

Supervisori

Febbraio 2026

Contents

1 Specifiche	4
1.1 Condizioni di funzionamento nominale	4
Rilevamento ostacoli	4
1.2 Condizioni di funzionamento critico o degradato	5
Meccanismo di rilevazione dei guasti	5
Encoder non funzionanti	6
Board 2 non riceve	7
2 Funzionamento generale del software di ciascuna board	9
2.1 Interazione tra Task e Meccanismo di Snapshot	9
2.2 Funzionamento task di Board 2	11
2.2.1 Task: acquisizione distanza dagli ostacoli	11
Utilizzo DMA per la lettura dei segnali	12
2.2.2 Task: lettura comandi utente	14
2.2.3 Task: lettura giroscopio	16
2.2.4 Task: supervisore Board 2	17
2.2.5 Task: log dei dati per il debug	21
2.3 Funzionamento task di Board 1	22
2.3.1 Task: lettura batteria e temperatura	22
2.3.2 Task: supervisore Board 1	24
2.3.3 Task: controllo motori	27
2.3.4 Task: log dei dati per il debug	27
2.3.5 Task: led	28
2.4 Task di trasmissione e ricezione tra le due Board	29
3 Supervisore Board 1	31
3.1 Panoramica generale	31
3.2 Input	32
3.3 Output	33
3.4 Rilevazione Faults	34
3.5 Decidere di far comandare la Board2	38
3.6 Costruzione maschere degradate e critiche	40
3.7 Calcolo riferimenti	41
4 Supervisore Board 2	44
4.1 Panoramica generale	44
4.2 Input	45
4.3 Output	45
4.4 Rilevamento ostacoli	45

4.4.1	Gestione ostacoli con sistema in stato <i>non degradato</i>	46
4.4.2	Gestione ostacoli con sistema in stato <i>degradato</i>	49

1 Specifiche

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 1 è mostrata l'architettura generale del sistema.

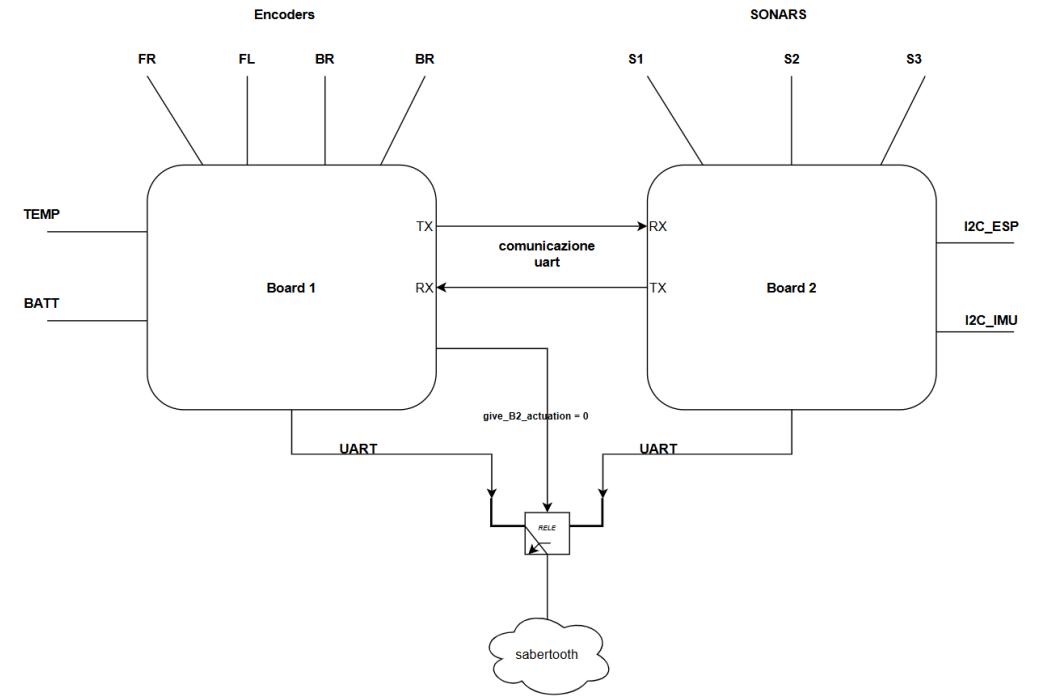


Figure 1: Architettura generale del sistema.

1.1 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 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.

1.2 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 l'intervallo di tempo tra due letture *corrette* di sensori o periferiche. Ogni Board legge i propri sensori e considera la lettura "corretta" quando la funzione software dedicata restituisce uno stato di successo. Ogni volta che viene convalidata una lettura, il sistema aggiorna un timestamp di riferimento.

Ogni Board reagisce in base al superamento di soglie temporali predefinite:

- **Soglia di allerta:** se l'intervallo tra due letture valide supera un primo limite temporale, il sistema entra in modalità degradata.
- **Soglia massima:** se l'intervallo supera un secondo limite temporale più elevato, il guasto è considerato irreversibile e il sistema passa in modalità critica.

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.

