





**ABSTRACT**



---

## INDICE

---

1	Stato dell'Arte	9
1.1	Sistemi Ferroviari e Ferrotramviari	9
1.2	Il problema del posizionamento	10
1.3	Verso ETCS-3	12
2	Architettura di Sistema	15
2.1	Descrizione generale	15
2.2	Constituent Systems	16
2.3	Specifiche delle Interfacce	18
2.3.1	Relied Upon Interfaces	18
2.3.2	Altre Interfacce	20
2.4	Interazioni	20
2.4.1	Acquisizione dei dati	21
2.4.2	Trasmissione della posizione	21
3	Ambiente di Analisi	23
3.1	Interfaccia utente	23
3.2	Acquisizione delle misure	24
3.3	Monitoring	25
4	Esperimenti e Risultati	31
5	Conclusioni	33



---

## ELENCO DELLE TABELLE

---

Tabella 1      Specifica delle RUPI del sistema      19



---

## ELENCO DELLE FIGURE

---

Figura 1	Schema di un tipico scenario ferrotramviario	10
Figura 2	Livelli ETCS	12
Figura 3	Schema SFA	15
Figura 4	<i>Inertial Measurment Unit</i>	17
Figura 5	Ricevitore GPS ublox EVK-M8T	17
Figura 6	Nvidia TX-Jetson	18
Figura 7	Modem TP-LINK M7350 LTE-4G	19
Figura 8	RUMI	20
Figura 9	Sequenza di acquisizione dati	21
Figura 10	Interfaccia RTT	23
Figura 11	Schema database tracce	25
Figura 12	Pannello di configurazione per generatore IMU	26
Figura 13	Pannello di configurazione sensore inerziale	27
Figura 14	Grafico valori di accelerazione assi X e Y	27
Figura 15	Grafico valori di velocità angolare	28
Figura 16	Grafico errore sulla stima della posizione	28
Figura 17	Grafico errore sulla stima della progressiva chilometrica	29
Figura 18	Grafico della velocità del treno stimata dall'algoritmo	29



# 1

---

## STATO DELL'ARTE

---

Questa Tesi si colloca nell'ambito del posizionamento ferrotramviario. Il posizionamento è un problema tipico del dominio ferroviario, tuttavia si presenta anche nel contesto ferrotramviario, poichè i sistemi ferrotramviari nascono come derivazione dai sistemi ferroviari.

Al fine di introdurre gli argomenti trattati nel seguito della Tesi, in questo capitolo vengono brevemente introdotti i sistemi ferrotramviari, evidenziandone le principali differenze con i sistemi ferroviari. Si descrive infine lo stato dell'arte nell'ambito del posizionamento ferroviario e ferrotramviario.

### 1.1 SISTEMI FERROVIARI E FERROTRAMVIARI

È possibile schematizzare un sistema ferroviario, o ferrotramviario, come un insieme di vetture vincolate a muoversi lungo una traccia fissata.

Questa schematizzazione è, in grossolana approssimazione, valida per qualsiasi sistema ferroviario o ferrotramviario, a prescindere dal numero di veicoli transitanti o dall'estensione geografica. Ciò che invece differenzia un sistema ferroviario da un sistema ferrotramviario sono:

- Le caratteristiche fisiche del veicolo transitante, come lunghezza e massa;
- Le caratteristiche geografiche dell'ambiente operativo;
- Gli scopi del trasporto.

In generale, nel trasporto ferroviario si utilizzano veicoli pesanti atti a trasportare persone o merci su lunghe percorrenze, pertanto è comune che l'ambiente operativo di un sistema ferroviario sia prevalentemente extra urbano.

Nel trasporto ferrotramviario, di contro, si utilizzano veicoli leggeri per

offrire un'alternativa al cittadino all'utilizzo di mezzi privati durante i suoi spostamenti all'interno di un'area metropolitana. Quest'ultima caratteristica implica che l'ambiente operativo di un sistema ferrotramviario sia radicalmente diverso dall'ambiente operativo di un sistema ferroviario. Le vetture si muovono lungo tracce installate su strade urbane, e di conseguenza il traffico ferrotramviario condivide l'ambiente con il traffico cittadino, come mostrato in figura 1.



Figura 1: Schema di un tipico scenario ferrotramviario

## 1.2 IL PROBLEMA DEL POSIZIONAMENTO

Per posizionamento ferroviario si intende la valutazione della posizione di un treno all'interno di una traccia ferroviaria. Tale posizione viene espressa come progressiva chilometrica rispetto a una posizione nota, come ad esempio l'origine della linea. [1]

### *Odierne Tecniche di Posizionamento*

Gli odierni sistemi di posizionamento si basano principalmente sull'utilizzo di strumenti installati a terra, chiamati *beacon*, o *balise* in gergo ferroviario, i quali hanno lo scopo di rilevare il passaggio di un treno.[2] Esiste uno standard a livello europeo al quale gli odierni sistemi di posizionamento si devono uniformare, l'*European Train Control System* (ETCS).

Nel corso della storia, ogni paese europeo ha sviluppato autonomamente

le proprie infrastrutture ferroviarie e relative regole operative. Tuttavia, ad oggi i treni possono attraversare le frontiere, pertanto è necessario sviluppare un sistema ferroviario standard che rispetti una comune normativa operazionale europea. Tale sistema prende il nome di *European Rail Traffic Management System* (ERTMS) [3], ed ETCS è il sottosistema di ERTMS dedicato al posizionamento delle vetture.

Come standard, ETCS definisce specifici livelli di *compliance* che possiede un sistema di posizionamento rispetto allo standard, ed essi vanno dal livello ETCS-0 al livello ETCS-3. [4]

L'obiettivo è quello di sviluppare progressivamente un sistema di posizionamento completamente autonomo (ETCS-3), partendo da un sistema interamente *non-compliant* con ETCS (ETCS-0).

