, interfacciato a una scheda **ESP32** che funge da bridge tra il protocollo Bluetooth e il bus I2C del rover. L'implementazione sul lato ESP32 è stata realizzata in ambiente Arduino IDE sfruttando la libreria **Bluepad32**. I dati del joystick sono stati rappresentati tramite la struct presente nell'immagine 16.



Figure 15: Tasti presenti sul joystick utilizzato.

```
// 1. DEFINIZIONE STRUTTURA (Identica alla tua originale)
// L'attributo packed assicura che non ci siano spazi vuoti tra i dati (totale 12 byte)
struct __attribute__((packed)) controller_t {
    uint16_t ax;    // Joystick Sinistro X
    uint16_t ay;    // Joystick Sinistro Y
    uint8_t  a_btn;  // Pressione L3
    uint16_t bx;    // Joystick Destro X
    uint16_t by;    // Joystick Destro Y
    uint8_t  b_btn;  // Pressione R3
    uint8_t  btn1;   // Tasto Croce
    uint8_t  btn2;   // Tasto Cerchio
};

// Valori di riposo (Standby)
controller_t controller_standby = {255, 255, 0, 255, 255, 0, 0, 0};
controller_t controller_data;
```

Figure 16: Rappresentazione tasti del joystick.

Una volta rappresentati i dati e individuato i valori di standby, il flusso di elaborazione sull'ESP32 segue i seguenti passaggi:

1. **Pairing e Connessione:** All'avvio, l'ESP32 scansiona i dispositivi Bluetooth. Una volta messo il DualSense in modalità pairing, la libreria stabilisce una connessione sicura.
2. **Parsing dei dati:** Tramite le callback della libreria (`onConnectedGamepad`), vengono eseguiti alcuni controlli per garantire che si possa connettere solo il joystick autorizzato alla scheda.

```
// 2. CALLBACK: COSA SUCCEDDE QUANDO IL JOYSTICK SI CONNETTE
void onConnectedGamepad(GamepadPtr gp) {
    const uint8_t* addr = gp->getProperties().btaddr;

    // Controllo ID Sony e ID DualSense
    bool isPS5 = (gp->getProperties().vendor_id == 0x054c &&
        (gp->getProperties().product_id == 0x0ce6 || gp->getProperties().product_id == 0x0df2));

    if (isPS5) {
        Serial.println("Rilevato: Controller PS5 (DualSense) ORIGINALE.");
    } else {
        Serial.printf("Rilevato controller non PS5 (VID: %04x, PID: %04x). Rifiuto...\n",
            gp->getProperties().vendor_id, gp->getProperties().product_id);
        gp->disconnect();
        return;
    }

    Serial.printf("Tentativo di connessione da: %02X:%02X:%02X:%02X:%02X:%02X\n",
        addr[0], addr[1], addr[2], addr[3], addr[4], addr[5]);

    // Confronto del MAC
    if (memcmp(addr, authorizedMac, 6) == 0 && myGamepads[0] == nullptr) {
        Serial.println("DualSense AUTORIZZATO!");
        gp->setColorLED(255, 0, 0); // Rosso per segnalare che la connessione è avvenuta

        // Lo mettiamo sempre nella posizione 0 per semplicità
        myGamepads[0] = gp;
    } else {
        Serial.println("ERRORE: Controller NON autorizzato. Rifiuto connessione...");
        gp->disconnect(); // Segnala allo stack di chiudere
    }
}
```

Figure 17: Implementazione della funzione di callback per l'inizializzazione del controller DualSense all'atto della connessione Bluetooth.

3. **Normalizzazione:** Viene continuamente monitorato lo stato del Bluetooth e, se il joystick è connesso, i valori provenienti da esso vengono mappati in un range normalizzato a seconda delle necessità del supervisore. Una volta mappati, tali valori vengono utilizzati per aggiornare i dati presenti in `controller_data`.

```
void loop() {  
    // Aggiorna lo stato del Bluetooth (obbligatorio)  
    BP32.update();  
  
    // Usiamo solo lo slot 0 che abbiamo popolato SOLO se il MAC era corretto  
    GamepadPtr gp = myGamepads[0];  
    if (gp && gp->isConnected()) {  
        const uint8_t* addr = gp->getProperties().btaddr;  
  
        controller_data.ax = map(gp->axisX(), -511, 511, 511, 0);  
        controller_data.ay = map(gp->axisY(), -511, 511, 511, 0);  
        controller_data.bx = map(gp->axisRX(), -511, 511, 511, 0);  
        controller_data.by = map(gp->axisRY(), -511, 511, 511, 0);  
  
        uint16_t buttons = gp->buttons();  
        controller_data.a_btn = (buttons & 0x0100) ? 1 : 0;  
        controller_data.b_btn = (buttons & 0x0200) ? 1 : 0;  
        controller_data.btn1 = (buttons & 0x0001) ? 1 : 0;  
        controller_data.btn2 = (buttons & 0x0002) ? 1 : 0;  
    }  
    // Piccolo delay per non saturare la CPU  
    delay(1);  
}
```

Figure 18: Normalizzazione dei dati inviati alla ESP32 tramite joystick

4. **Trasmissione I2C:** L'ESP32 è configurata come **I2C Slave**. Quando la Board 2 interroga l'ESP32 (tramite la funzione `BleController_I2C_ReadFrame` citata precedentemente), l'ESP32 trasmette un pacchetto dati strutturato contenente lo stato dei pulsanti e la posizione degli analogici.

```
// 4. RISPOSTA I2C: QUANDO IL MASTER CHIEDE DATI
void onRequest() {
    // Invia i 12 byte della struttura tramite il bus I2C
    Wire.write((byte *)&controller_data, sizeof(controller_t));
}
```

Figure 19: Trasmissione dei dati del joystick della ESP32 al Master tramite callback

5. **Disconnessione:** Nel momento in cui viene rilevata la disconnessione del joystick dalla scheda, vengono impostati, tramite callback, i dati di default, che indicano al rover di rimanere fermo (velocità lineare e angolare impostate a zero). Così facendo, se il joystick dovesse disconnettersi per qualche motivo il rover rimane fermo e non vengono svolte azioni indesiderate che possono portarlo a situazioni pericolose.

```
// 3. CALLBACK: COSA SUCCEDDE QUANDO IL JOYSTICK SI SCOLLEGA
void onDisconnectedGamepad(GamepadPtr gp) {
    if (myGamepads[0] == gp) {
        myGamepads[0] = nullptr;
        controller_data = controller_standby;
        Serial.println("DualSense autorizzato disconnesso.");
    }
}
```

Figure 20: Normalizzazione dei dati inviati alla ESP32 tramite joystick

Questa architettura permette di delegare il carico computazionale della gestione Bluetooth alla ESP32, garantendo che la Board 2 (STM32) rimanga focalizzata esclusivamente sui task real-time di supervisione e sicurezza.

```

typedef struct
{
    uint32_t task_last_run_ms; /* ultima esecuzione del task */
    uint32_t data_last_valid_ms; /* ultimo istante in cui i dati sono validi */

    /* Accelerometer (g) */
    float ax_g;
    float ay_g;
    float az_g;

    /* Gyroscope (deg/s) */
    float gx_dps;
    float gy_dps;
    float gz_dps;

    /* Temperature (°C) */
    float temperature_degC;

    float yaw;
} IMUSnapshot_t;

```

Figure 21: Struttura dati dello snapshot IMUSnapshot.

4.2.5 Task: supervisore Board 2

Il cuore logico della Board 2 è rappresentato dal task del supervisore, un processo che implementa una macchina a stati complessa generata tramite Simulink Stateflow. Il task opera come un arbitro di sicurezza tra i comandi utente e l'ambiente circostante, garantendo che il rover si muova nella direzione voluta dall'utente a meno di possibili ostacoli statici o in movimento.

In Figura 22 è mostrato lo step del task del supervisore, in cui vengono evidenziati gli input e gli output.

```

void Supervisor_TaskStep(void)
{
    static SonarSnapshot_t son;
    static IMUSnapshot_t imu;
    static BleControllerSnapshot_t ble;
    static RxSnapshot_t rx;
    static SupervisorSnapshot_t sup;
    static uint8_t last_sup_counter = 0;
    static uint32_t last_sup_update_ms = 0;

    SonarSnapshot_Read(&son);
    IMUSnapshot_Read(&imu);
    BleControllerSnapshot_Read(&ble);
    RxSnapshot_Read(&rx);

    uint32_t now = osKernelGetTickCount();

    CommPayloadB1_t payload = rx.payload;

    if (payload.alive_counter != last_sup_counter) {
        last_sup_counter = payload.alive_counter;
        last_sup_update_ms = now;
    }

    SupervisorB2_U.Board1_Data = rx;
    SupervisorB2_U.BLE = ble;
    SupervisorB2_U.IMU = imu;
    SupervisorB2_U.Sonars = son;
    SupervisorB2_U.last_valid_b1_ms = last_sup_update_ms;
    SupervisorB2_U.now_ms = now;

    SupervisorB2_step();

    sup.critical_mask = SupervisorB2_Y.critical_mask;
    sup.degraded_mask = SupervisorB2_Y.degraded_mask;
    sup.command = SupervisorB2_Y.B2Decision;
    sup.isMotionConsistent = SupervisorB2_Y.isMotionConsistent;

    sup.alive_counter++;
    sup.task_last_run_ms = now;
}

```

Figure 22: Step del task del supervisore della Board 2.

Ad ogni ciclo, il task acquisisce i dati dai sensori locali (**Sonar**, **IMU**, **Comandi utente**) e le informazioni provenienti dalla Board 1 tramite lo snapshot **RxSnapshot**. Il sistema valuta l'integrità dei dati e la persistenza della comunicazione con la Board 1. In base alla latenza dei messaggi e alla coerenza dei sensori, il supervisore può far transitare il rover in stati di operatività *Degraded* o *Critical*. Utilizzando i dati dei tre sonar frontali, il supervisore implementa algoritmi di protezione, infatti, se viene rilevato un ostacolo a distanza critica (< 70 cm), il sistema forza un co-

mando di *CMD_STOP*. In caso di ostacoli in movimento (range 75 – 150 cm), il supervisore attiva delle procedure di deviazione (*CMD_GO_LEFT*, *CMD_GO_RIGHT*) o di aggiramento (*CMD_AVOID*), calcolando i nuovi target di angolo yaw necessari per direzionare il rover verso l'assenza di ostacoli.

