



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Scuola di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
Corso di Laurea Magistrale in Informatica
Resilient and Secure Cyber-Physical System

ANALISI DI UN SOTTOSISTEMA DI
POSIZIONAMENTO FERROTRAMVIARIO

ANALYSIS OF A TRAMWAY POSITIONING
SUBSYSTEM

ALEX FOGLIA

ANDREA BONDAVALLI

Anno Accademico 2018-2019

ABSTRACT Il problema del posizionamento ferrotramviario è una questione di primaria importanza. Risolvere il problema del posizionamento significa poter determinare la posizione di un treno lungo una traccia ferrotramviaria. L'importanza di essere a conoscenza di tale informazione è fondamentale in quanto, per ragioni di rotta, un treno potrebbe avere necessità di spostarsi su un nuovo binario una volta raggiunte determinate posizioni.

Qualora si rendesse necessaria tale operazione, deve intervenire un sistema di scambio che direzioni le rotaie verso la nuova traccia. Il sistema di scambio è un sistema cosiddetto *safety-critical*, in quanto un suo malfunzionamento potrebbe portare a conseguenze catastrofiche, come ad esempio il deragliamento del treno.

I sistemi di posizionamento attualmente in uso fanno un largo uso di apparati installati a terra, i quali presentano un costo e un impatto ambientale non trascurabili. In questa Tesi viene mostrato un sistema di posizionamento alternativo, basato sull'utilizzo di un elaboratore installato bordo treno, sul quale viene eseguito un algoritmo *Sensor Fusion*.

Un algoritmo *Sensor Fusion*, applicato al problema del posizionamento ferrotramviario, prende in ingresso misurazioni effettuate da un *set* di sensori composto da un sensore inerziale, un odometro e un GPS; e fornisce la stima della posizione del treno più accurata di quella che si otterrebbe considerando i sensori in maniera mutuamente esclusiva. Questo avviene poichè il rumore casuale che caratterizza sia il moto del treno, che l'acquisizione delle misurazioni da parte dei sensori, rende sempre meno affidabili, con il procedere del tempo, le stime della posizione eventualmente basate unicamente su tali rilevazioni.

Il sistema presentato utilizza un modulo software che implementa un Filtro di Kalman quale modello statistico di stima dello stato di un sistema dinamico rumoroso, in cui il sistema è il treno che si muove lungo una traccia, e lo stato è la progressiva chilometrica di quest'ultimo rispetto all'origine della traccia.

INDICE

1	Stato dell'Arte	9
1.1	Sistemi Ferroviari e Ferrotramviari	9
1.2	Il Problema del Posizionamento	10
1.2.1	Criticità	14
2	Architettura di Sistema	17
2.1	Descrizione generale	17
2.2	Constituent Systems	18
2.3	Specifica delle Interfacce	20
2.3.1	Relied Upon Interfaces	20
2.3.2	Altre Interfacce	21
2.4	Interazioni	22
2.4.1	Acquisizione dei dati	22
2.4.2	Trasmissione della posizione	23
3	Applicazione di SFA: La Tramvia di Firenze	25
3.1	Architettura di Sistema	25
3.1.1	Architettura Hardware	26
3.1.2	Architettura Software	26
3.2	Gestione della trasmissione dei dati	28
3.2.1	Trasmissione in entrata	29
3.2.2	Trasmissione in uscita	30
3.3	Scenario di Esempio	32
3.4	Possibili sviluppi	35
3.4.1	Problematiche legate alla security	35
3.4.2	Miglioramenti al protocollo in uscita	38
4	Risultati Sperimentali	39
4.1	Software impiegati	41
4.1.1	FusionLib	41
4.1.2	RTT	44
4.1.3	Listener	45
4.1.4	SDGA	45
4.2	Esperimenti offline	46
4.3	Esperimenti online	46
5	Conclusioni	47

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Segnalazioni semaforiche ferrotramviarie	14
Tabella 2	Specifica delle RUPI del sistema	20
Tabella 3	Protocollo di comunicazione in entrata	29
Tabella 4	Significato del campo SENSOR_TYPE	29
Tabella 5	Protocollo di comunicazione in uscita	31
Tabella 6	Formato del pacchetto di <i>ack</i>	31
Tabella 7	Condizioni iniziali	32

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	Treno in arrivo alla stazione ferroviaria di Firenze Santa Maria Novella	10
Figura 2	Tramvia di Danhai, Taipan	10
Figura 3	Schema di un tipico scenario tramviario	11
Figura 4	UCS realizzato da Thales Italia SPA	12
Figura 5	Conta Assi	13
Figura 6	Esempio di <i>Point Machine</i> installata su una traccia ferrotramviaria	13
Figura 7	Schema SFA	17
Figura 8	<i>Inertial Measurment Unit</i>	19
Figura 9	RUMI	21
Figura 10	Sequenza di acquisizione dati	22
Figura 11	Architettura hardware bordo treno	26
Figura 12	Architettura software bordo treno	28
Figura 13	Esperimenti offline	39
Figura 14	Esperimenti online	40
Figura 15	Tramvia di Firenze - Linea T1	41
Figura 16	Architettura logica di FusionLib	42
Figura 17	Spline interpolante la funzione $\cos(x)$ nelle ascisse $\frac{k\pi}{2}$ $k = 0, \dots, 8$	43
Figura 18	Funzione $\cos(x)$ nell'intervallo reale $[0, 4\pi]$	44