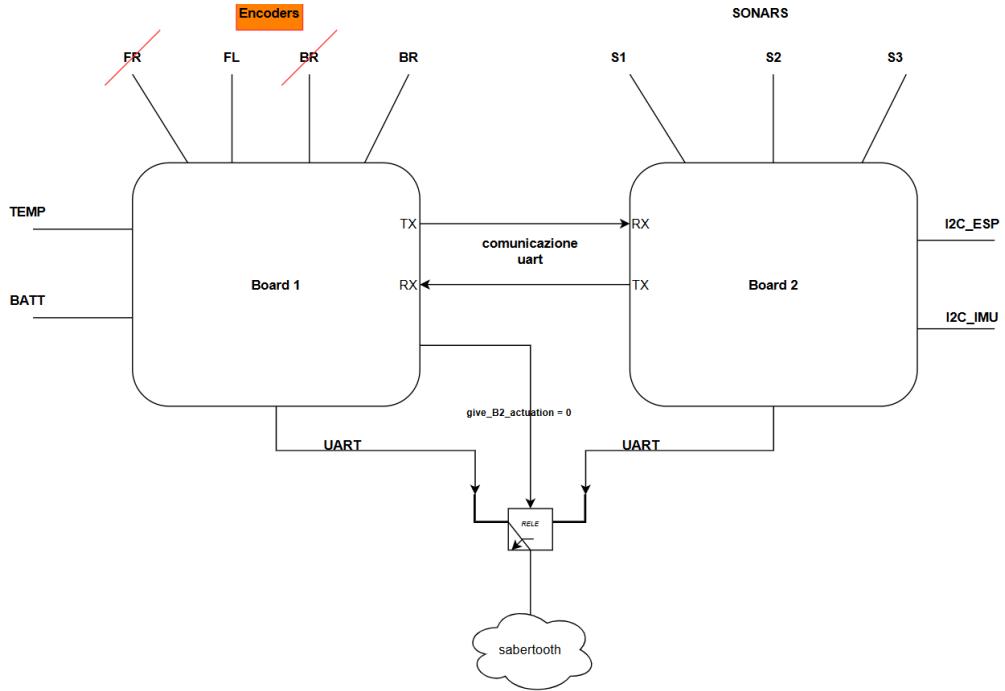


Figure 2: Logica di sostituzione in presenza di encoder non funzionanti.

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

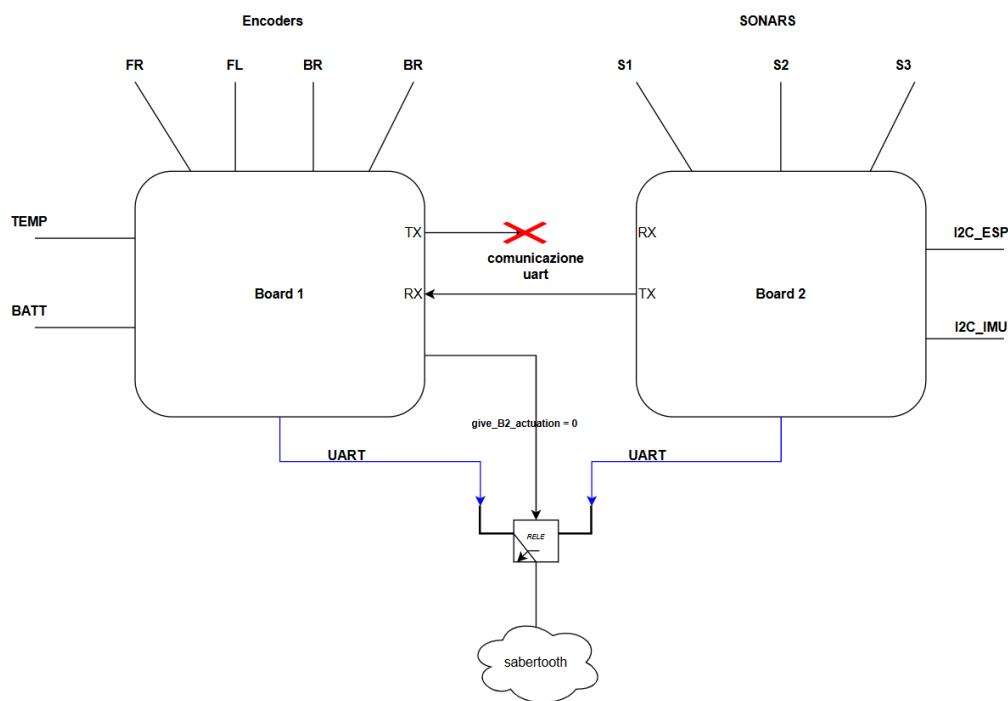


Figure 3: Board 2 non riceve dati dalla Board 1.

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, perché 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.

2 Funzionamento generale del software di ciascuna board

2.1 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 4 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 legge i scrive i propri snapshot, come illustrato nella Figura 5.

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.

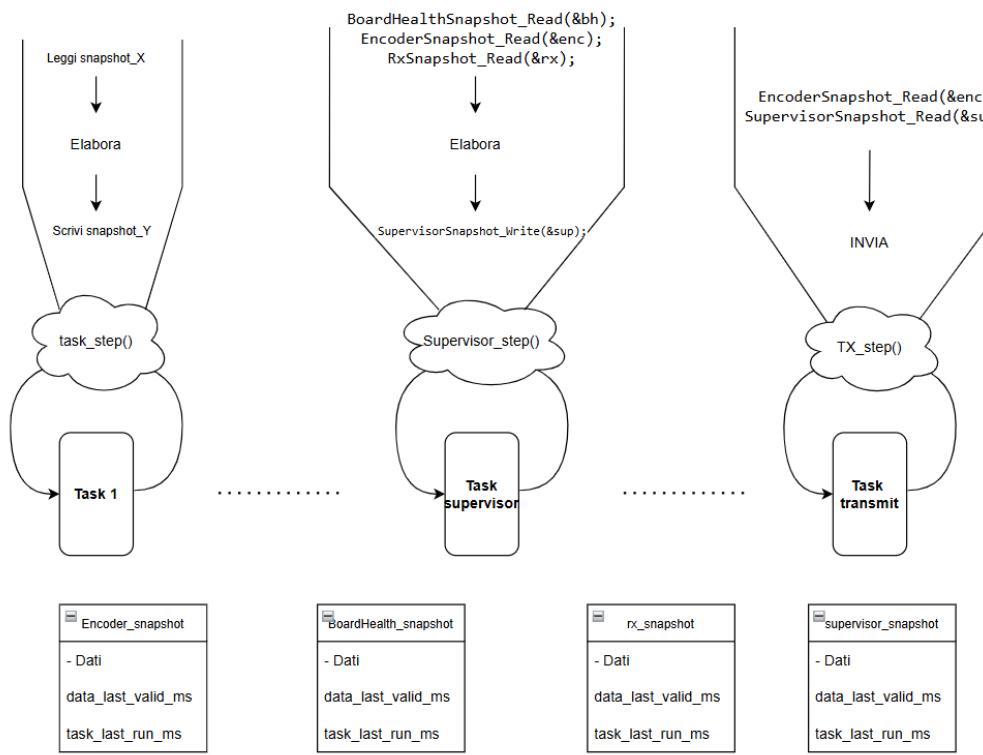


Figure 4: Funzionamento generale del software di Board 1.