Nel paragrafo "Coerenza di movimento del rover" si è parlato della capacità della Board 2 di monitorare la coerenza del movimento del rover. In effetti, il supervisore esegue un test di coerenza tra la rotazione stimata dalla lettura della velocità dei motori e quella misurata dall'IMU. Questa logica permette di rilevare anomalie meccaniche (come lo slittamento di una ruota o il bloccaggio di un motore) o anomalie dei sensori IMU ed encoder. Se ci sono incoerenze, il supervisore di Board 2 imposta un flag *isMotionConsistent* a 0.

Infine, in condizioni nominali, la Board 2 non invia comandi di attuazione ai motori, lasciando che sia la Board 1 ad attuare. Tuttavia, il supervisore consente alla Board 2 di attuare se si verifica una di queste condizioni:

- Viene rilevato un timeout critico nella ricezione dei dati dalla Board 1 (> 120 ms).
- Il supervisore della Board 1 funziona in maniera discontinua.
- Board 1 invia a Board 2 l'autorizzazione ad attuare.

E' da notare che l'attuazione passa attraverso il rele comandato da Board 1, quindi dovrà essere sempre Board 1 ad aprirlo per consentire al segnale UART di Board 2 di arrivare ai driver dei motori.

In Figura 23 è mostrata la *actuation_step* di Board 2 in funzione della variabile *authorized_to_send_command* in uscita dal supervisore.

```

bool authorized_to_send_command = SupervisorB2_Y.authorized_to_send_command;
if(authorized_to_send_command){

    static bool initialized = false;
    if(!initialized){
        Actuation_Init();
        initialized = true;
    }
    else{
        float v_ref = SupervisorB2_Y.v_ref_actuation;
        float omega_ref = SupervisorB2_Y.omega_ref_actuation;

        Actuation_Step(v_ref, omega_ref);

        bool emergency_stop_requested = SupervisorB2_Y.actuate_emergency_stop;
        if(emergency_stop_requested){
            HAL_GPIO_WritePin(ESTOP_GPIO_Port, ESTOP_Pin, GPIO_PIN_RESET);
        }
        else{
            HAL_GPIO_WritePin(ESTOP_GPIO_Port, ESTOP_Pin, GPIO_PIN_SET);
        }
    }
}

SupervisorSnapshot_Write(&sup);
}

```

Figure 23: Step di attuazione di Board 2 in funzione della variabile `authorized_to_send_command`.

Data l'assenza degli encoder, l'attuazione di Board 2 dovrà essere in open loop, basandosi esclusivamente sui comandi utente ricevuti e sui dati dei sensori, senza feedback diretto sulla velocità effettiva del rover. La funzione di attuazione trasforma i riferimenti di velocità del supervisore in segnali di potenza per i motori. Il sistema opera in anello aperto (open-loop), convertendo i giri al minuto (RPM) desiderati in tensione elettrica. Infine, i comandi vengono inviati al driver di potenza Sabertooth tramite una scalatura lineare del voltaggio in uscita, con un range di $[-12V; +12V]$ corrispondente a $[-MAX_RPM; +MAX_RPM]$.

Lo snapshot del supervisore di Board 2 è mostrato in Figura 24:

```

/* ===== Snapshot Supervisore Board 2 ===== */
typedef struct
{
    /* Timestamp decisione */
    uint32_t task_last_run_ms;

    /* Fault di board 2 presenti che comportano uno stato degradato */
    uint32_t degraded_mask;

    /* Fault di board 2 presenti che comportano uno stato di emergenza */
    uint32_t critical_mask;

    /* Comando semantico deciso da board 2 */
    SupervisorCommand_t command;

    /* Coerenza dei dati ricevuti da imu, utile a rilevare motor fault */
    bool isMotionConsistent;

    /* Heartbeat / alive counter */
    uint32_t alive_counter;
} SupervisorSnapshot_t;

```

Figure 24: Snapshot del supervisore di Board 2

4.2.6 Task: log dei dati per il debug

La Board 2 integra un task dedicato alla stampa dei dati per scopi di debug. Questo task, eseguito a cadenza regolare, acquisisce gli snapshot:

- RxSnapshot
- BleControllerSnapshot
- SonarsSnapshot
- IMUSnapshot

e stampa i dati più rilevanti su console. Questa funzionalità è fondamentale per monitorare lo stato del sistema durante le fasi di sviluppo e test, permettendo di identificare rapidamente eventuali anomalie o comportamenti imprevisti. Lo step del task è mostrato in Figura 29, in cui vengono evidenziati i dati acquisiti e stampati su console.

```

void Log_TaskStep(void)
{
    static char log_buf[LOG_BUF_LEN];

    BleControllerSnapshot_t ble;
    IMUSnapshot_t imu;
    SonarSnapshot_t sonar;
    RxSnapshot_t rx;

    BleControllerSnapshot_Read(&ble);
    IMUSnapshot_Read(&imu);
    SonarSnapshot_Read(&sonar);
    RxSnapshot_Read(&rx);

    Log_FormatSnapshot(log_buf, LOG_BUF_LEN,
                      &ble, &imu, &sonar, &rx);

    printf("%s", log_buf);
}

```

Figure 25: Step del task dedicato alla stampa dei dati per scopi di debug.

4.3 Funzionamento task di Board 1

4.3.1 Task: lettura batteria e temperatura

La Board 1 è equipaggiata con sensori per il monitoraggio della temperatura e della batteria. Un task dedicato esegue ciclicamente la lettura di questi sensori, aggiornando lo snapshot **BoardHealthSnapshot** con i valori rilevati.

In Figura 26 è mostrato lo step del task dedicato alla lettura della batteria e temperatura, in cui vengono evidenziati i dati acquisiti e aggiornati nello snapshot **BoardHealthSnapshot**.

```

void BoardHealth_TaskStep(void)
{
    static BoardHealthSnapshot_t snap;
    float temp_degC;
    float batt_pct;

    BoardHealthStatus_t temp_st;
    BoardHealthStatus_t batt_st;

    temp_st = BoardHealth_ReadTemperature(&temp_degC);
    batt_st = BoardHealth_ReadBattery(&batt_pct);

    uint32_t now = osKernelGetTickCount();
    snap.task_last_run_ms = now;

    if (temp_st == BOARD_HEALTH_OK)
    {
        snap.temperature_degC = temp_degC;
        snap.temp_last_valid_ms = now;
    }

    if (batt_st == BOARD_HEALTH_OK)
    {
        snap.battery_pct = batt_pct;
        snap.batt_last_valid_ms = now;
    }

    BoardHealthSnapshot_Write(&snap);
}

```

Figure 26: Step del task dedicato alla lettura della batteria e temperatura.

Per garantire l'affidabilità a lungo termine, il sistema integra un modulo di diagnostica basato su convertitori Analogico-Digitali (ADC) che monitorano costantemente i parametri vitali della scheda. Questo modulo si occupa di due aspetti critici:

- **Gestione della Batteria:** Il sistema legge la tensione della batteria attraverso un partitore resistivo. Poiché la scarica di una batteria non è lineare, il software utilizza una *Look-Up Table* (LUT) e

un'interpolazione lineare per convertire i Volt in una percentuale di carica residua (0-100%). Ciò fornisce all'utente un'indicazione realistica dell'autonomia residua.

- **Monitoraggio Termico:** Utilizzando il sensore di temperatura interno al microcontrollore STM32G4, il sistema calcola la temperatura operativa della logica di controllo. Il calcolo sfrutta i dati di calibrazione salvati in fabbrica dal produttore per garantire la massima precisione.

Per evitare letture errate dovute a disturbi elettrici o picchi temporanei, i dati non vengono usati così come sono, ma vengono processati attraverso una media mobile. Questo filtro "ammorbidisce" le letture su una finestra di 10 campioni, garantendo che i valori visualizzati siano stabili e puliti. Infine, il modulo verifica che i valori rientrino in range di sicurezza (es. 7V - 15V per la batteria), segnalando errori di sistema qualora i parametri diventino critici

4.3.2 Task: supervisore Board 1

Il supervisore della Board 1 è implementato tramite una macchina a stati sviluppata in Simulink Stateflow. Questo task ha il compito di supervisionare l'integrità dell'hardware e di assegnare i riferimenti di velocità lineare e di rotazione.

In Figura 27 è illustrato lo step del task del supervisore della Board 1, con il dettaglio delle interfacce di input e output.

```

void Supervisor_TaskStep(void)
{
    static BoardHealthSnapshot_t bh;
    static EncoderSnapshot_t enc;
    static RxSnapshot_t rx;
    static SupervisorSnapshot_t sup;
    static uint8_t last_sup_counter;
    static uint32_t last_sup_update_ms;

    BoardHealthSnapshot_Read(&bh);
    EncoderSnapshot_Read(&enc);
    RxSnapshot_Read(&rx);

    uint32_t now = osKernelGetTickCount();

    CommPayloadB2_t payload = rx.payload;

    if (payload.alive_counter != last_sup_counter) {
        last_sup_counter = payload.alive_counter;
        last_sup_update_ms = now;
    }

    SupervisorB1_U.Board2_Data = rx;
    SupervisorB1_U.Board_Health = bh;
    SupervisorB1_U.Encoder = enc;
    SupervisorB1_U.last_valid_b2_ms = last_sup_update_ms;
    SupervisorB1_U.now_ms = now;

    SupervisorB1_step();

    sup.critical_mask = SupervisorB1_Y.critical_mask;
    sup.degraded_mask = SupervisorB1_Y.degraded_mask;
    sup.speed_ref_rpm = SupervisorB1_Y.v_ref;
    sup.steering_cmd = SupervisorB1_Y.omega_ref;

    sup.current_action = SupervisorB1_Y.current_action;
    sup.isBoardActuating = !SupervisorB1_Y.give_b2_actuation;
}

```

Figure 27: Step del task del supervisore della Board 1.

Il task elabora in tempo reale i dati provenienti dalla **Board Health** (stato di batteria e temperatura), i feedback degli **Encoder** motori e i pacchetti dati ricevuti dalla Board 2.

La logica di controllo è strutturata su tre pilastri fondamentali:

- **Diagnostica e Fault Masking:** il sistema valuta l'integrità dei dati e la persistenza della comunicazione con la Board 2. In base alla latenza

dei messaggi e alla coerenza dei sensori, può far transitare il rover in stati di operatività *Degraded* o *Critical*. Questi stati permettono al supervisore di inibire manovre o di limitare la potenza alle ruote in caso di anomalie, garantendo maggiore protezione.