Allo stato attuale, quasi tutti i sistemi di posizionamento sono ETCS-2. Nei livelli ETCS-1 e ETCS-2, le tracce vengono suddivise in blocchi, e all'entrata di ciascun blocco viene posizionato un *beacon* in grado di rilevare la presenza di un treno.

L'autorizzazione all'ingresso in un blocco viene rilasciata se nessun altro treno sta occupando il blocco al quale si vuole accedere, mentre un sistema di *odometria* installato a bordo, posiziona il treno rispetto all'ultimo *beacon* incontrato.

Nel livello ETCS-3, non sono richiesti segnali provenienti dalla linea: un treno deve essere in grado di localizzarsi autonomamente. [5]

In sintesi, i livelli ETCS possono essere descritti come segue:

- ETCS-0: Sistema non conforme a ETCS;
- ETCS-1: Utilizzo di apparati di posizionamento installati a terra, autorizzazione a procedere segnalata al macchinista attraverso indicazioni semaforiche;
- ETCS-2: Come ETCS-1, ma l'autorizzazione a procedere è gestita da un sistema automatico di scambio, denominato sistema di *interlocking*;<sup>[6]</sup>
- ETCS-3: Posizionamento autonomo, nessun utilizzo di apparati a terra.

Il livello ETCS-2 prevede che l'autorizzazione a procedere venga gestita dal sistema di *interlocking* e non dal solo operatore umano notificato mediante indicazioni semaforiche.

La funzionalità offerta del sistema di *interlocking* viene pertanto considerata *safety-critical*, in quanto un suo fallimento può portare a conseguenze

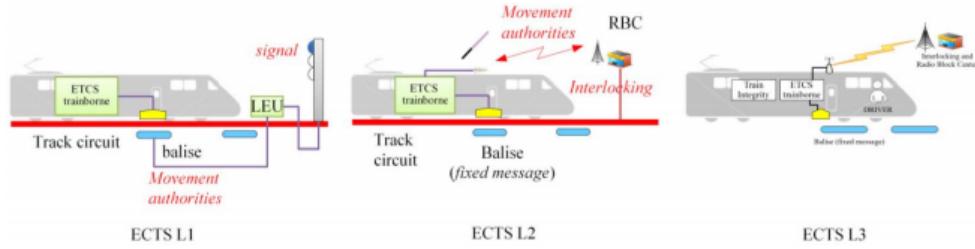


Figura 2: Livelli ETCS

anche catastrofiche.[7]

La natura incrementale di ETCS implica che un sistema ETCS-3 dovrà interagire con il sistema di *interlocking* e pertanto anch'esso deve essere considerato un sistema *safety-critical*, e la sua implementazione hardware e software è vincolata da standard generici [8] [9], e standard specifici del dominio ferroviario [10].

ERTMS/ETCS è pensato per sistemi ferroviari, tuttavia i sistemi ferrotramviari, per quanto caratterizzati da una normativa meno rigida, tendono ad essere anch'essi *ETCS-compliant*.

### 1.3 VERSO ETCS-3

Gli attuali sistemi di posizionamento richiedono un minimo intervento di computer installati a bordo e una grande quantità di apparati installati a terra. Gli apparati di terra sono costosi e hanno un impatto ambientale non trascurabile, pertanto è necessario iniziare a pianificare una migrazione verso sistemi ETCS-3.[11]

Il sistema oggetto della Tesi è un sottosistema di posizionamento conforme alla filosofia ETCS-3.

Nell'ottica di voler realizzare un sistema di posizionamento autonomo, il treno viene modellato come un *Cyber-Physical System* (CPS).

Un CPS è un sistema che consiste di un computer (sottosistema *cyber*) e un oggetto da esso controllato (sottosistema *physical*). Il sottosistema *cyber* è essenzialmente un elaboratore che opera in un tempo discreto, dispone di processore, memoria, e di interfacce I/O che abilitano l'interazione del CPS con eventuali operatori umani.

Il sottosistema *physical* consiste di un sistema governato dalle leggi della fisica che opera in un tempo continuo. [12][13]

Nella fattispecie, l'oggetto controllato è il treno, mentre l'elemento *cyber* è costituito da un *sistema di sistemi* composto da un'unità in grado di

campionare e processare un certo insieme di misure, e da un'unità in grado di controllare il movimento del treno. Quest'ultima unità prende il nome di *On Board Control Unit* (OBCU), ed è il computer di bordo nominale che ogni treno deve possedere in accordo a ERTMS/ETCS. Lo scopo della Tesi è quello di mostrare i risultati sperimentali delle campagne di analisi condotte sul sottosistema *cyber* del CPS descritto. Tale sottosistema ha lo scopo di stimare la posizione di un treno attraverso l'uso combinato di un insieme di sensori installati a bordo. I valori campionati dai sensori dovranno essere integrati al fine di ottenere una stima sicura e affidabile della posizione del treno. Tale integrazione viene realizzata grazie all'utilizzo di un algoritmo noto come *Sensor Fusion Algorithm* (SFA). [14]



# 2

---

## ARCHITETTURA DI SISTEMA

---

In questo capitolo viene descritta l'architettura *hardware* del sottosistema di posizionamento, in particolare, ne vengono evidenziati i moduli costituenti e le loro interfacce di comunicazione. Vengono infine descritte le interazioni osservabili.

### 2.1 DESCRIZIONE GENERALE

Lo scopo del sistema è quello di implementare un meccanismo di posizionamento basato su SFA.