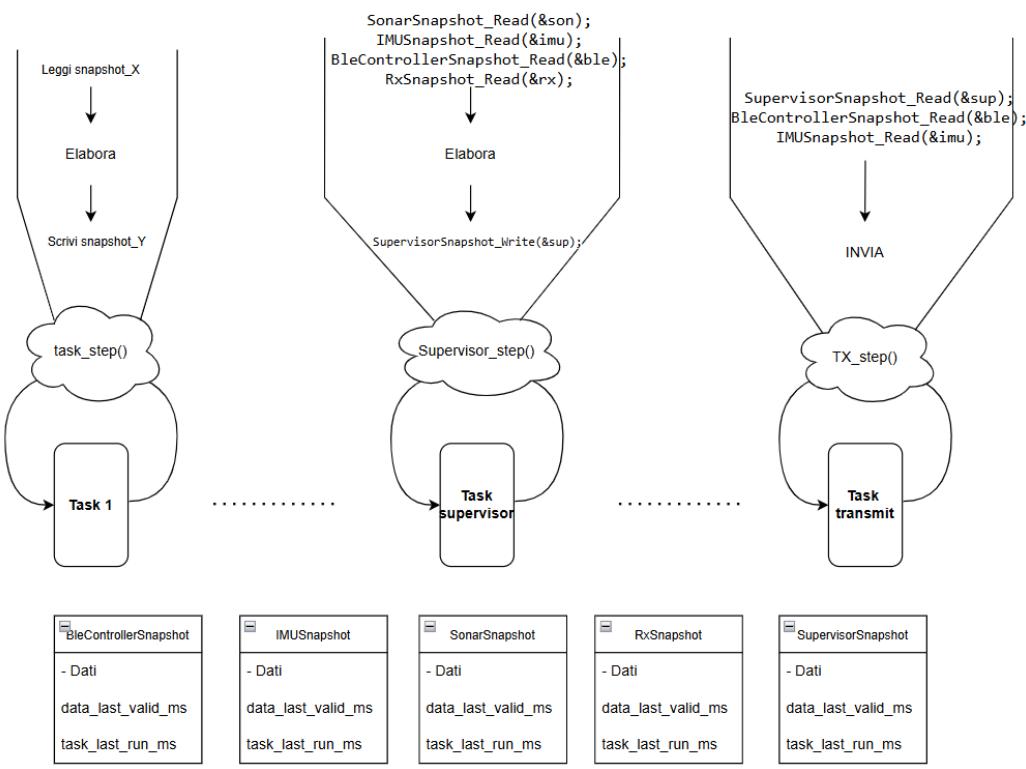


Figure 5: Funzionamento generale del software di Board 2.

2.2 Funzionamento task di Board 2

2.2.1 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 6.

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

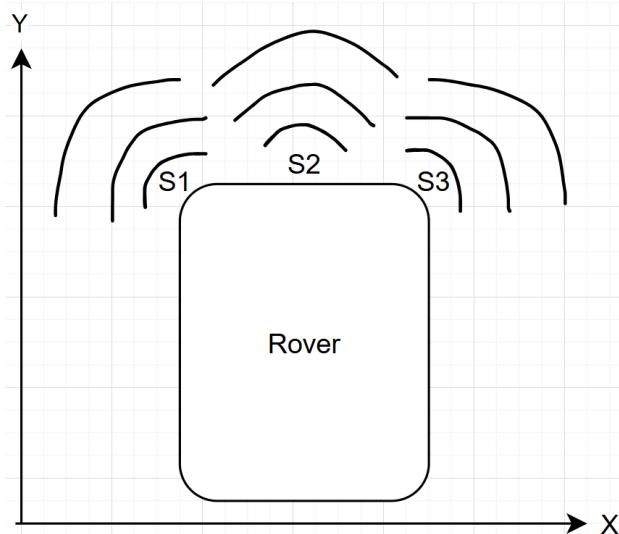


Figure 6: Disposizione dei sensori sulla Board 2.



Figure 7: 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.

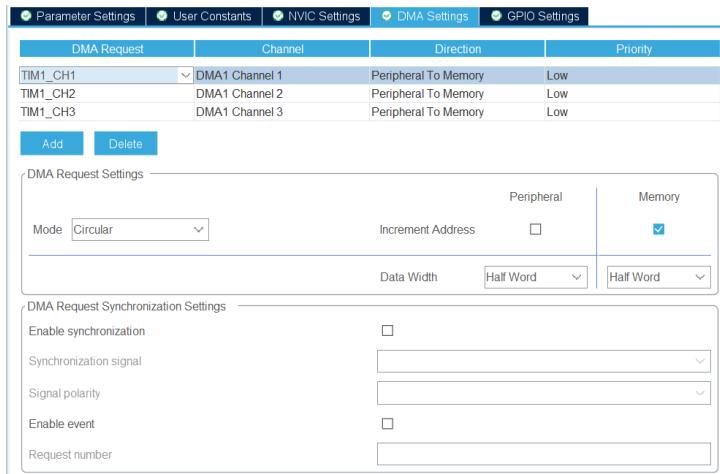


Figure 8: Configurazione del DMA per la lettura dei segnali dai sensori.