- **Gestione delle Manovre Complesse:** A differenza della Board 2, focalizzata sull'evitamento ostacoli, la Board 1 gestisce comandi di alto livello come la *Rotazione a 180 gradi* assistita e la procedura di *Emergency Stop*, monitorando l'arresto effettivo delle ruote tramite i sensori di velocità.
- **Arbitraggio dell'Attuazione:** Il supervisore valuta costantemente l'affidabilità della comunicazione inter-board. Qualora rilevi un'instabilità nella comunicazione con l'altra scheda, è in grado di cedere i privilegi di attuazione alla Board 2, realizzando una strategia di ridonanza funzionale che aumenta la resilienza del rover. I motivi per cui la Board 1 può decidere di cedere il controllo alla Board 2 quando la comunicazione con quest'ultima si interrompe o si degrada derivano dal fatto che Board 2 ha a disposizione i sonar e soprattutto il comando utente, fondamentali per decidere dove andare e se deviare il percorso o addirittura fermarsi.

Lo snapshot del supervisore di Board 1 è mostrato in Figura 28.

```

/* ===== Snapshot Supervisore Board 1 ===== */
typedef struct
{
    /* Timestamp decisione */
    uint32_t task_last_run_ms;

    /* Fault di board 1 presenti che comportano uno stato degradato */
    uint32_t degraded_mask;

    /* Fault di board 1 presenti che comportano uno stato di emergenza */
    uint32_t critical_mask;

    /* Comandi AUTORIZZATI */
    float speed_ref_rpm; /* velocità longitudinale */
    float steering_cmd; /* comando sterzata */

    SupervisorCommand_t current_action;
    bool isBoardActuating;

    /* Heartbeat / alive counter */
    uint8_t alive_counter;
} SupervisorSnapshot_t;

```

Figure 28: Step del task del supervisore della Board 1.

4.3.3 Task: controllo motori

Il task di controllo presente nella Board 1 è responsabile dell'attuazione dei comandi di movimento del rover, basandosi sui riferimenti di velocità lineare e angolare forniti dal supervisore. Il task quindi:

- legge i riferimenti di velocità lineare (v_{ref}) e angolare (ω_{ref}) calcolati dal supervisore.
- legge le velocità delle ruote attraverso gli encode.
- applica un controllo PID per regolare la potenza erogata ai motori, al fine di raggiungere i riferimenti di velocità desiderati.

Alla lettura degli encoder per stimare la velocità delle ruote è accompagnata una logica che permette il rilevamento di un'anomalia derivante dal fatto che si sta alimentando il motore ma gli encoder non rilevano movimenti, quindi la velocità calcolata è nulla. In particolare, se si rileva quest'anomalia per 20 cicli di esecuzione, si imposta la variabile $has_no_feedback(i)$ associata al motore di riferimento a 1.

Se uno o più encoder si rompono, il rover non deve smettere di funzionare, ma deve "stimare" la velocità mancante usando quella delle ruote sane. Il codice applica una sostituzione simmetrica:

- *1 Fallimento*: Se si rompe l'encoder anteriore sinistro, il sistema "copia" il valore di quello posteriore sinistro.
- *2 Fallimenti*: Se si rompe un intero lato, copia i valori dall'altro lato.
- *3 Fallimenti*: Tutte le ruote assumono il valore dell'unica ruota superstite.

4.3.4 Task: log dei dati per il debug

La Board 1 integra un task dedicato alla stampa dei dati per scopi di debug. Questo task, eseguito a cadenza regolare, acquisisce gli snapshot:

- **RxSnapshot**
- **EncoderSnapshot**
- **BoardHealthSnapshot**

e stampa i dati più rilevanti su console. Questa funzionalità è fondamentale per monitorare lo stato del sistema durante le fasi di sviluppo e test, permettendo di identificare rapidamente eventuali anomalie o comportamenti imprevisti. Lo step del task è mostrato in Figura 29, in cui vengono evidenziati i dati acquisiti e stampati su console.

```
void Log_TaskStep(void)
{
    static char log_buf[LOG_BUF_LEN];

    BleControllerSnapshot_t ble;
    IMUSnapshot_t imu;
    SonarSnapshot_t sonar;
    RxSnapshot_t rx;

    BleControllerSnapshot_Read(&ble);
    IMUSnapshot_Read(&imu);
    SonarSnapshot_Read(&sonar);
    RxSnapshot_Read(&rx);

    Log_FormatSnapshot(log_buf, LOG_BUF_LEN,
                      &ble, &imu, &sonar, &rx);

    printf("%s", log_buf);
}
```

Figure 29: Step del task dedicato alla stampa dei dati per scopi di debug.

4.3.5 Task: led

Per fornire un feedback immediato sullo stato operativo del sistema senza l'ausilio di terminali esterni, è stato implementato un task dedicato alla gestione della diagnostica visiva tramite LED. Il modulo `led_task.c` monitora le maschere di errore e le azioni correnti decise dai supervisori di entrambe le board, traducendole nel seguente protocollo di segnalazione:

Colore LED	Comportamento	Significato Operativo
Rosso	Fisso	Guasto Critico (Sistema bloccato)
Rosso	Lampeggiante	Guasto Degraded (Prestazioni ridotte)
Giallo (L/R)	Fisso	Manovra di schivata o sterzata in corso
Blu	Fisso	Emergency Stop attivo (Frenata di emergenza)

Table 1: Protocollo di segnalazione visiva del rover.

Questa implementazione risulta fondamentale durante i test sul campo, poiché permette di distinguere istantaneamente tra un normale comportamento di evitamento ostacoli (LED Giallo) e un arresto dovuto a un'anomalia hardware o software (LED Rosso).

4.4 Task di trasmissione e ricezione tra le due Board

Le due board comunicano tra loro tramite un collegamento seriale, con presenza di task di trasmissione e ricezione su entrambe le board. Il task di trasmissione su entrambe le board ha periodo di 20 ms, mentre il task di ricezione è di tipo event-driven, attivato dall'arrivo di nuovi dati sulla seriale. In Figura 30 è mostrata l'interazione tra i task di trasmissione della Board 2 e ricezione della Board 1, evidenziando quali sono i dati che vengono trasmessi e ricevuti tra le due board. In particolare vengono inviati gli snapshot **SupervisorSnapshot**, **BleControllerSnapshot** e **IMUSnapshot**. Il contenuto di questi snapshot è descritto in dettaglio nelle sezioni dedicate ai task di Board 2.

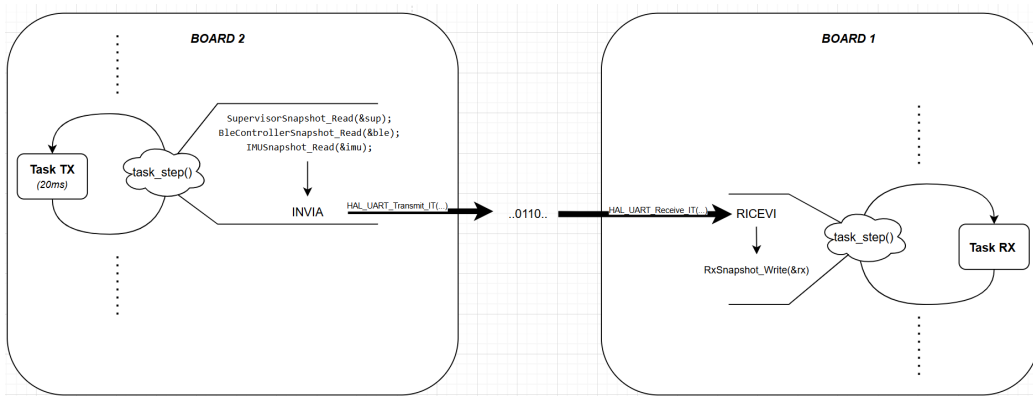


Figure 30: Interazione tra i task di trasmissione della Board 2 e ricezione della Board 1.

Allo stesso modo, nella Figura 31 è mostrata l'interazione tra i task di

trasmissione della Board 1 e ricezione della Board 2. In particolare, la Board 1 invia alla Board 2 lo snapshot **EncoderSnapshot** e **SupervisorSnapshot**. Il contenuto di questi snapshot è descritto in dettaglio nelle sezioni dedicate ai task di Board 1.

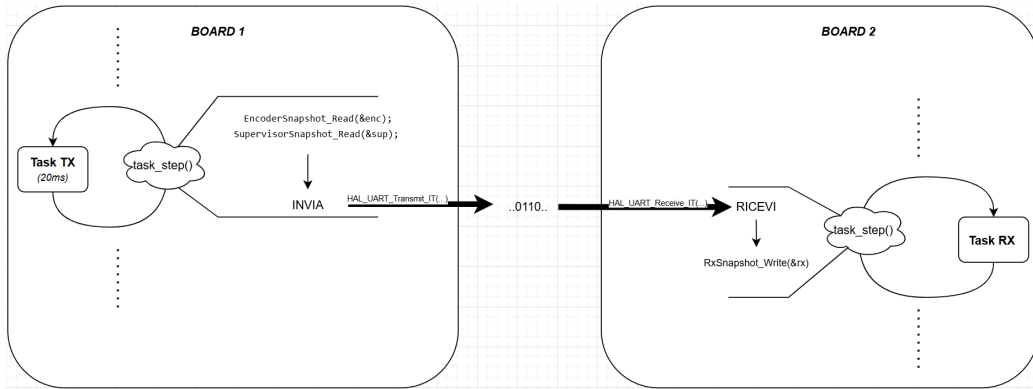


Figure 31: Interazione tra i task di trasmissione della Board 1 e ricezione della Board 2.

5 Supervisore Board 1

5.1 Panoramica generale

Il supervisore della Board 1 è implementato come un modulo Simulink denominato **SupervisorB1**, il cui schema a blocchi è illustrato in Figura 32.

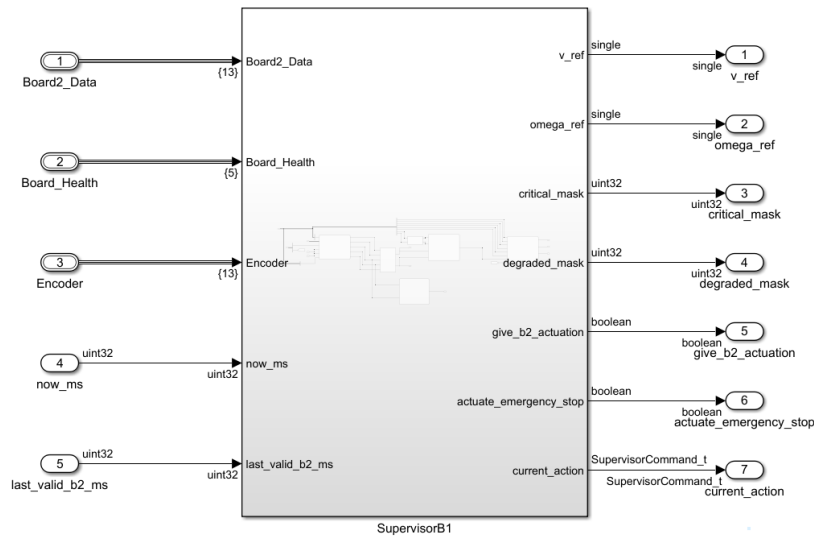


Figure 32: Schema a blocchi del modulo SupervisorB1.