STATO DELL'ARTE

1.1 SISTEMI FERROVIARI E FERROTRAMVIARI

Il concetto di *treno* come comunemente percepito nasce con l'inizio della Rivoluzione Industriale, avvenuta tra il XVIII e il XIX secolo, a seguito della quale l'avvento della macchina a vapore ha permesso all'umanità di disporre di fonti di energia sufficienti a fare evolvere i primi rudimentali trasporti su binario negli odierni sistemi ferroviari.

È possibile schematizzare un Sistema Ferroviario, o Ferrotramviario, come un veicolo, il treno, vincolato a muoversi attraverso una propulsione, elettrica o a combustibile, lungo una traccia fissa, il binario.

Queste caratteristiche accomunano qualsiasi sistema di trasporto ferroviario o ferrotramviario a prescindere dalla sua scala in termini di veicoli transitanti ed estensione geografica. Ciò che invece differenzia un Sistema Ferroviario da un Sistema Ferrotramviario sono:

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

In generale, nel trasporto ferroviario si utilizzano treni caratterizzati da grandi dimensioni, che trasportano persone o merci su lunghe percorrenze (regionali, nazionali o internazionali), operando pertanto prevalentemente in ambienti extra urbani. Un esempio di treno operante in un sistema ferroviario classico è quello in figura 1.

Il trasporto ferrotramviario, di contro, vede l'utilizzo di treni dalle ridotte dimensioni, più leggeri di quelli usati nei sistemi ferroviari, e che hanno lo scopo di rappresentare un'alternativa per il 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



Figura 1: Treno in arrivo alla stazione ferroviaria di Firenze Santa Maria Novella

sistema ferrotramviario sia radicalmente diverso da quello di un sistema ferroviario: i treni si muovono lungo rotaie installate su strade urbane, quindi il traffico ferrotramviario è fuso con il traffico automobilistico, motociclistico, ciclistico e pedonale che caratterizza l'ambiente urbano, come mostrato nelle figure 2 e 3.



Figura 2: Tramvia di Danhai, Taipan

1.2 IL PROBLEMA DEL POSIZIONAMENTO

Per posizionamento ferroviario, si intende la stima della posizione di un treno all'interno di una traccia ferroviaria. Esso esiste tanto nel contesto ferrotramviario quanto nel contesto ferroviario classico.

Sovente questa stima viene espressa come progressiva chilometrica rispetto all'origine della linea oppure, più raramente, come coordinata



Figura 3: Schema di un tipico scenario tramviario

geografica.

Il problema del posizionamento sorge nel momento in cui, per ragioni di rotta, un treno ha necessità di spostarsi da una sezione di binario, anche detta traccia, ad un'altra. Questa operazione di scambio è offerta dal sistema di *interlocking*. Tale sistema è detto *safety-critical*, in quanto offre una funzionalità che deve rispettare adeguati standard di sicurezza. Gli odierni sistemi di posizionamento si basano principalmente sull'utilizzo di strumenti installati a terra, che hanno lo scopo di rilevare il passaggio di un treno, e quindi di interagire con il sistema di *interlocking* della traccia al fine di garantire, con un elevato livello di confidenza, un transito sicuro dei mezzi.

Odiere Tecniche di Posizionamento

I sistemi di posizionamento attualmente in uso sono basati su un'architettura distribuita composta dai seguenti blocchi:

- Sottosistema di *interlocking*;
- Sottosistema di comunicazione treno-traccia;
- Sottosistema semaforico.

SOTTOSISTEMA DI INTERLOCKING: Il sottosistema di *interlocking* è la parte che si fa effettivamente carico di offrire al treno un attraversamento sicuro di una *Junction Area (JA)*. Una JA è un punto della linea ferroviaria in cui il treno può cambiare direzione, e occupare una nuova traccia di

binario.

La nuova traccia da occupare potrebbe avere particolari vincoli sul numero di treni contemporaneamente transitanti, ed in ogni caso lo scambio di rotaia deve essere corretto ed avvenire in sicurezza, in quanto occupare la traccia sbagliata potrebbe avere ripercussioni finanche catastrofiche.

Un sistema di *interlocking* è composto dai seguenti elementi:

- *Switch Control Unit (UCS):*

Piattaforma certificata SIL-3 che rappresenta il nucleo del sistema di *interlocking* e che implementa l'intera logica di gestione di una JA. Un UCS dispone di un'interfaccia di *Input/Output (I/O)* verso gli elementi di *interlocking* installati a terra che ne consente un controllo sicuro in accordo allo standard SIL-3.