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 9 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 9: 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 10.

```

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 10: Struttura dati dello snapshot SonarsSnapshot.

2.2.2 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 **I2Ce** li integra nello snapshot **BleControllerSnapshot**. In Figura 11 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 11: 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 12 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 12: Struttura dati dello snapshot BleControllerSnapshot.

2.2.3 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 13).

```

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 13: Struttura dati dello snapshot IMUSnapshot.

2.2.4 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 14 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 14: 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_ESTOP*. 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.

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 controllo attivo dei motori passa alla Board 2 se:

- La Board 1 segnala un guasto interno tramite il proprio payload, autorizzando uno switch di attuazione.
- Viene rilevato un timeout critico nella ricezione dei dati dalla Board 1 (> 150 ms).
- Il supervisore della Board 1 funziona in maniera discontinua.

La descrizione di come l'attuazione possa essere effettuata da Board 2 in caso di anomalie nella comunicazione tra le due Board sarà descritto in seguito.

In Figura 15 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 15: 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 16:

```

/* ===== 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 16: Snapshot del supervisore di Board 2

2.2.5 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 21, 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 17: Step del task dedicato alla stampa dei dati per scopi di debug.

2.3 Funzionamento task di Board 1

2.3.1 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 18 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 18: 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

2.3.2 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 19 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 19: 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 manore 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 ridondanza 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 decider dove andare e se deviare il percorso o addirittura fermarsi.

Lo snapshot del supervisore di Board 1 è mostrato in Figura 20.

```
/* ===== 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 20: Step del task del supervisore della Board 1.

2.3.3 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 rilvano 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.

2.3.4 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 21, 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 21: Step del task dedicato alla stampa dei dati per scopi di debug.

2.3.5 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).

2.4 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 22 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.

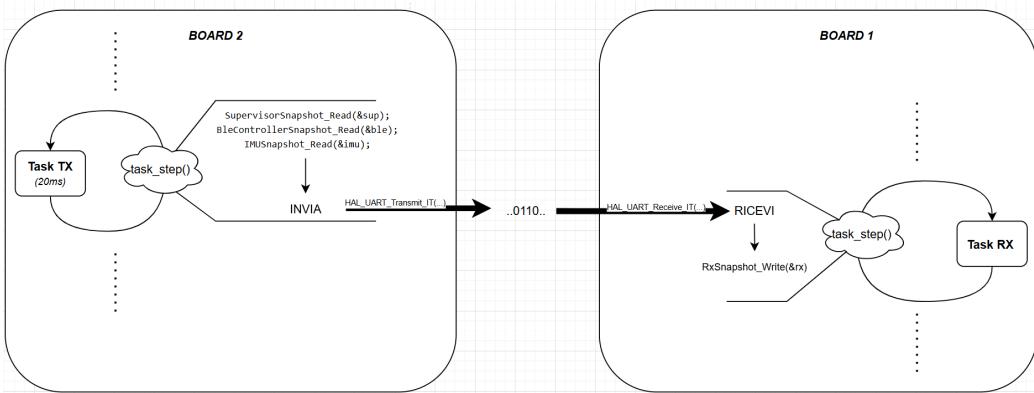


Figure 22: Interazione tra i task di trasmissione della Board 2 e ricezione della Board 1.

Allo stesso modo, nella Figura 23 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.

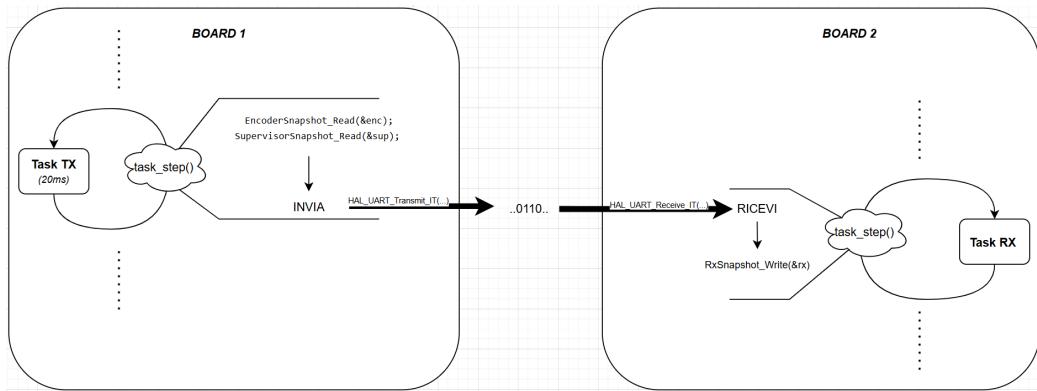


Figure 23: Interazione tra i task di trasmissione della Board 1 e ricezione della Board 2.

3 Supervisore Board 1

3.1 Panoramica generale

Il supervisore della Board 1 è implementato come un modulo Simulink denominato **SupervisorB1**, il cui schema a blocchi è illustrato in Figura 24.

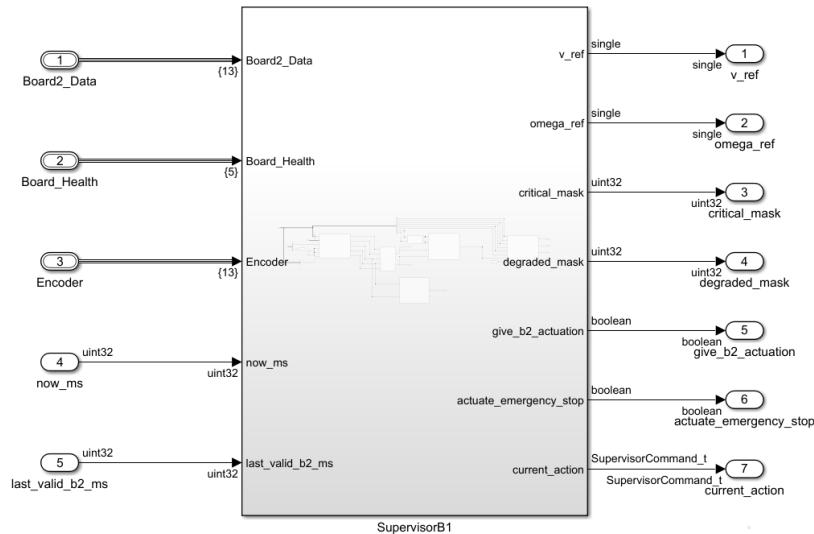


Figure 24: Schema a blocchi del modulo SupervisorB1.