Il suo compito è quello di decidere il riferimento di velocità (v_{ref}) e di direzione (ω_{ref}) del rover, in funzione dell'elaborazione dei dati di input. In particolare, esso è composto da quattro parti principali:

- **Rilevazione Faults:** si occupa di rilevare anomalie nella ricezione dei dati da Board2, dagli encoder delle ruote, dai sensori di temperatura e batteria.
- **Aggregazione Fault:** aggrega le anomalie rilevate nella parte di *rilevazione faults* e le codifica in due maschere di errore (critica e degradata).
- **Decidere di far comandare la Board2:** decide se autorizzare o meno la Board2 a muovere il rover in base alle condizioni di fault rilevate.
- **Calcolo Riferimenti:** se Board1 attua, calcola i riferimenti di velocità lineare e angolare del rover in base ai comandi ricevuti dalla Board2 e alle condizioni di fault rilevate.

Nel seguito verranno descritti i segnali di input e output del supervisore, successivamente verranno descritte le quattro parti principali del supervisore descritte sopra.

5.2 Input

I segnali in input che riceve sono:

- **Board2_Data:** è l'ultimo snapshot di ricezione (*RxSnapshot*) aggiornato dal task di ricezione di Board1. I segnali utilizzati dal supervisore di Board 1 sono:
 - *command*: rappresenta il comando in uscita dal supervisore della Board2, che può assumere i seguenti valori:

```
typedef enum
{
    CMD_NORMAL = 0,
    CMD_ROTATE_180,
    CMD_GO_LEFT,
    CMD_GO_RIGHT,
    CMD_AVOID_RIGHT,
    CMD_AVOID_LEFT,
    CMD_STOP,
    CMD_ESTOP
} SupervisorCommand_t;
```

Figure 33: Comandi in uscita dal supervisore della Board2.

- *x_norm* & *y_norm*: rappresenta il comando utente proveniente dal joystick. Così se il comando *command* proveniente da Board 2 è *CMD_NORMAL* e la il supervisore di Board 1 non rileva anomalie, i riferimenti di velocità lineare e angolare del rover vengono rispettivamente utilizzando *x_norm* e *y_norm* ($speed_{ref} = y_{norm} \cdot MAX_SPEED$ e $steering_{cmd} = x_{norm} \cdot MAX_TURN$).
- *btn1* e *btn2*: segnalano la pressione di due pulsanti presenti sul joystick, che possono essere utilizzati per attivare la rotazione a 180 gradi.
- *yaw*: rappresenta l'angolo di orientamento del rover.
- *isMotionConsistent*: Verifica la coerenza tra la rotazione misurata dalla IMU e quella stimata dai motori, per rilevare guasti meccanici o slittamenti.

- *critical_mask* & *degraded_mask*: sono due maschere di errore a 8 bit calcolate da Board 2, in cui ogni bit indica la presenza di un'anomalia *critica* (da cui *critical_mask*) o *degradata* (da cui *degraded_mask*) specifica.
- *data_last_valid_ms*: rappresenta il tempo in millisecondi dell'ultimo dato valido ricevuto da Board 2, utilizzato per rilevare eventuali timeout nella ricezione.
- **Board_Health**: è l'ultimo snapshot di salute del sistema (*BoardHealthSnapshot*), in cui sono presenti i valori di temperatura e batteria. La struttura dati è la seguente:

```
typedef struct
{
    float temperature_degC;    /* ultima lettura valida della temperatura */
    float battery_pct;         /* ultima lettura valida della batteria */

    uint32_t task_last_run_ms; /* ultima esecuzione del task */

    uint32_t temp_last_valid_ms; /* ultima rilevazione valida della temperatura */
    uint32_t batt_last_valid_ms; /* ultima rilevazione valida della batteria */
} BoardHealthSnapshot_t;
```

Figure 34: Struttura dati Board_Health.

- **Encoder**: è l'ultimo snapshot delle velocità delle ruote (*wheel_speed_rpm*) e di eventuali anomalie riscontrate in uno dei motori (*has_no_feedback*). La struttura dati è la seguente:

```
typedef struct
{
    float wheel_speed_rpm[4];
    bool hasNoFeedback[4];

    // indica se c'è corrispondenza tra comando e lettura encoder.
    // (è Vero se la lettura encoder restituisce 0 rpm in presenza
    // di un comando di velocità valido)

    uint32_t task_last_run_ms; /* ultima esecuzione del task */
    uint32_t data_last_valid_ms[4]; /* ultimo istante in cui i dati acquisiti sono validi
                                     (uno per ogni encoder) */
} EncoderSnapshot_t;
```

Figure 35: Struttura dati Encoder.

- **now_ms**: Rappresenta il tempo corrente in millisecondi.
- **last_valid_b2_ms**: Rappresenta il tempo in millisecondi dell'ultimo volta che si è rilevato che il supervisore di Board 2 sia funzionante.

5.3 Output

I segnali in output che fornisce sono:

- **v_ref**: rappresenta il riferimento di velocità lineare del rover, in m/s.
- **omega_ref**: rappresenta il riferimento di velocità angolare del rover, in rad/s.
- **critical_mask & degraded_mask**: sono due maschere di errore a 8 bit, in cui ogni bit indica la presenza di un'anomalia *critica* (da cui critical_mask) o *degradata* (da cui degraded_mask) specifica, come descritto nella Tabella 2. Nella sezione di *RilevazioneFaults* viene descritto nello specifico cosa indicano i singoli bit di queste maschere di errore.

Bit	ID Segnale	Descrizione dell'Anomalia
0	TEMP_CRI/DEG	Temperatura fuori range o Timeout dall'ultima lettura corretta
1	BATT_CRI/DEG	Tensione batteria fuori range o Timeout dall'ultima lettura corretta
2	RX_CRI/DEG	Comunicazione con Board 2 lenta o assente
3-6	WHEEL_CRI/DEG	Encoder non funzionanti o incoerenza totale sul movimento
7	SUP_CRI/DEG	Supervisore B2 lento o assente

Table 2: Mappatura della maschera di errore a 8 bit

- **give_b2_actuation**: rappresenta un segnale booleano che indica se la Board2 deve essere autorizzata a muovere il rover.
- **actuate_emergency_stop**: rappresenta un segnale booleano che indica se il rover deve essere fermato immediatamente per evitare collisioni.
- **current_action**: rappresenta un segnale che indica l'azione attualmente intrapresa dal supervisore.

5.4 Rilevazione Faults

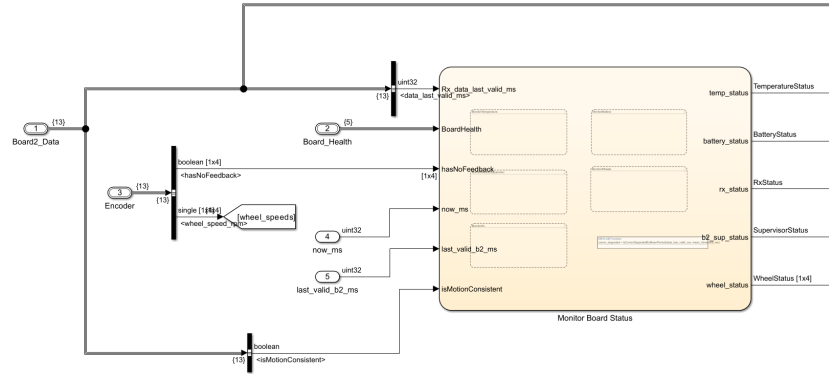


Figure 36: Chart di gestione dei faults.

L'output di questo sottosistema è rappresentato da 5 segnali, ognuno dei quali indica la presenza o meno di un'anomalia *critica* o *degradata* specifica proveniente dalla lettura dei segnali degli encoder, batteria, temperatura e comunicazione con la Board2. Di seguito si descrivono i valori che questi segnali possono assumere e le condizioni che portano a tali valori.

Table 3: Stati degradato e critico per Board 1

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
temp_status	TEMP_HEALTH_DEGRADED	Quando la temperatura è nel range $] - 15; -5] \cup [55; +60[$
	TEMP_HEALTH_CRITICAL	<ul style="list-style-type: none"> Quando la temperatura è per almeno 4s nel range $] - \infty; -15] \cup [60; +\infty[$ Nel caso in cui l'intervallo di tempo dall'ultimo aggiornamento della temperatura è di 0.5s, si ipotizza che la temperatura aumenti di 1°C/s. Se questa sale raggiungendo un valore superiore a 65°C/s si ha questo valore.

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
	TEMP_HEALTH_OK	Quando la temperatura è nel range $] - 5; 55[$
batt_status	BATT_HEALTH_DEGRADED	Quando la percentuale di batteria è minore del 23%
	BATT_HEALTH_CRITICAL	<ul style="list-style-type: none"> • Quando la temperatura è per almeno 5 s nel range $[0\%; 15\%]$ • Nel caso in cui l'intervallo di tempo dall'ultimo aggiornamento della percentuale batteria è di 0.5 s, si ipotizza che la percentuale diminuisca di 0.42%/s. Se questa diminuisce raggiungendo un valore minore a 15% si ha questo valore.
	BATT_HEALTH_OK	Quando la percentuale è $> 25\%$
wheel_status(i)	WHEEL_DEGRADED_ENCODER	Viene attivato dalla funzione <i>has_no_feedback(i)</i> quando si rileva un'assenza di impulsi dall'encoder nonostante il motore sia alimentato. Questa condizione indica un guasto al sensore o un blocco meccanico parziale. Questa condizione permette l'attivazione di una logica di recupero (<i>fallback</i>) che ricostruisce la velocità della ruota guasta basandosi sulla lettura dei sensori integri degli altri motori.

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
	WHEEL_CRITICAL_MOTOR	Questo stato viene attivato quando alla perdita del feedback dell'encoder si somma un'incoerenza tra il dato del sensore IMU e la rotazione stimata tramite l'odometria delle ruote. Tale discrepanza, rilevata dal controllo globale <i>isMotionConsistent</i> , indica che il sistema di fallback non è più in grado di garantire una stima affidabile del moto.
	WHEEL_OK	Rappresenta la condizione di pieno funzionamento del sottosistema. In questo stato, il sistema opera in assenza di anomalie sia a livello locale, dove la velocità calcolata dagli encoder risulta coerente con il comando impartito (verificato tramite <i>has_no_feedback</i>), , sia a livello globale, dove i dati del sensore IMU confermano la rotazione stimata in base agli RPM delle ruote (verificato tramite <i>isMotionConsistent</i>)

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
b2_sup_status	SUP_DEGRADED	Questo valore indica una discontinuità operativa della Board 2. Il supervisore della Board 1 monitora l'heartbeat (una variabile) del supervisore remoto, il quale incrementa il valore ogni volta che viene eseguito. Se la media degli ultimi 10 intervalli di aggiornamento superi i 40 ms, il sistema segnala uno stato di degrado del supervisore di Board 2.
	SUP_CRITICAL	Se l'intervallo di tempo dall'ultimo aggiornamento dell'heartbeat del supervisore di Board2 supera i 120 ms, imposta questo valore.
	SUP_OK	Quando non ci sono ne condizioni critiche ne degradate imposta questo valore.