Tale algoritmo viene eseguito da un software schematizzabile, ai fini di questa Tesi, come una *black-box* che, ricevuto in ingresso un certo insieme di misure, fornisce in uscita una stima affidabile della posizione del treno lungo la traccia (figura 3), più accurata di quella che si otterrebbe dai singoli sensori.[15]

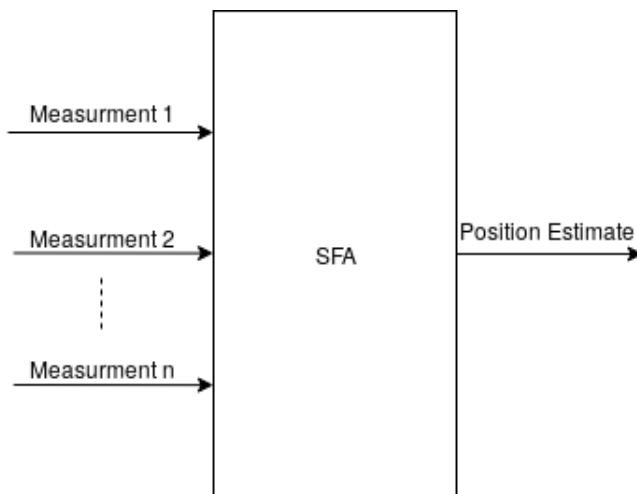


Figura 3: Schema SFA

Questo algoritmo verrà eseguito su di un hardware installato a bordo, e la sua esecuzione è volta a monitorare costantemente il moto del treno. Le grandezze fisiche che dovranno essere misurate e fornite a SFA sono:

- Vettore accelerazione;
- Vettore velocità angolare;
- Coordinate geografiche;
- Velocità lineare (scalare).

In quest'applicazione, SFA utilizza queste informazioni in combinazione con un'apposita digitalizzazione della traccia tramviaria su cui si trova il treno monitorato.[16][17][18]

Queste informazioni si suppongono note a priori ed accedibili tramite un *database* caricato in memoria centrale. [19]

## 2.2 CONSTITUENT SYSTEMS

Il sistema studiato si compone dei seguenti sistemi costituenti:

- *Sensor Set*, ossia un insieme di sensori atto a campionare le misure di interesse per il sistema. Il *Sensor Set* è composto dai seguenti moduli:
  - *Inertial Measurement Unit* (IMU):  
Unità incaricata di trasmettere al sistema i vettori accelerazione ( $\mathbf{a}$ ) e velocità angolare ( $\mathbf{v}_{\text{ang}}$ ). Le misure di IMU sono prese rispetto alla Terra e sono espresse in unità stabilite dallo standard internazionale (SI):

$$\mathbf{a} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad \mathbf{v}_{\text{ang}} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Esso è il sensore principale. Date le caratteristiche intrinseche del particolare SFA utilizzato, ossia un *Filtro di Kalman*, il sistema potrebbe funzionare anche senza i rimanenti sensori. Si osserverebbe tuttavia un calo delle performance in termini di errore commesso sulla stima della posizione del treno. [20] [21]

- Odometro:  
Unità incaricata di fornire al sistema i campionamenti dei valori di velocità lineare del treno, espressi in  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

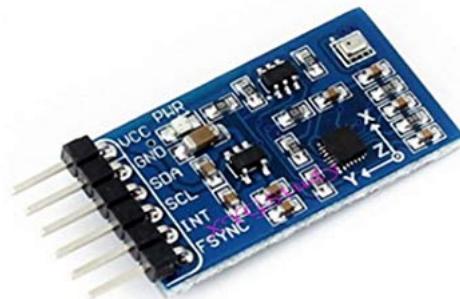


Figura 4: *Inertial Measurement Unit*

- GPS:

Unità che fornisce al sistema le misure di posizione del treno. Le misure di GPS sono riportate in formato standard come tripla di coordinate (latitudine, longitudine, altitudine), rispettivamente espresse in gradi N-S, in gradi E-O e in metri sul livello del mare.



Figura 5: Ricevitore GPS ublox EVK-M8T

- Piattaforma di elaborazione dati. Consiste di una scheda Nvidia TX-Jetson su cui viene eseguito SFA.



Figura 6: Nvidia TX-Jetson

- *On Board Control Unit* (OBCU). Computer di bordo del treno. Esso non svolge alcun ruolo attivo nel sistema di posizionamento, tuttavia la progressiva chilometrica, stimata da SFA, dovrà essere trasmessa a OBCU al fine di poter utilizzare questa informazione all'interno del sistema di *interlocking* della traccia.

## 2.3 SPECIFICA DELLE INTERFACCE

### 2.3.1 Relied Upon Interfaces

Le interfacce sono definite come punti di interazione, tra un CS e l'ambiente oppure tra un CS e un altro.

In questa sezione si evidenziano le principali interfacce del sistema, alle quali si osservano le interazioni fondamentali che avvengono al suo interno.

Tali interfacce prendono il nome di *Relied Upon Interfaces* (RUI). Le RUI si dividono in:

- *Relied Upon Physical Interfaces* (RUPI), in cui l'interazione avviene tramite osservazione diretta di una grandezza fisica;
- *Relied Upon Message Interfaces* (RUMI), dove l'interazione è rappresentata da uno scambio di messaggi a livello *cyber*.

La specifica delle RUI è di particolare importanza poiché qualunque struttura del sistema, responsabile del comportamento osservato, può essere ridotta alla specifica delle interfacce del sistema. [22].

Il CPS interagisce con l'ambiente attraverso le RUPI del *Sensor Set*, ossia gli strumenti di misura che esso integra. Queste interfacce acquisiscono, a diverse frequenze, i dati sul moto del treno che verranno elaborati dal resto del sistema di posizionamento (tabella 1).