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 Fuault:** 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.

3.2 Input

I segnali in input che riceve sono:

- **Board2_Data**: è l'ultimo snapshot di ricezione (*RxSnapshot*) aggiornato dal task di ricezione di Board1. Alcuni dei 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 25: 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 $steering_cmd = x_norm \cdot MAX_TURN$).
- *yaw*: rappresenta l'angolo di orientamento del rover, calcolato a partire dai dati provenienti dalla Board2.
- *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.

- **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 26: 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];          // indica se c'è corrispondenza tra comando e lettura encoder.
    bool hasNoFeedback[4];              // (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 27: Struttura dati Encoder.

- **now_ms**: Rappresenta il tempo corrente in millisecondi.
- **last_valid_b2_ms**: Rappresenta il tempo in millisecondi dell'ultimo dato valido ricevuto dalla Board2.

3.3 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.

Bit	ID Segnale	Descrizione dell'Anomalia
0	TEMP_CRI/DEG	Temperatura fuori range o monitoraggio temperatura assente
1	BATT_CRI/DEG	Tensione batteria fuori range o monitoraggio tensione assente
2	COMM_CRI/DEG	Comunicazione lenta o assente
3-6	WHEEL_CRI/DEG	Guasti attuatori (FL, FR, RL, RR)
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.

3.4 Rilevazione Faults

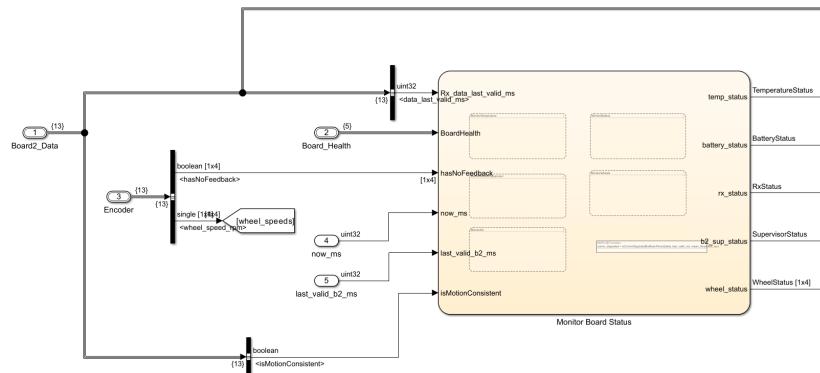


Figure 28: Chart di gestione dei faults.

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 $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$. Se questa sale raggiungendo un valore superiore a $65^{\circ}\text{C}/\text{s}$ si ha questo valore.
	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 5s nel range $[0\%; 15\%]$ • Nel caso in cui l'intervallo di tempo dall'ultimo aggiornamento della percentuale batteria è di 0.5s, si ipotizza che la percentuale diminuisca di $0.42\%/\text{s}$. Se questa diminuisce raggiungendo un valore minore a 15% si ha questo valore.
	BATT_HEALTH_OK	Quando la percentuale è $> 25\%$

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
wheel_status(i)	WHEEL_DEGRADED_ENCODER	<p>Viene attivato dalla funzione $has_no_feedback(i)$ 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.</p>
	WHEEL_CRITICAL_MOTOR	<p>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.</p>

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
	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>)
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.

OUTPUT	VALORE	SIGNIFICATO
	SUP_OK	Quando non ci sono ne condizioni critiche né degradate imposta questo valore.
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 né degradate imposta questo valore.

3.5 Decidere di far comandare la Board2

Il sottosistema per decidere se autorizzare o meno la Board2 a muovere il rover è mostrato in Figura 29.

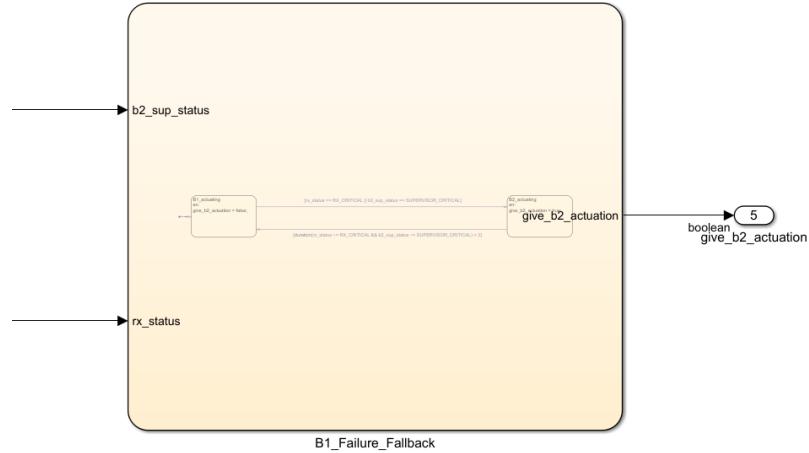
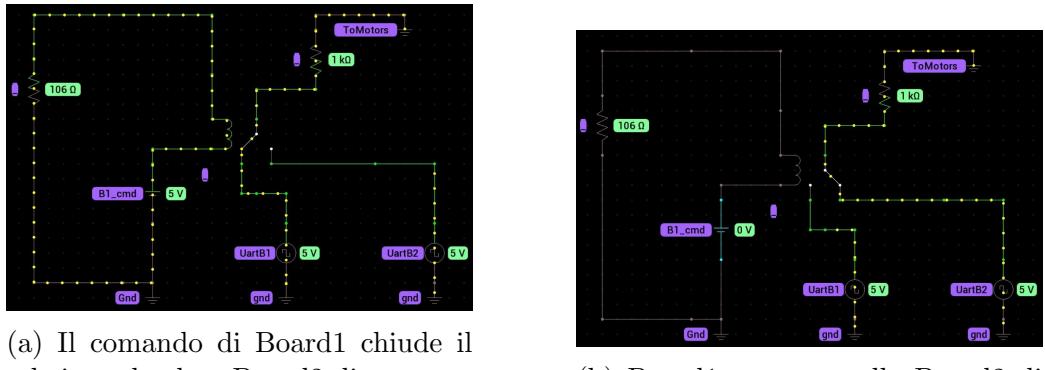