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
rx_status	RX_DEGRADED	Questo valore identifica una comunicazione instabile. Sebbene il collegamento fisico sia attivo, fattori quali errori di checksum (CRC) o anomalie nella lunghezza dei pacchetti impediscono l'aggiornamento della variabile data_last_valid_ms. Il sistema monitora la qualità del link calcolando la media mobile degli ultimi 10 intervalli di ricezione valida; se tale media supera la soglia critica di 40 ms, viene segnalato il degrado della ricezione.
	RX_CRITICAL	Se l'intervallo di tempo dall'ultima ricezione corretta supera i 120 ms, imposta questo valore.
	RX_OK	Quando non ci sono ne condizioni critiche ne degradate imposta questo valore.

5.5 Decidere di far comandare la Board2

Il sottosistema per decidere se autorizzare o meno la Board2 a muovere il rover è mostrato in Figura 37.

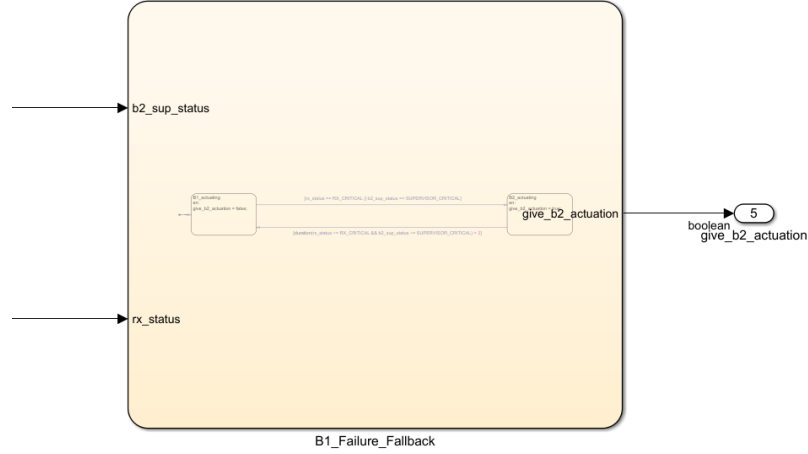
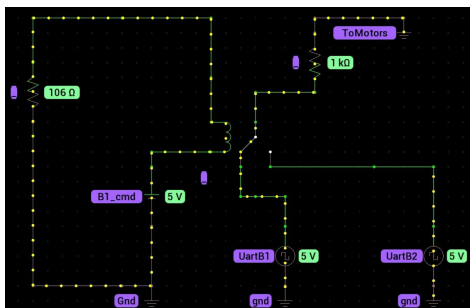


Figure 37: Chart per decidere se autorizzare o meno la Board2 a muovere il rover.

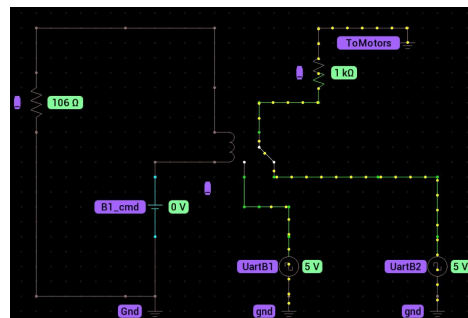
L'autorizzazione a Board 2 per il controllo del rover è regolata dalla variabile *give_b2_actuation* secondo la seguente logica:

- **give_b2_actuation = 1:** Il relè è aperto e il movimento viene gestito da Board 2. Questa condizione si ha quando sono riscontrate anomalie *critiche* in ricezione ($textit{rx_status} = RX_CRITICAL$), *supervisore* ($textit{b2_sup_status} = SUP_CRITICAL$).
- **give_b2_actuation = 0:** Il relè è chiuso e il movimento viene gestito da Board 1. Questa condizione si ha quando non sono riscontrate anomalie *critiche* in ricezione ($textit{rx_status} = RX_OK$), *supervisore* ($textit{b2_sup_status} = SUP_OK$).

Tale meccanismo agisce come un dispositivo di sicurezza hardware basato sullo stato del supervisore, come mostrato nelle Figure 38b e 38a.



(a) Il comando di Board1 chiude il rele impedendo a Board2 di muovere il rover.



(b) Board1 permette alla Board2 di muovere il rover.

5.6 Costruzione maschere degradate e critiche



Figure 39: Chart per la costruzione delle maschere di errore critiche e degradate.

Dagli stati critici e degradati rilevati nella parte di rilevamento dei faults, si costruiscono due maschere di errore a 8 bit, una per le anomalie critiche e una per quelle degradate.

Il bit di ogni maschera rappresenta un'anomalia specifica, come descritto nella Tabella 7.

Bit	Componente	critical_mask	degraded_mask
0	Temperatura	1 se TEMP_HEALT_CRITIC	1 se TEMP_HEALT_DEG
1	Batteria	1 se TEMP_HEALT_CRITIC	1 se TEMP_HEALT_DEG
2	Ricevitore (RX)	1 se RX_CRITICAL	1 se RX_DEGRADED
3	Ruota FL	1 se TEMP_HEALT_CRITIC	1 se TEMP_HEALT_DEG
4	Ruota FR	1 se TEMP_HEALT_CRITIC	1 se TEMP_HEALT_DEG
5	Ruota RL	1 se TEMP_HEALT_CRITIC	1 se TEMP_HEALT_DEG
6	Ruota RR	1 se TEMP_HEALT_CRITIC	1 se TEMP_HEALT_DEG
7	B2 Supervisor	1 se TEMP_HEALT_CRITIC	1 se TEMP_HEALT_DEG

Table 4: Mappatura dei Bit nelle Fault Masks

5.7 Calcolo riferimenti

Il sottomodello per il calcolo dei riferimenti di velocità lineare e angolare del rover è mostrato in Figura 40.

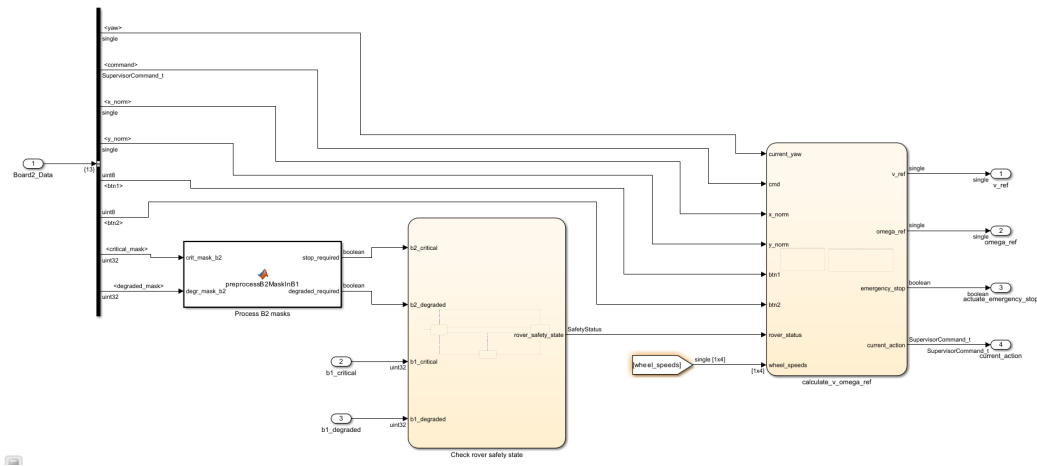


Figure 40: Chart per il calcolo dei riferimenti di velocità lineare e angolare del rover.

In particolare i riferimenti di velocità lineare e angolare del rover vengono calcolati in funzione dei comandi ricevuti dalla Board2 e delle condizioni di fault rilevate. In assenza di anomalie, i riferimenti vengono calcolati direttamente a partire dai comandi ricevuti dalla Board2, in particolare, il riferimento di velocità lineare è calcolato a partire dal comando y_{norm} e il riferimento di velocità angolare è calcolato a partire dal comando x_{norm} . Nel caso in cui siano rilevate anomalie, i riferimenti vengono calcolati in modo da ridurre la velocità del rover o addirittura fermarlo, a seconda della

gravità dell'anomalia rilevata. I riferimenti vengono scalati come mostrato in Figura 41.

```
function [V_MAX, OMEGA_MAX, V_MAX_MANEUVER, OMEGA_GO_LEFT, OMEGA_GO_RIGHT] = ...
    updateSafetyLimits(rover_state)

% ---- valori nominali ----
V_MAX      = 1.0;
OMEGA_MAX  = 1.0;
V_MAX_MANEUVER = 0.8;
OMEGA_GO_LEFT  = 0.4;
OMEGA_GO_RIGHT = -0.4;

% ---- scaling in base allo stato ----
if rover_state == SafetyStatus.SAFETY_DEGRADED

    V_MAX      = 0.5 * V_MAX;
    OMEGA_MAX  = 0.5 * OMEGA_MAX;
    V_MAX_MANEUVER = 0.5 * V_MAX_MANEUVER;
    OMEGA_GO_LEFT  = 0.5 * OMEGA_GO_LEFT;
    OMEGA_GO_RIGHT = 0.5 * OMEGA_GO_RIGHT;

elseif rover_state == SafetyStatus.SAFETY_CRITICAL

    V_MAX      = 0;
    OMEGA_MAX  = 0;
    V_MAX_MANEUVER = 0;
    OMEGA_GO_LEFT  = 0;
    OMEGA_GO_RIGHT = 0;

end

end
```

Figure 41: Scaling dei riferimenti in base alla gravità dell'anomalia rilevata.

Nella figura 41 è mostrato come i riferimenti di velocità lineare e angolare vengono scalati in base alla gravità dell'anomalia rilevata, in particolare utilizzando la variabile *safety_status* che viene calcolata a partire dalle maschere di errore critiche e degradate di entrambe le Board, come mostrato in figura 42.