Per quanto concerne le RUMI, se ne osservano di due tipi:

RUPI	Grandezza Campionata	Parti interagenti
Accelerometro	Accelerazione	Ambiente - IMU
Giroscopio	Velocità angolare	Ambiente - IMU
Radar	Velocità lineare	Ambiente - Odometro
Ricevitore GPS	Coordinate geografiche	Ambiente - GPS

Tabella 1: Specifica delle RUPI del sistema

- Tre bus dati, che collegano il *Sensor Set* alla scheda Nvidia TX-Jetson. Su ciascuno di essi, *Sensor Set* invia rispettivamente messaggi contenenti i dati campionati da IMU, Odometro e GPS.
- Interfaccia LTE. Essa permette di realizzare una *rete wireless ad hoc* fra la scheda e OBCU. All'interno di tale rete vengono instradati datagrammi IP contenenti le informazioni sulla progressiva chilometrica stimata da SFA, ed eventualmente messaggi di *acknowledgment* di OBCU verso la scheda.



Figura 7: Modem TP-LINK M7350 LTE-4G

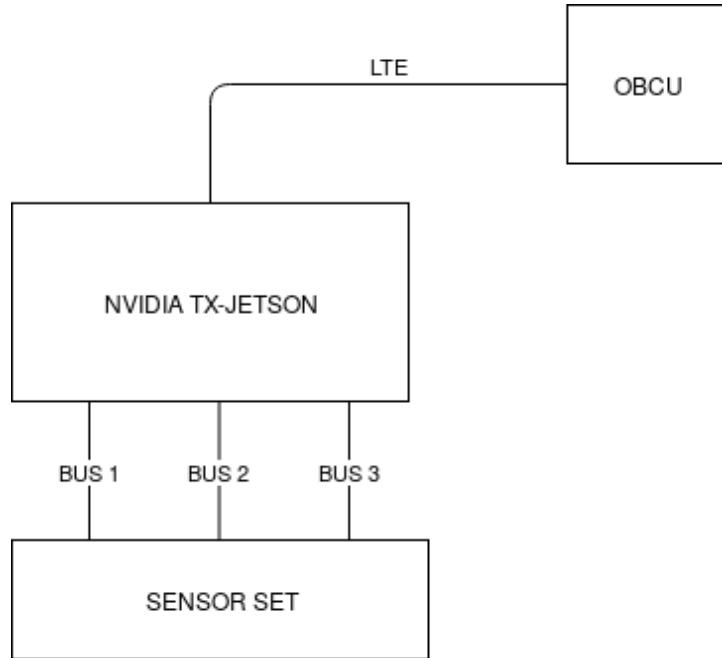


Figura 8: RUMI

### 2.3.2 Altre Interfacce

Oltre alle RUI, descritte in 2.3.1, esistono altre interfacce che hanno lo scopo di rendere il sistema osservabile e manutenibile, e sono le seguenti: [13]

- *Time Synchronization Interfaces* (TSI). Le TSI permettono al CPS di effettuare una sincronizzazione col tempo fisico al fine di stabilire una *global timebase* [23].
- *Utility Interfaces* (UI). Interfacce dei CS che ne consentono la configurazione, il controllo, e l'osservazione non intrusiva del suo comportamento [24].

Come verrà approfondito nel successivo capitolo, sia le TSI che le UI sono nella fattispecie interfacce *software*.

## 2.4 INTERAZIONI

In questa sezione vengono descritte le interazioni osservabili alle interfacce del sistema.

### 2.4.1 Acquisizione dei dati

L'acquisizione dei dati si divide in due differenti interazioni: la prima, con l'ambiente, avviene alle RUPI del *Sensor Set*, mentre la seconda avviene alle RUMI di tipo bus dati che collegano il *Sensor Set* alla piattaforma di elaborazione dati. I moduli che compongono il *Sensor Set* campionano ad una data frequenza le grandezze fisiche che descrivono il moto del treno. Ciascun campionamento fisico è seguito dall'invio dei valori letti alla piattaforma di elaborazione dati. I moduli del *Sensor Set* sono tra di loro indipendenti.

In figura 9 viene riportato un *sequence diagram* rappresentante una possi-

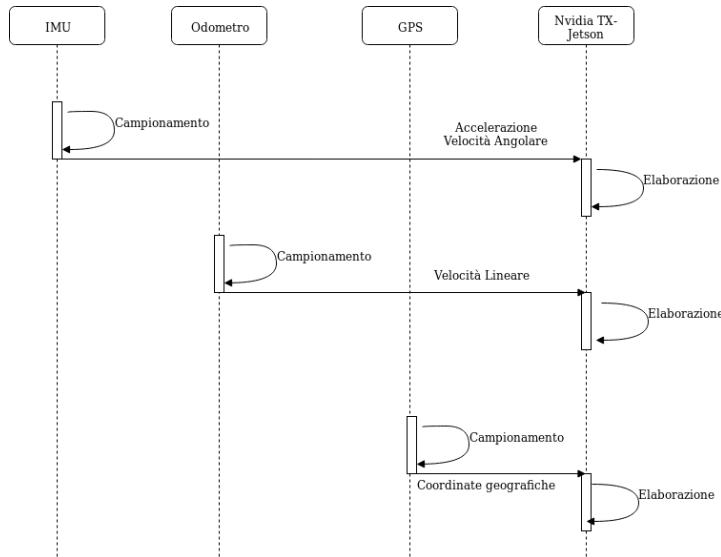


Figura 9: Sequenza di acquisizione dati

bile sequenza di campionamento e invio dei dati.

Questa tipologia di interazione è detta *time-triggered*, in quanto è determinata unicamente dallo scorrere del tempo. [25]

### 2.4.2 Trasmissione della posizione

La piattaforma di elaborazione dati esegue SFA durante l'intero moto del treno. Le misure fornite dai sensori vengono elaborate al fine di aggiornare continuamente la stima della posizione del treno.

Ogniqualvolta un'aggiornamento di SFA viene completato, avviene un'interazione all'interfaccia LTE. Tale interazione consiste nell'invio di un messaggio contenente la posizione del treno, dalla piattaforma di elab-

borazione dati verso OBCU, e nella trasmissione di un messaggio di *acknowledgment* nel senso opposto.