Figure 29: Chart per decidere se autorizzare o meno la Board2 a muovere il rover.

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 (`texttrx_status = RX_CRITICAL`), supervisore (`textitb2_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 (`texttrx_status = RX_OK`), supervisore (`textitb2_sup_status = SUP_OK`).

Tale meccanismo agisce come un dispositivo di sicurezza hardware basato sullo stato del supervisore, come mostrato nelle Figure 30b e 30a.



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

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

3.6 Costruzione maschere degradate e critiche

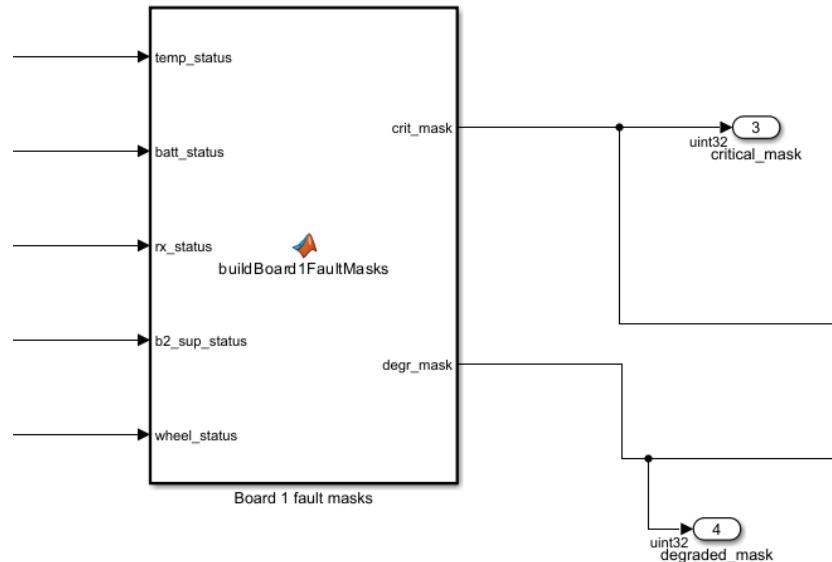


Figure 31: Chart per la costruzione delle maschere di errore critiche e degradate.

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 2.

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

3.7 Calcolo riferimenti

Il sottomodello per il calcolo dei riferimenti di velocità lineare e angolare del rover è mostrato in Figura 32.

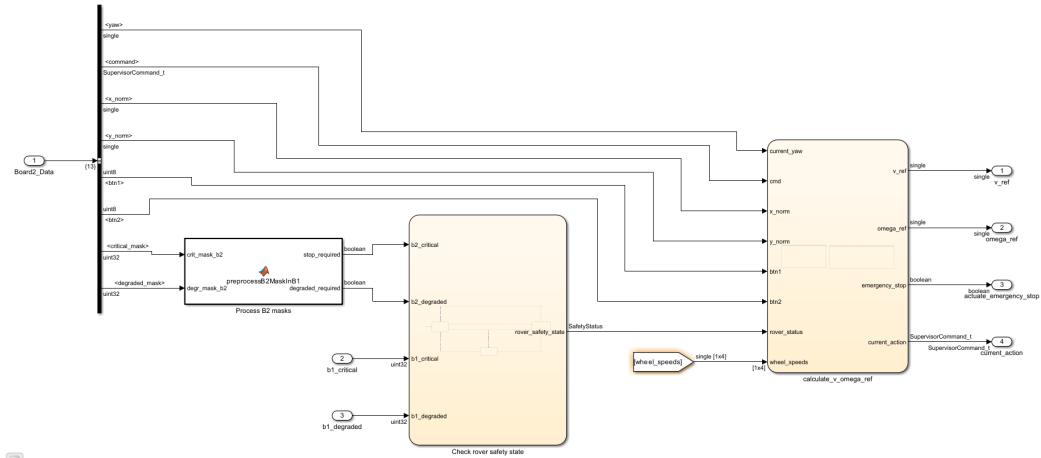


Figure 32: Chart per il calcolo dei riferimenti di velocità lineare e angolare del rover.