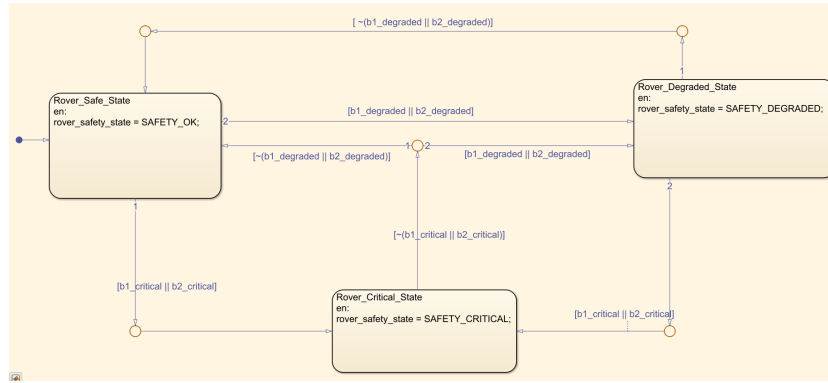


Figure 42: Calcolo della variabile `safety_status` a partire dalle maschere di errore critiche e degradate di entrambe le Board.

6 Supervisore Board 2

6.1 Panoramica generale

Il supervisore della Board 2 è implementato come un modulo Simulink denominato **SupervisorB2**, il cui schema a blocchi è illustrato in Figura 43.

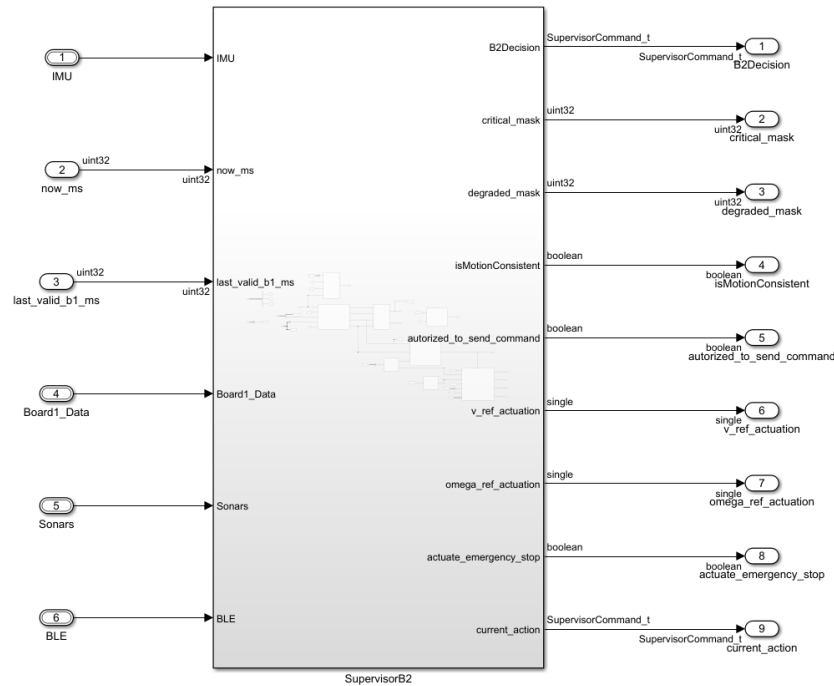


Figure 43: Schema a blocchi del modulo SupervisorB2.

Il suo compito è quello di decidere il comando di direzione *B2Decision* del rover, verificare se ci sono incoerenze tra l'angolo di direzione stimato dalla velocità delle ruote e l'IMU e, nel caso sia autorizzato, calcolare i riferimenti di velocità lineare e angolare del rover.

In particolare, esso è composto da 4 parti principali:

- **Rilevazione Faults:** si occupa di rilevare eventuali anomalie nell'ESP32, nell'IMU, nella ricezione dei dati da Board1.
- **Aggregazione Fault:** aggrega le anomalie rilevate nella parte di *rilevazione faults* e le codifica in due maschere di errore (critica e degradata).
- **Decidere se attuare:** decide se inviare il segnale di attuazione UART al rele.

- **Rilvamento ostacoli:** si occupa di rilevare la presenza di ostacoli tramite i sensori sonar e, e influenzare il comando di movimento del rover in caso di ostacoli rilevati.
- **Calcolo Riferimenti:** se autorizzato, calcola i riferimenti di velocità lineare e angolare del rover in base ai comandi ricevuti dall'utente.

Nel seguito verranno descritti i segnali di input e output del supervisore, successivamente verranno descritte le quattro parti principali del supervisore descritte sopra.

6.2 Input

I segnali in input che riceve sono:

- **Board1_Data:** è l'ultimo snapshot di ricezione (*RxSnapshot*) aggiornato dal task di ricezione di Board2. I segnali utilizzati dal supervisore di Board 2 sono:
 - *wheel_speed_rpm(i)*: è la velocità in RPM di ogni ruota.
 - *critical_mask*: è una maschera di errore a 8 bit calcolata da Board 1, in cui ogni bit indica la presenza di un'anomalia *critica* specifica.
 - *data_last_valid_ms*: rappresenta il tempo in millisecondi dell'ultimo dato valido ricevuto da Board 1, utilizzato per rilevare eventuali timeout nella ricezione.
- **IMU:** è l'ultimo snapshot (*IMUSnapshot*) di rilevamento dell'angolo yaw. la struttura dati è la seguente:

```
typedef struct
{
    uint32_t task_last_run_ms; /* ultima esecuzione del task */
    uint32_t data_last_valid_ms; /* ultimo istante in cui i dati sono validi */

    /* Accelerometer (g) */
    float ax_g;
    float ay_g;
    float az_g;

    /* Gyroscope (deg/s) */
    float gx_dps;
    float gy_dps;
    float gz_dps;

    /* Temperature (°C) */
    float temperature_degC;

    float yaw;
} IMUSnapshot_t;
```

Figure 44: Struttura dati IMU_snapshot.

- **Sonars:** è l'ultimo snapshot delle velocità delle ruote (*wheel_speed_rpm*) e di eventuali anomalie riscontrate in uno dei motori (*has_no_feedback*). La struttura dati è la seguente:

```
typedef struct
{
    uint16_t dist_cm[3];

    uint32_t task_last_run_ms; /* ultima esecuzione del task */
    uint32_t data_last_valid_ms[3]; /* ultimo istante in cui i dati sono validi */
} SonarSnapshot_t;
```

Figure 45: Struttura dati sonar_snapshot.

- **now_ms:** Rappresenta il tempo corrente in millisecondi.
- **last_valid_b1_ms:** Rappresenta il tempo in millisecondi dell'ultimo volta che si è rilevato che il supervisore di Board 1 sia funzionante.

6.3 Output

I segnali in output che fornisce sono:

- **B2Decision:** rappresenta il riferimento di velocità lineare del rover, in m/s.
- **critical_mask & degraded_mask:** sono due maschere di errore a 8 bit, in cui ogni bit indica la presenza di un'anomalia *critica* (da cui *critical_mask*) o *degradata* (da cui *degraded_mask*) specifica, come descritto nella Tabella 5. Nella sezione di *RilevazioneFaults* viene descritto nello specifico cosa indicano i singoli bit di queste maschere di errore.

Bit	ID Segnale	Descrizione dell'Anomalia
0	ESP_CRI/DEG	Timeout della comunicazione con ESP32
1	IMU_CRI/DEG	Timeout della comunicazione con il sensore IMU
2	RX_CRI/DEG	Comunicazione con Board 1 lenta o assente
3	B1.SUP_CRI/DEG	Supervisore Board 1 lento o assente
4-7	<i>Reserved</i>	Bit riservati per espansioni

Table 5: Mappatura della maschera di errore della Board 2

- **isMotionConsistent:** rappresenta un segnale booleano che indica se c'è coerenza tra la rotazione misurata dalla IMU e quella stimata dalla velocità dei motori.

- **authorized_to_send_command**: rappresenta un segnale booleano che indica se la Board2 può inviare comandi di movimento al rover.
- **v_ref_actuation**: rappresenta il riferimento di velocità lineare del rover, in RPM, calcolato dal supervisore di Board 2 in base ai comandi ricevuti dall'utente. Tale riferimento viene attuato dalla Board 2 solo se il segnale *authorized_to_send_command* è attivo.
- **omega_ref_actuation**: rappresenta il riferimento di velocità angolare del rover, in rad/s, calcolato dal supervisore di Board 2 in base ai comandi ricevuti dall'utente. Tale riferimento viene attuato dalla Board 2 solo se il segnale *authorized_to_send_command* è attivo.
- **actuate_emergency_stop**: rappresenta un segnale booleano che indica se il rover deve essere fermato immediatamente. Tale segnale viene attivato solo se il segnale *authorized_to_send_command* è attivo.
- **current_action**: rappresenta un segnale che indica l'azione attualmente intrapresa dal supervisore

6.4 Rilevazione Faults

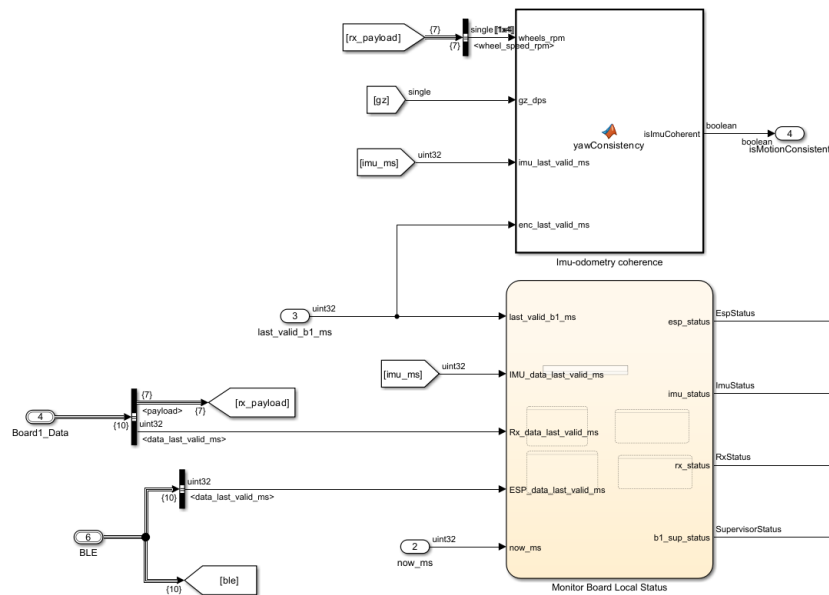


Figure 46: Chart di gestione dei faults.

L'output di questo sottosistema è rappresentato da 5 segnali, ognuno dei quali indica la presenza o meno di un'anomalia *critica* o *degradata* specifica proveniente dalla lettura dei segnali dei comandi utente ricevuti dall' ESP32, del sensore IMU e della comunicazione con Board1. Di seguito si descrivono i valori che questi segnali possono assumere e le condizioni che portano a tali valori.