La tipologia di scambio dei messaggi esposta è detta *event-triggered* [26] in quanto le tempistiche di interazione non sono note a priori, ma dipendono dal tempo impiegato da SFA a compiere un'iterazione per aggiornare la stima prodotta.

LTE è a tutti gli effetti una regolare interfaccia di rete. A livello di trasporto, il messaggio trasmesso è contenuto nel *payload* di un datagramma UDP; in accordo al modello di rete ISO-OSI. [27]

# 3

---

## AMBIENTE DI ANALISI

---

Al fine di osservare il comportamento del modulo SFA, e condurre l'analisi oggetto della Tesi, è stato costruito un ambiente atto a monitorare, in modo non intrusivo, il comportamento dell'algoritmo.

L'ambiente di analisi è principalmente costituito dal software *Rail Track Tool* (RTT).

RTT simula l'architettura hardware descritta nel capitolo 2, ed incapsula come libreria il modulo SFA che viene eseguito bordo treno.

### 3.1 INTERFACCIA UTENTE

All'avvio di RTT viene mostrata una finestra contenente l'interfaccia del software verso l'utente.

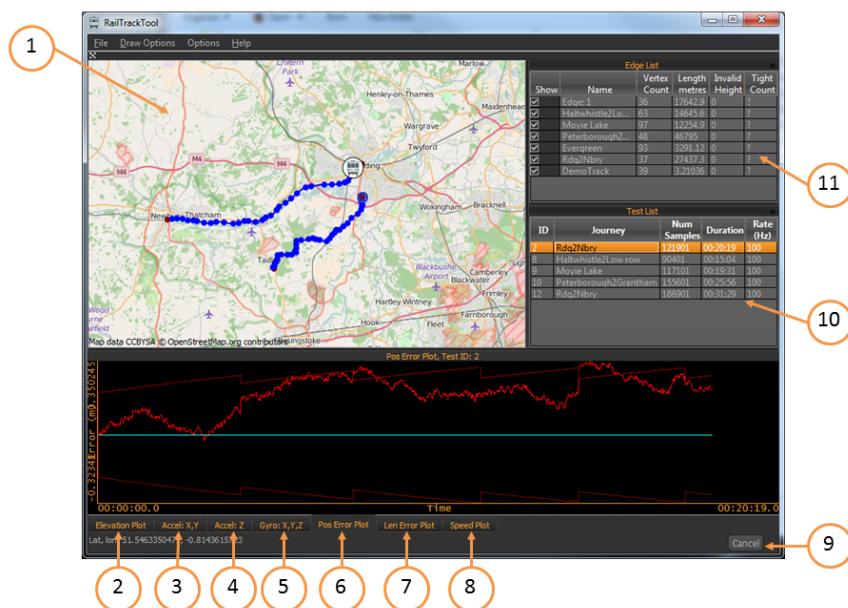


Figura 10: Interfaccia RTT

Gli elementi che compongono tale interfaccia sono:

1. **Slippy map:** Mappa che visualizza le tracce memorizzate, all'interno delle quali verrà mostrata la posizione del treno durante l'esecuzione di SFA;
2. **Elevation plot:** Grafico che mostra l'altitudine della traccia in funzione della progressiva chilometrica della stessa;
3. **Accel X, Y:** Grafico delle misure dell'accelerometro fornite a SFA, relative agli assi normale e tangenziale alla traccia selezionata;
4. **Accel Z:** Grafico delle misure dell'accelerometro fornite a SFA, relative all'asse verticale alla traccia selezionata;
5. **Gyro X, Y, Z:** Grafico delle misure del giroscopio fornite a SFA, relative agli assi normale, tangenziale e verticale alla traccia selezionata;
6. **Pos error plot:** Grafico che riporta, in funzione del tempo, la stima dell'errore commesso nel predire la posizione del treno;
7. **Len error plot:** Come Pos error plot, ma l'errore è espresso rispetto alla progressiva chilometrica e non rispetto al vettore posizione;
8. **Speed Plot:** Grafico che mostra la stima della velocità del treno come funzione del tempo;
9. **Cancel button:** Pulsante da premere se si ha la necessità di interrompere una simulazione;
10. **Test List:** Storico delle analisi effettuate;
11. **Edge List:** Lista delle tracce memorizzate.

### 3.2 ACQUISIZIONE DELLE MISURE

Nel sistema reale le informazioni geografiche della traccia in esame sono salvate in un database caricato in memoria centrale. Nel contesto di analisi, queste informazioni sono stoccate in un database *MySQL* verso il quale si interfaccia RTT.

Lo schema di tale database, identico al database utilizzato nel sistema reale, è mostrato in figura 11.

Esso ha lo scopo di memorizzare, per ciascuna traccia, le coordinate

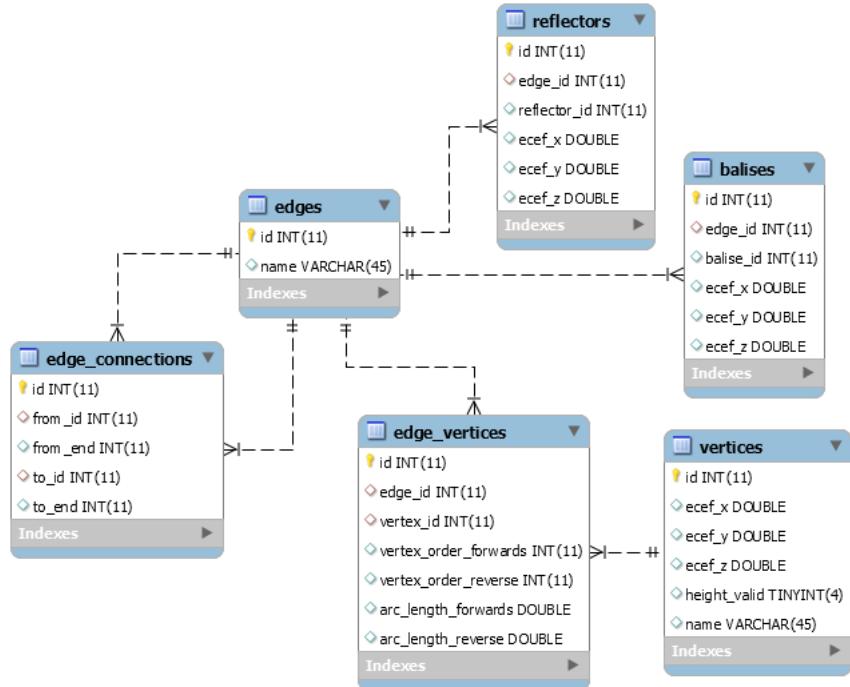


Figura 11: Schema database tracce

geografiche dei suoi *nodi*.