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 33.

```

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

Nella figura 33 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 34.

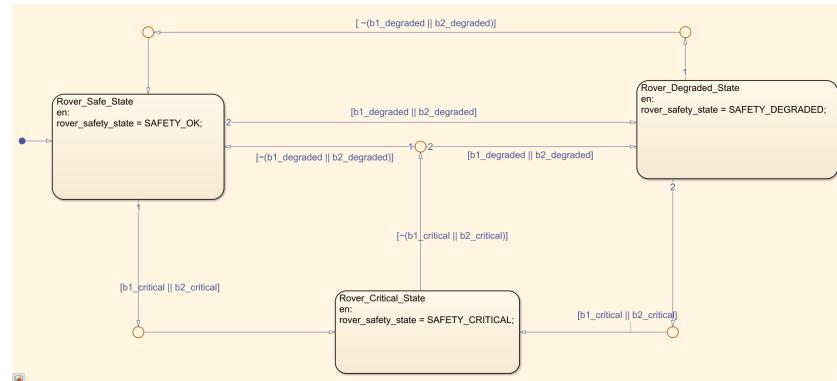


Figure 34: Calcolo della variabile safety_status a partire dalle maschere di errore critiche e degradate di entrambe le Board.

4 Supervisore Board 2

4.1 Panoramica generale

Il supervisore della Board 2 è implementato come un modulo Simulink denominato **SupervisorB2**, il cui schema a blocchi è illustrato in Figura 35.

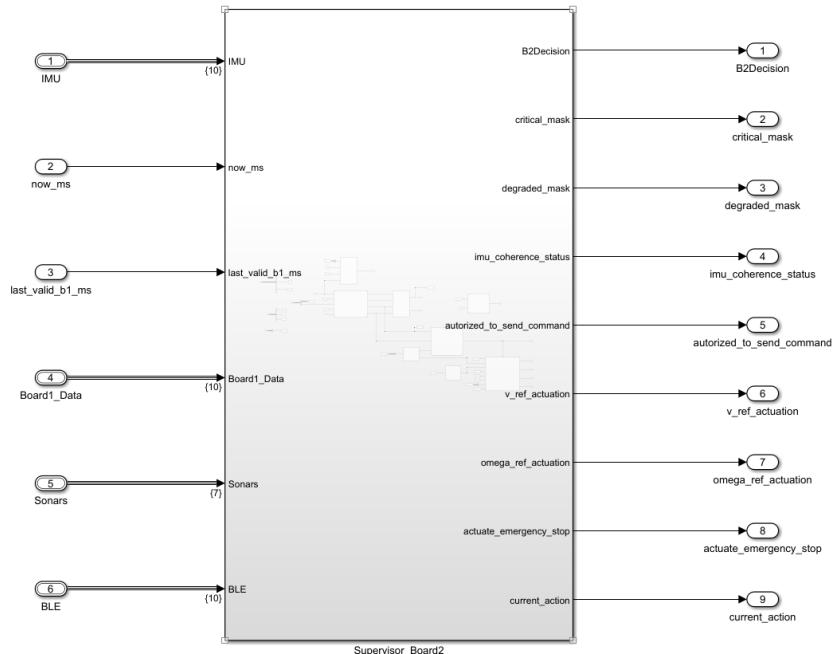


Figure 35: Schema a blocchi del modulo SupervisorB2.

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 3 parti principali:

- **Gestione Faults:** si occupa di rilevare e gestire eventuali anomalie nei dati ricevuti dalla Board1, dagli encoder delle ruote, dai sensori di temperatura e batteria.
- **Decidere di far comandare la Board2:** decide se autorizzare o meno la Board2 a muovere il rover, in base alle condizioni di fault rilevate.
- **Aggregazione Fuault:** aggrega le anomalie rilevate nella parte di gestione faults e le codifica in due maschere di errore (critica e degradata).

- **Calcolo Riferimenti:** 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 tre parti principali del supervisore descritte sopra.

4.2 Input

I segnali in input che riceve sono:

4.3 Output

I segnali in output che fornisce sono:

4.4 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 rilievato 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.