Table 6: Stati degradato e critico per Board 2

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
esp_status	ESP_DEGRADED	Se la media mobile degli intervalli di ricezione dati dall'ESP32 supera la soglia di 40 ms.
	ESP_CRITICAL	Se la media mobile degli intervalli di ricezione dati dall'ESP32 supera la soglia di 120 ms.
	ESP_OK	Quando la frequenza media di aggiornamento rientra nei limiti nominali di sicurezza stabiliti.
imu_status	IMU_DEGRADED	Se la media mobile degli intervalli di aggiornamento dell'angolo di yaw dell'IMU supera i 40 ms.
	IMU_CRITICAL	Se la media mobile degli intervalli di aggiornamento dell'angolo di yaw dell'IMU supera i 120 ms.
	IMU_OK	Quando la frequenza media dei dati inerziali rientra nei parametri nominali di funzionamento.

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
b1_sup_status	SUP_DEGRADED	Questo valore indica una discontinuità operativa della Board 1. Il supervisore della Board 2 monitora l'heartbeat (una variabile) del supervisore remoto, il quale incrementa il valore ogni volta che viene eseguito. Se la media degli ultimi 10 intervalli di aggiornamento superi i 40 ms, il sistema segnala uno stato di degrado del supervisore di Board 1.
	SUP_CRITICAL	Se l'intervallo di tempo dall'ultimo aggiornamento dell'heartbeat del supervisore di Board1 supera i 120 ms, imposta questo valore.
	SUP_OK	Quando non ci sono ne condizioni critiche ne degradate imposta questo valore.

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
rx_status	RX_DEGRADED	Questo valore identifica una comunicazione instabile. Sebbene il collegamento fisico sia attivo, fattori quali errori di checksum (CRC) o anomalie nella lunghezza dei pacchetti impediscono l'aggiornamento della variabile <code>data_last_valid_ms</code> . Il sistema monitora la qualità del link calcolando la media mobile degli ultimi 10 intervalli di ricezione valida; se tale media supera la soglia critica di 40 ms, viene segnalato il degrado della ricezione.
	RX_CRITICAL	Se l'intervallo di tempo dall'ultima ricezione corretta supera i 120 ms, imposta questo valore.
	RX_OK	Quando non ci sono ne condizioni critiche ne degradate imposta questo valore.
isMotionConsistent	0	Indica che c'è una discrepanza significativa tra la rotazione misurata dalla IMU e quella stimata dalla velocità dei motori, suggerendo un possibile guasto o malfunzionamento.
	1	Indica che i dati della IMU e le stime basate sulla velocità dei motori sono coerenti, suggerendo un funzionamento normale del sistema di movimento.

6.5 Costruzione maschere degradate e critiche

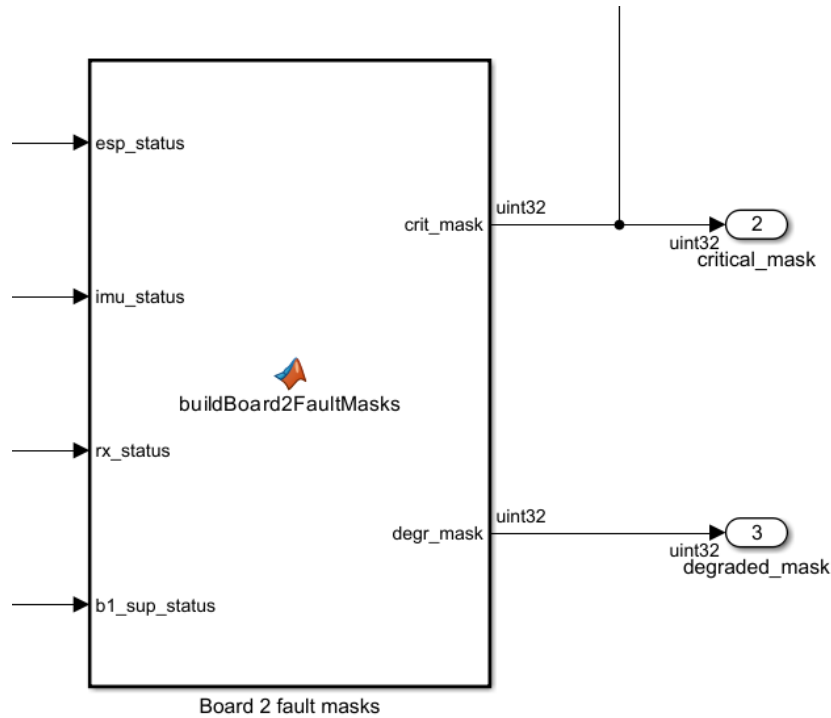


Figure 47: Chart per l'aggregazione delle faults.

Dagli stati critici e degradati rilevati nella parte di gestione faults, si costruiscono due maschere di errore a 8 bit, una per le anomalie critiche e una per quelle degradate.

Il bit di ogni maschera rappresenta un'anomalia specifica, come descritto nella Tabella 7.

Bit	Componente	critical_mask	degraded_mask
0	ESP32	1 se ESP_CRITICAL	1 se ESP_DEGRADED
1	IMU	1 se IMU_CRITICAL	1 se IMU_DEGRADED
2	Ricezione da Board 1	1 se RX_CRITICAL	1 se RX_DEGRADED
3	Supervisore Board 1	1 se SUP_CRITICAL	1 se SUP_DEGRADED
4-7	Reserved	Bit riservati per espansioni future	Bit riservati per espansioni future

Table 7: Mappatura dei Bit nelle Fault Masks di Board 2

6.6 Decidere se attuare

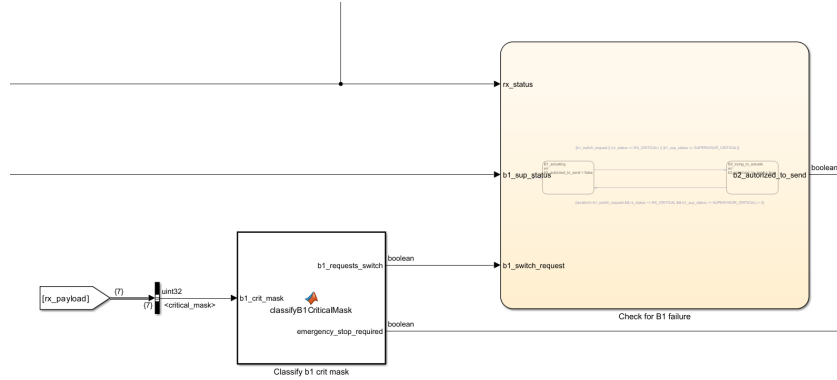


Figure 48: Chart per decidere se autorizzare o meno la Board2 a muovere il rover.

L'autorizzazione a Board 2 per il controllo del rover è regolata dalla variabile *authorized_to_send_command* secondo la seguente logica:

- **authorized_to_send_command = 1:** Board 2 è autorizzata a inviare comandi di movimento al rover. Questa condizione si ha quando sono riscontrate anomalie *critiche* in ricezione ($rx_status = RX_CRITICAL$), supervisore ($b2_sup_status = SUP_CRITICAL$), oppure quando è la stessa Board 1 che chiede a Board 2 di prendere il controllo del rover.
- **authorized_to_send_command = 0:** Board 2 non è autorizzata a inviare comandi di movimento al rover. Questa condizione si ha quando non sono riscontrate anomalie *critiche* in ricezione ($rx_status = RX_OK$), supervisore ($b2_sup_status = SUP_OK$) e quando non è la stessa Board 1 a chiedere a Board 2 di prendere il controllo del rover.

6.7 Rilevamento ostacoli

Come da specifiche, il comportamento del rover in presenza di ostacoli, deve essere regolato sulla base delle condizioni in cui può trovarsi:

1. Stato non degradato

- **Distanza dell'ostacolo ≤ 70 cm:** il rover deve fermarsi immediatamente per evitare collisioni.
- **Ostacolo a distanza > 100 cm in movimento tra due sonar:** il rover deve determinare la direzione dell'ostacolo e deve deviare

il percorso di conseguenza in direzione del sonar che per prima ha rilevato l'ostacolo.

2. Stato degradato

- **Distanza dell'ostacolo ≤ 300 cm:** il rover deve fermarsi immediatamente per evitare collisioni.

In seguito verranno mostrati i chart realizzati per la gestione delle due casistiche.

6.7.1 Gestione ostacoli con sistema in stato *non degradato*

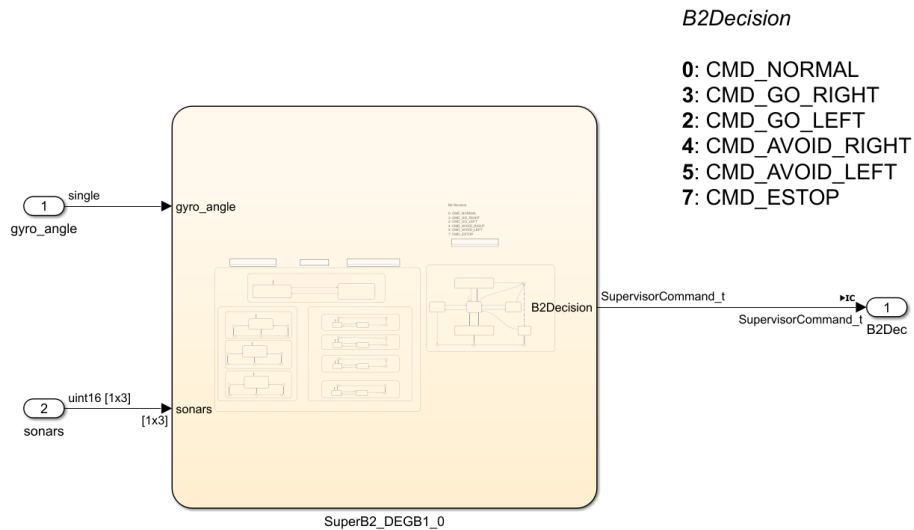


Figure 49: Logica di gestione degli ostacoli in stato non degradato.

Il chart per la gestione degli ostacoli in stato non degradato è mostrato in Figura 50.