Questa scelta è motivata dal fatto che una traccia viene modellata da SFA come una *spline* interpolante i nodi scelti dall'utente sulla traccia stessa. Il meccanismo messo a disposizione da RTT per monitorare SFA include la possibilità di generare automaticamente le misurazioni che verosimilmente si otterrebbero sul campo, date le caratteristiche della traccia e dei sensori utilizzati. All'atto di generazione delle misure, RTT interroga il database delle tracce per ottenere le informazioni necessarie a generare misure coerenti con la traccia in esame. Le misure vengono fornite a SFA attraverso le API del modulo che lo implementa, identiche a quelle invocate dal sistema reale.

### 3.3 MONITORING

Tramite un'apposita interfaccia interna a RTT, l'utente ha la possibilità di definire le caratteristiche dei sensori, come mostrato nelle figure 12 e 13. Definiti i parametri di configurazione è possibile selezionare una traccia, e simulare l'esecuzione di SFA.

Durante la simulazione, la posizione del treno stimata dall'algoritmo

verrà visualizzare sulla mappa.

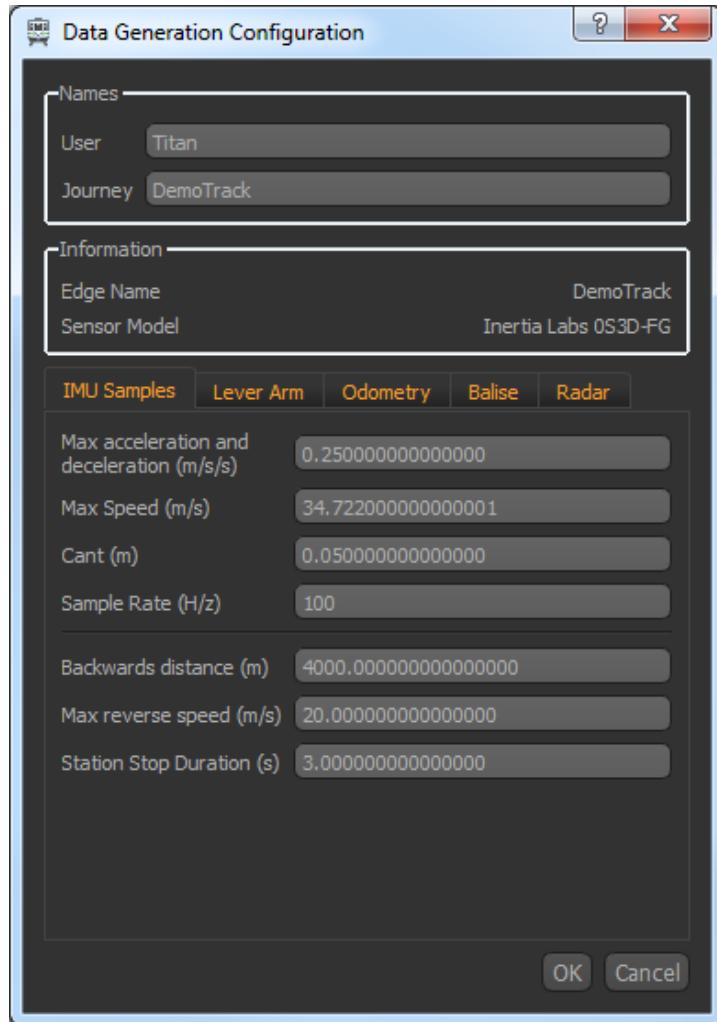


Figura 12: Pannello di configurazione per generatore IMU

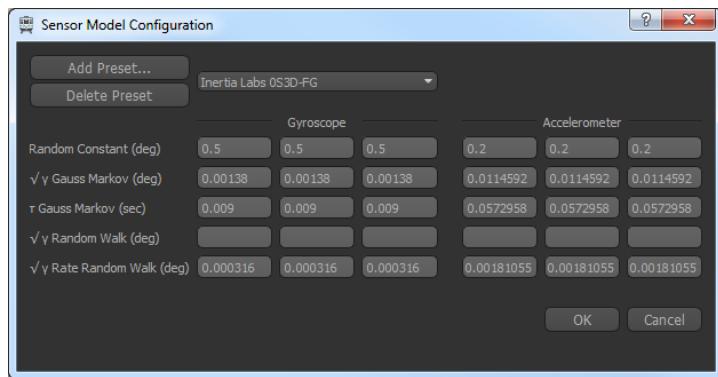


Figura 13: Pannello di configurazione sensore inerziale

Sui grafici nel pannello inferiore è possibile inoltre visualizzare i dati IMU forniti in ingresso all'algoritmo, l'errore commesso dallo stesso e la stima della velocità del treno.