4.4.1 Gestione ostacoli con sistema in stato *non degradato*

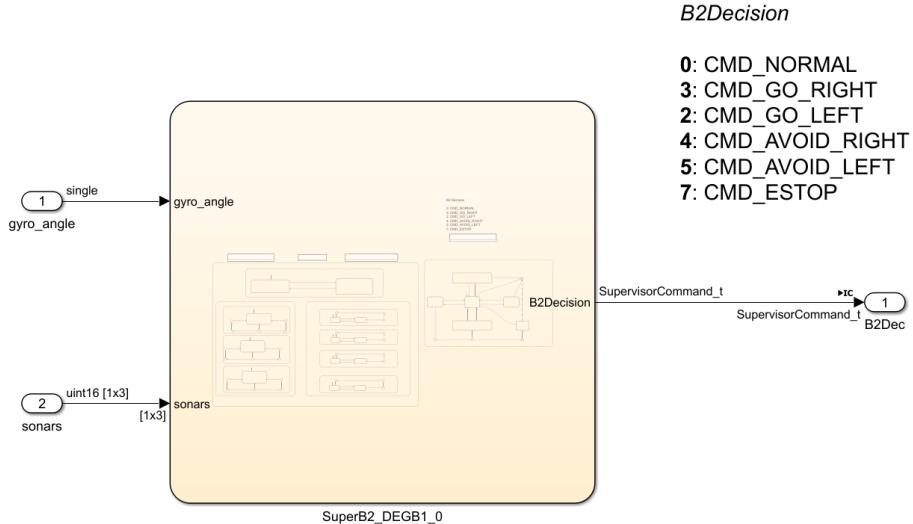


Figure 36: Logica di gestione degli ostacoli in stato non degradato.

Il chart per la gestione degli ostacoli in stato non degradato è mostrato in Figura 37.

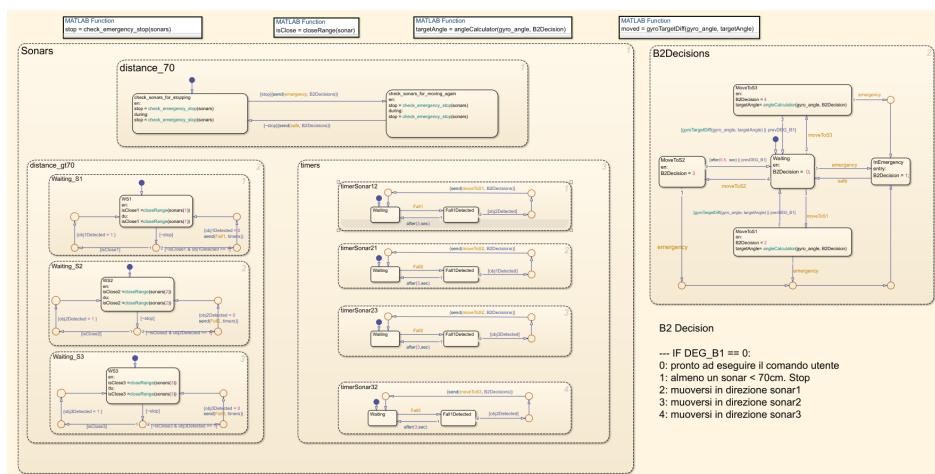
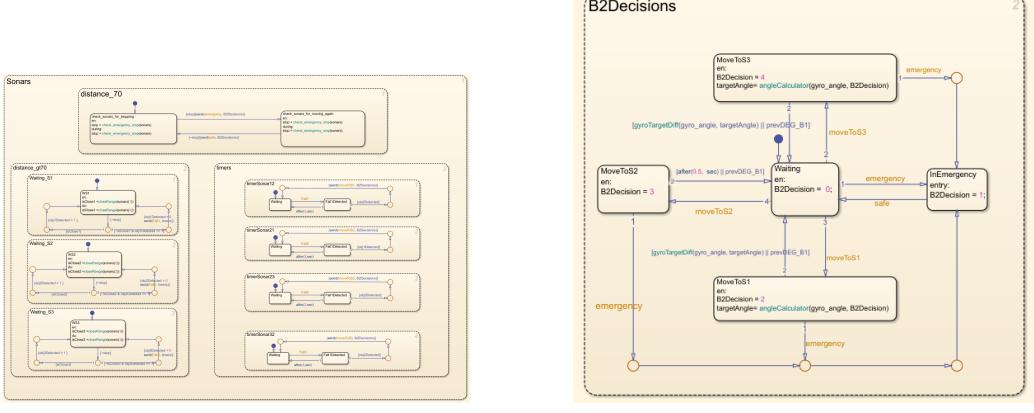


Figure 37: Chart di gestione ostacoli in stato non degradato.

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

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



(a) Stato parallelo Sonars

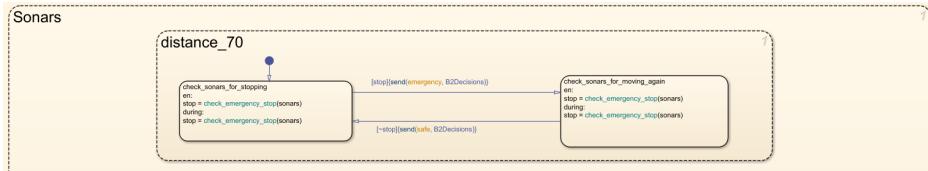
(b) Stato parallelo B2Decisione

Figure 38: Stati paralleli del chart in stato non degradato.

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 39: 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

segna 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)

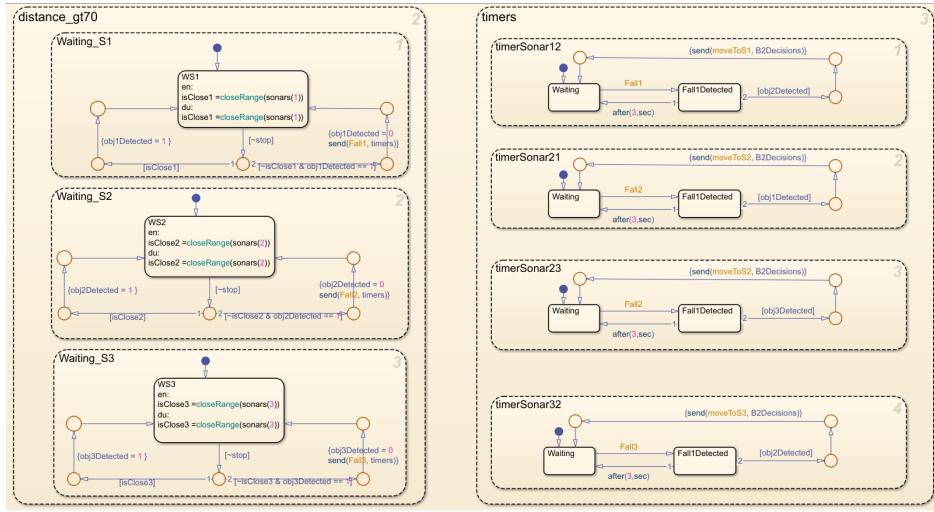


Figure 40: Stato parallelo per la gestione di un ostacolo in movimento a distanza > 70 cm.

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 S_2 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 S_2 , non viene trasmesso alcun segnale.

4.4.2 Gestione ostacoli con sistema in stato *degradato*

Il chart per la gestione degli ostacoli in stato degradato è mostrato in Figura 41.

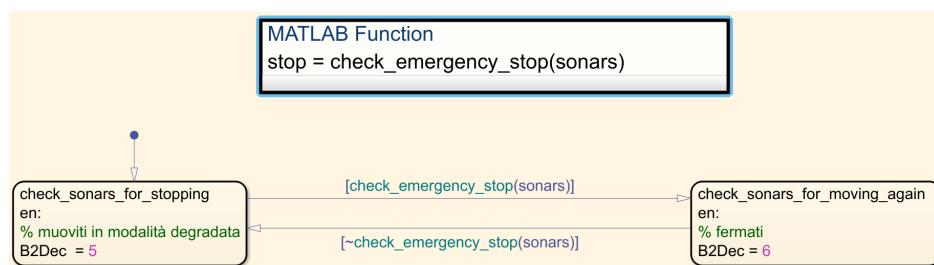


Figure 41: Chart di gestione ostacoli in stato degradato.

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.