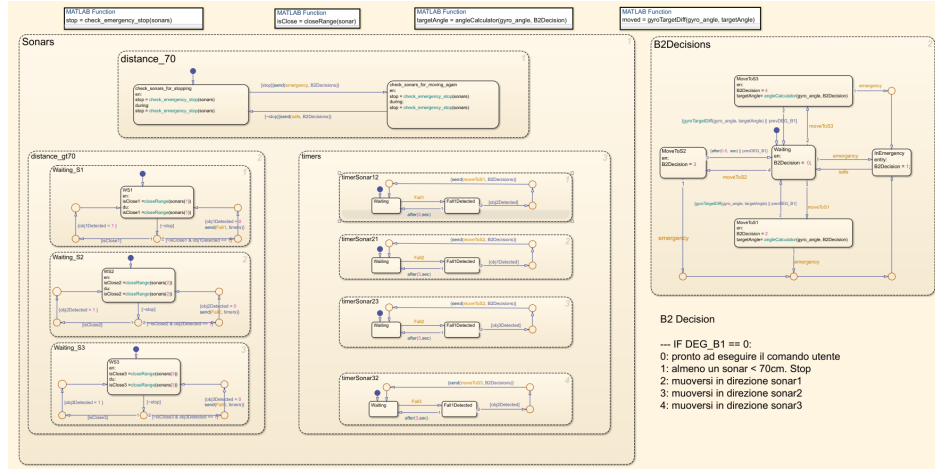
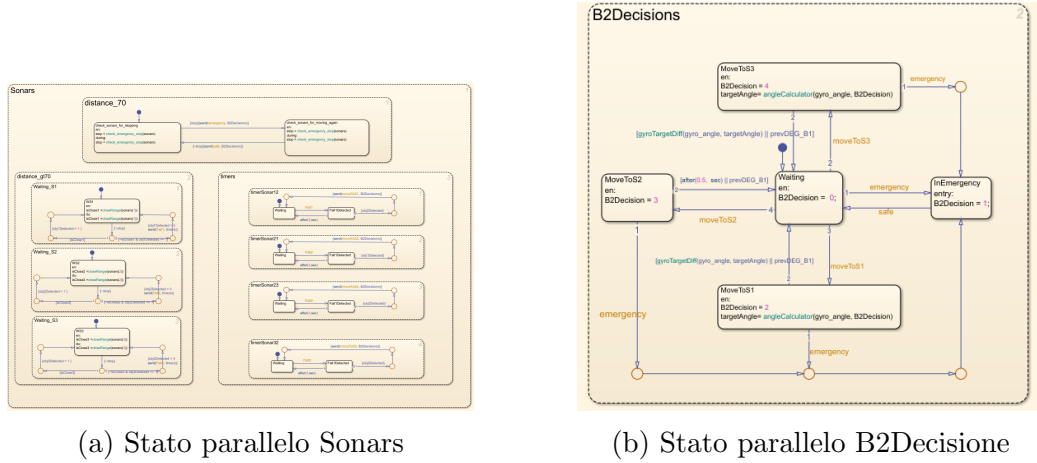


Figure 50: Chart di gestione ostacoli in stato non degradato.

In particolare, il chart è composto da 2 stati paralleli: *Sonars* e *B2Decisione*



(a) Stato parallelo Sonars

(b) Stato parallelo B2Decisione

Figure 51: Stati paralleli del chart in stato non degradato.

1. **B2Decisions:** Lo stato parallelo *B2Decisione* è dipendente dallo stato *Sonars* in quanto le sue transizioni vengono attivate da segnali provenienti da *Sonars*. In base ai segnali ricevuti, è capace di settare la variabile di output del chart, variabile che indica la decisione presa dal supervisore. Quindi, in questo stato si determina l'output del chart, che è un numero che varia da 0 a 4. Le azioni possibili includono l'arresto immediato del rover o la deviazione del percorso in base alla posizione dell'ostacolo. In quest'ultimo caso, la deviazione dura fintanto che il rover non ruota di 45° rispetto alla direzione iniziale, verso la direzione del sonar che per primo ha rilevato l'ostacolo.

2. **Sonars**: All'interno di questo stato parallelo sono presenti altri 3 stati paralleli.

- (a) **distance_70**: Rappresenta la condizione in cui uno dei sonar rileva un ostacolo a una distanza ≤ 70 cm.

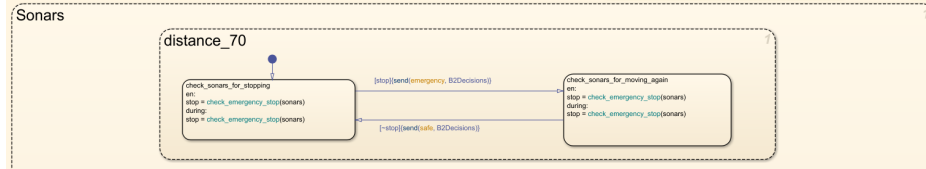


Figure 52: Stato parallelo per la gestione di un ostacolo a distanza ≤ 70 cm.

In questo stato quando uno dei sonar rileva un ostacolo a una distanza inferiore o uguale a 70 cm, viene attivata una transizione che porta allo stato di arresto immediato del rover. In particolare, quando un sonar rileva la presenza di un ostacolo a distanza ≤ 70 cm, viene inviato un segnale **Emergency** allo stato parallelo *B2Decisione* per fermare il rover. B2Decision utilizza questo segnale per portarsi nello stato in cui l'output del chart prevede lo stop.

- (b) **distance_gt70** —- **timers**: Questi due stati insieme permettono il rilevamento di un ostacolo in movimento tra le coppie di sonar
- *S1-S2* (tra sonar di sinistra e sonar centrale)
 - *S2-S1* (tra sonar centrale e sonar di sinistra)
 - *S2-S3* (tra sonar centrale e sonar di destra)
 - *S3-S2* (tra sonar di destra e sonar centrale)

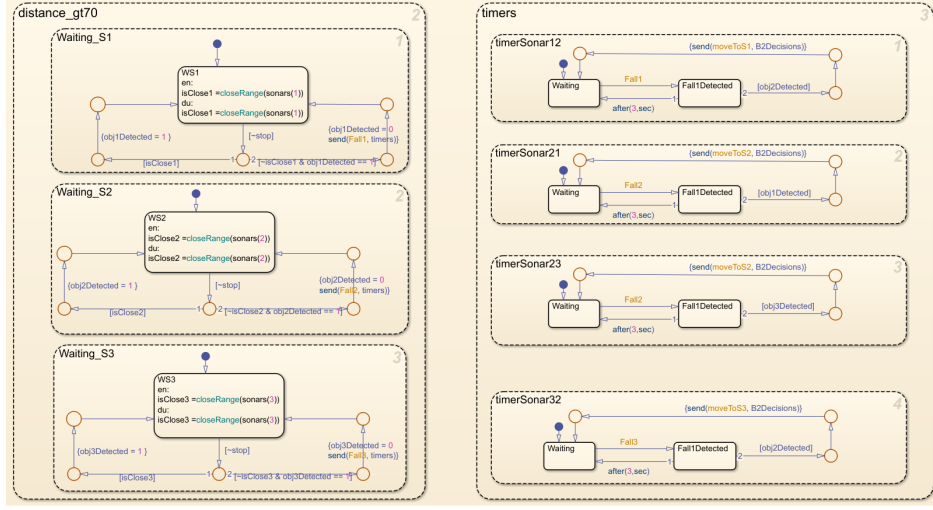


Figure 53: Stato parallelo per la gestione di un ostacolo in movimento a distanza > 70 cm.

Nello stato *distance_gt70* sono presenti 3 stati paralleli, *Waiting_S1*, *Waiting_S2*, *Waiting_S3*, uno per ogni sonar.

Di seguito si analizza la dinamica di rilevamento di un ostacolo che si sposta dal sonar *S1* verso il sonar *S2*. Tale logica è da considerarsi valida per ogni coppia di sensori precedentemente elencata. Si assume, come condizione necessaria, l'assenza di ostacoli a una distanza inferiore a 70 cm; in caso contrario, il sistema non procederebbe al rilevamento di oggetti in movimento.

- i. **Attivazione (*S1*):** Quando il sonar *S1* rileva un oggetto entro il range 100–300 cm, la variabile *obj1Detected* viene impostata a 1 (**fronte di salita**).
- ii. **Transizione e Timing:** Nel momento in cui l'oggetto esce dal campo d'azione di *S1*, la variabile *obj1Detected* torna a 0 (**fronte di discesa**). Contestualmente, lo stato *timerSonar12* del modulo *timers* avvia un conteggio di 3 secondi.
- iii. **Verifica (*S2*):** Se il sonar *S2* rileva l'ostacolo (sempre tra 100 e 300 cm) entro la finestra temporale dei 3 secondi, viene inviato il segnale *moveToS1* allo stato parallelo *B2Decision*. Qualora il timer scada senza alcun rilevamento da parte di *S2*, non viene trasmesso alcun segnale.

6.7.2 Gestione ostacoli con sistema in stato *degradato*

Il chart per la gestione degli ostacoli in stato degradato è mostrato in Figura 54.

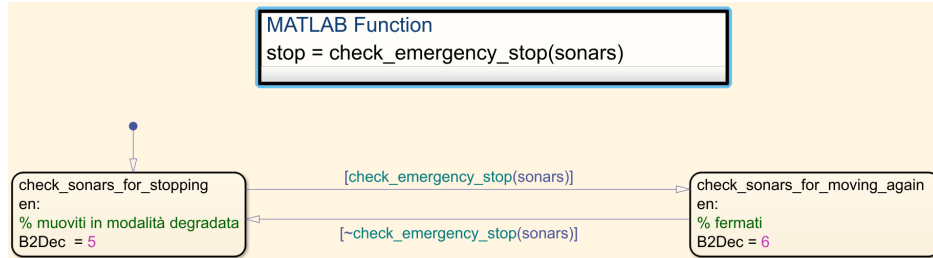


Figure 54: Chart di gestione ostacoli in stato degradato.

In questo caso, la logica di gestione degli ostacoli è semplificata rispetto allo stato non degradato. Infatti, l'unica condizione considerata è la presenza di un ostacolo a una distanza inferiore o uguale a 300 cm. Quando uno dei sonar rileva un ostacolo entro questo range, viene attivata una transizione che porta l'uscita del supervisore all'arresto immediato del rover.

6.8 Attuazione

L'attuazione della Board 2 avviene esclusivamente in modalità degradata, coerentemente con il suo ruolo di Slave. Nello specifico, la Board 2 è autorizzata a prendere il controllo del rover solo quando si verificano determinate condizioni critiche sulla Board 1: il riscontro di anomalie gravi nella ricezione dei dati (`rx_status = RX_CRITICAL`), errori critici nel modulo di supervisione (`b2_sup_status = SUP_CRITICAL`), oppure nel caso in cui la stessa Board 1 invii una richiesta esplicita di cessione del controllo. Ciò indica che, nonostante la Board 2 sia ad attuare, la comunicazione tra le due board potrebbe essere ancora attiva, e in particolare Board 1 invia il proprio payload che include velocità delle ruote e maschere di errore.