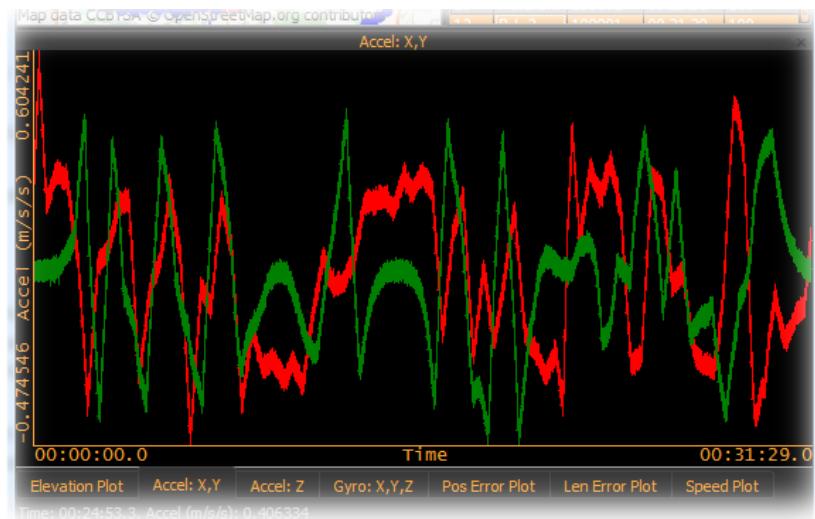


Figura 14: Grafico valori di accelerazione assi X e Y

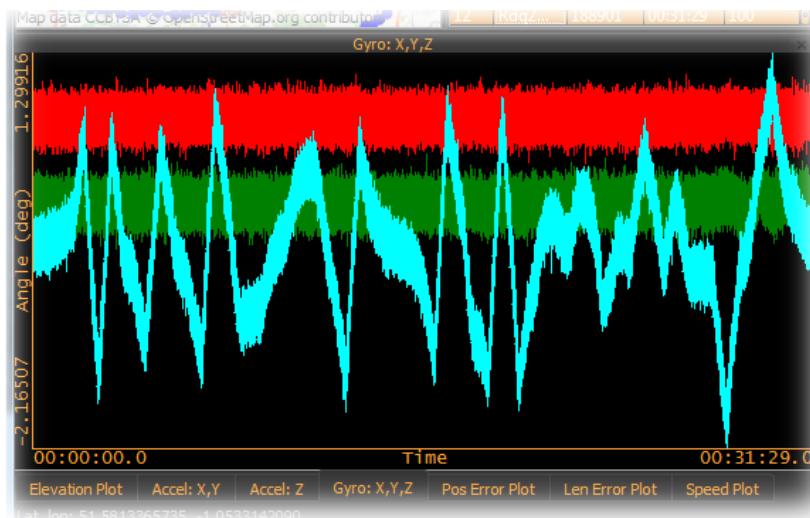


Figura 15: Grafico valori di velocità angolare

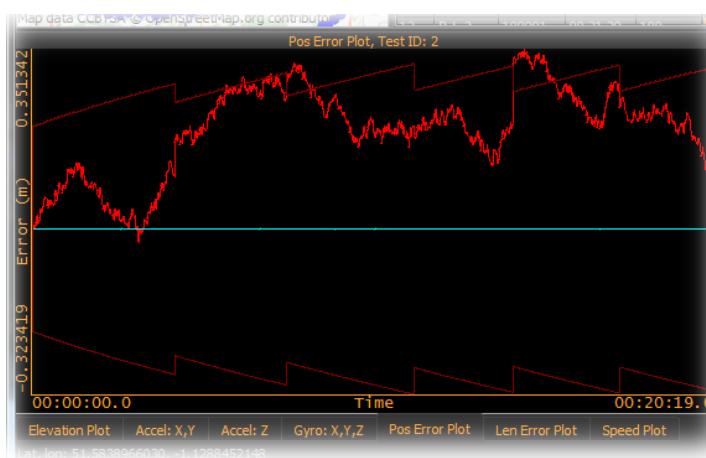


Figura 16: Grafico errore sulla stima della posizione

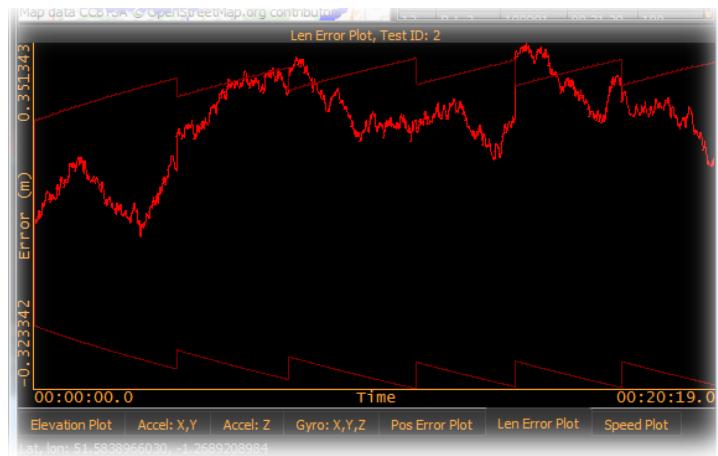


Figura 17: Grafico errore sulla stima della progressiva chilometrica

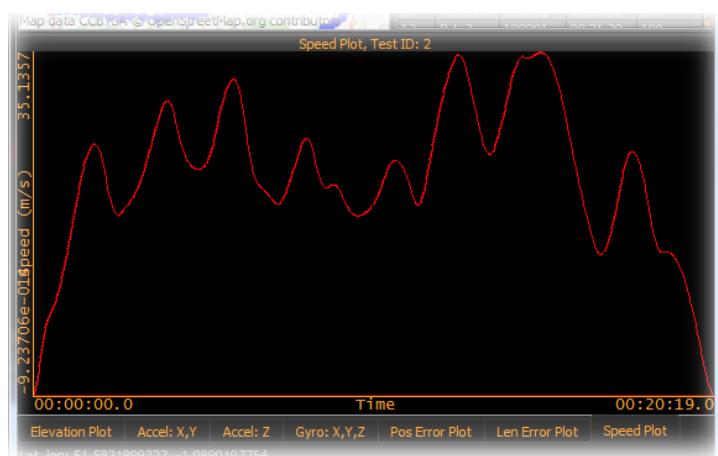


Figura 18: Grafico della velocità del treno stimata dall'algoritmo

In fase di monitoring, RTT sfrutta le API del modulo SFA per ricevere le informazioni in uscita dall'algoritmo.

Tali informazioni non sono esclusivamente limitate alla stima della posizione. Infatti il particolare SFA implementato in quest'applicazione, è in grado di stimare lo stato del treno sia in termini di posizione che in termini di velocità. Per quanto concerne la stima degli errori commessi, l'algoritmo scelto calcola tali grandezze per definizione. [28]

Non occorre quindi modificare il codice del modulo SFA per ottenere le informazioni interessanti ai fini dell'analisi.

Al termine di ciascuna simulazione, RTT produce un report HTML contenente una sintesi dei risultati ottenuti.

# 4

---

## ESPERIMENTI E RISULTATI

---



# 5

---

## CONCLUSIONI

---



---

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] J. Otegui, *A Survey of Train Positioning Solutions*, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, No. 20 (2017) (Cited on page 10.)
- [2] T. Albrecht et al, *A precise and reliable train positioning system and its use for automation of train operation*, *Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Rail Transp.* (2013) (Cited on page 10.)
- [3] European Commission, *Delivering an effective and interoperable European Rail Traffic Management System (ERTMS) - the way ahead* (2017) (Cited on page 11.)
- [4] J. Marais, J. Beugin, M. Berbineau, *A Survey of GNSS-Based Research and Developments for the European Railway Signaling*, *IEEE transactions on intelligent transportation system* (2017) (Cited on page 11.)
- [5] A. Neri, F. Rispoli, P. Salvatori, *An analytical assessment of a GNSS-based train integrity solution in typical ERTMS level 3 scenarios*, in *Proc. Eur. Navigat. Conf. (ENC)*, Bordeaux, France, (2015) (Cited on page 11.)
- [6] P. Josserand, F.H Willard, *Rights of Trains* (5th ed.), Simmons-Boardman Publishing Corporation, New York (1957) (Cited on page 11.)
- [7] N.A. Zafar et al, *Towards the safety properties of moving block railway interlocking system*, *International Journal of Innovative Computing Information and Control* (2012) (Cited on page 12.)
- [8] MISRA, *MISRA-C:2004, Guidelines for the use of the C language in critical systems* (2004) (Cited on page 12.)
- [9] International Electrotechnical Commission, *61508-1: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*, edition 2.0 (2010) (Cited on page 12.)
- [10] CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization, *EN 50128:2011 - Railway Applications - Communications, signalling and processing systems - Software for railway control and protection systems* (2011) (Cited on page 12.)

- [11] R. S. Hosse, H. Manz, K. Burmeister, E. Schnieder, *Market analysis for satellite train localisation for train control systems*, Proc. 5th Conf. Transp. Solutions Res. Deployment Transp. (2014)
- [12] D. Basile et al, *A Refinement Approach to Analyse Critical Cyber-Physical Systems*, Software Engineering and Formal Methods (2017) (Cited on page 12.)
- [13] A. Ceccarelli et al, *Basic Concepts on Systems of Systems, Cyber-Physical Systems of Systems*, Springer (2017) (Cited on page 12.)  
(Cited on pages 12 and 20.)
- [14] A. Mirabadi et al, *Application of sensor fusion to railway systems*, IEEE (1996) (Cited on page 13.)
- [15] F. Bohringer, A. Geistler, *Adaptation of the kinematic train model using the interacting multiple model estimator*, Advances in Transport, vol. 74, no. 7. Southampton (2004) (Cited on page 15.)
- [16] B. Cai, X. Wang, *Train positioning via integration and fusion of GPS and inertial sensors*, WIT Transactions on the Built Environment, Southampton (2000) (Cited on page 16.)
- [17] M. Malvezzi et al, *A localization algorithm for railway vehicles based on sensor fusion between tachometers and inertial measurement units*, Proc. Inst. Mech. (Cited on page 16.)
- [18] C. Reimer et al, *INS/GNSS/odometer data fusion in railway applications*, Proc. DGON Intertial Sensors Syst. (ISS), vol. 2. Karlsruhe, Germany (2016) (Cited on page 16.)
- [19] L. Junyan et al, *Application Research of Embedded Database SQLite*, IEEE (2009) (Cited on page 16.)
- [20] X. Liu, A. Goldsmith, *Kalman Filtering with Partial Observation Losses*, Department of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, USA (Cited on page 16.)
- [21] R. Mazl, L. Preucil, *Sensor Data Fusion for Inertial Navigation of Trains in GPS Dark Areas (Mathematics in Science and Engineering)*, San Diego, CA, USA (2003) (Cited on page 16.)
- [22] H. Kopetz, *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications 2nd edn*, Springer, New York (2011) (Cited on page 19.)

- [23] H. Kopetz, W. Ochsenreiter, *Clock synchronization in distributed real-time systems*, IEEE (1987) (Cited on page 20.)
- [24] K. Wolter et al, *Resilience Assessment and Evaluation of Computing Systems*, Springer (2012) (Cited on page 20.)
- [25] M.J. Pont, *Patterns for Time-Triggered Embedded Systems*, Addison-Wesley (2001) (Cited on page 21.)
- [26] H. Kopetz, *Event-Triggered versus Time-Triggered Real-Time Systems*, Springer (1991) (Cited on page 22.)
- [27] ISO/IEC 7498-1:1994, *Information technology, Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model* (1994) (Cited on page 22.)
- [28] D.E. Katlin, *Estimation, Control, and the Discrete Kalman Filter*, Applied Mathematical Science, Springer (1987) (Cited on page 30.)
- [29] S. Dilhaire, D. Maillet, *Dealing with the measurement noise of a sensor* (2015)