Figura 4: UCS realizzato da Thales Italia SPA

- *Conta Assi:*

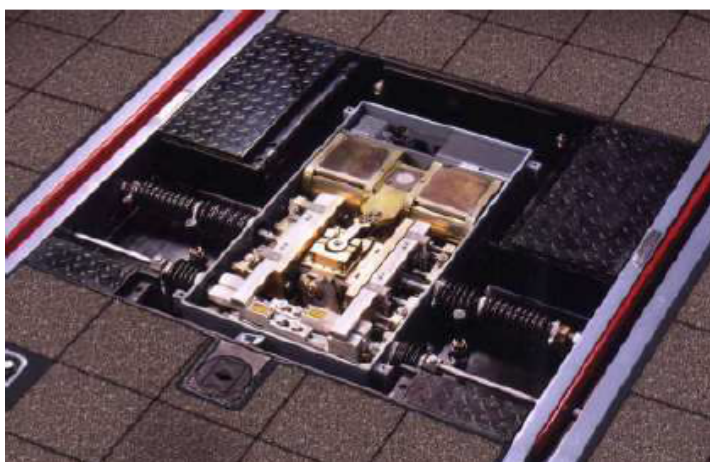
Il Conta Assi, o in inglese *Axle Counter (AC)*, è un sistema certificato SIL-3 che ha lo scopo di rilevare la presenza del treno e fornire quindi lo stato di occupazione della sezione di traccia in cui l'AC è installato.

- *Point Machines:*

Le *Point Machines* infine, sono degli strumenti certificati SIL-3 che hanno lo scopo di direzionare le rotaie verso una determinata sezione di traccia.



Figura 5: Conta Assi

Figura 6: Esempio di *Point Machine* installata su una traccia ferrotramviaria

L'intero sistema di *interlocking* viene attivato dai *Track Circuit*. Questi apparati sono installati a terra prima di ciascuna JA, e segnalano al sistema di *interlocking* l'avvicinamento di un treno alla successiva JA.

SOTTOSISTEMA DI COMUNICAZIONE TRENO-TRACCIA: Il sottosistema di comunicazione treno-traccia è gestito da un computer installato bordo treno, chiamato *On Board Control Unit* (OBCU), ed ha lo scopo di fornire funzionalità non legate alla *safety* e pertanto poco interessanti. OBCU viene principalmente utilizzato per monitorare lo stato del traffico ferrotramviario in una architettura di *monitoring* centralizzata. Il monitoring si basa su comunicazioni *wireless*. In alcune applicazioni può comprendere una comunicazione più o meno diretta con il sistema di *interlocking* allo scopo di segnalare l'avvicinamento del treno a una JA.

SOTTOSISTEMA SEMAFORICO: Il sottosistema semaforico prende in ingresso informazioni dal sistema di *interlocking* ed eventualmente, da OBCU, e gestisce i segnali luminosi da mostrare sui semafori a un mac-





Segnale	Descrizione	Significato
	Barra bianca orizzontale	Fermarsi
	Barra bianca verticale	Procedere avanti
	Barra bianca ruotata di 45 gradi	Procedere solo a destra
	Barra bianca ruotata di -45 gradi	Procedere solo a sinistra

Tabella 1: Segnalazioni semaforiche ferrotramviarie

chinista che si appresta a superare una JA.

In tabella 1 viene riportata la lista dei segnali semaforici utilizzati nel contesto ferrotramviario.

1.2.1 Criticità

Le attuali tecniche di posizionamento richiedono un intervento trascurabile di computer installati a bordo e una grande quantità di apparati installati a terra. Mentre i computer di bordo non forniscono in generale funzionalità legate alla *safety*, gli apparati installati a terra sono costosi e hanno un impatto ambientale non trascurabile.

È possibile considerare il treno e il computer di bordo come un unico sistema, ossia il treno viene modellato come un *Cyber-Physical System*.

Un *Cyber-Physical System* (CPS) è un sistema composto da una parte *fisica* e da una parte *cyber*. Il sottosistema fisico è composto da sensori e attuatori che hanno rispettivamente lo scopo di rilevare lo stato dell'ambiente circostante e di alterarlo se necessario. Il sottosistema *cyber* è essenzialmente un elaboratore, che dispone di processore, memoria, e interfacce I/O verso i sensori gli attuatori, ed eventuali operatori umani. Una tale

architettura di sistema, permette di sfruttare le capacità di calcolo dei moderni processori per implementare algoritmi anche molto complessi per il *processing* di grandi quantità di dati provenienti dai sensori.

Lo scopo della Tesi è quello di mostrare il funzionamento di un possibile sistema di posizionamento alternativo al sistema tuttora operante, che sfrutti l'uso combinato di un insieme di sensori i cui dati rilevati vengono processati da un algoritmo noto come *Sensor Fusion Algorithm* (SFA).

le misurazioni dei sensori sono l'ingresso, mentre l'uscita è la misura cercata, nella fattispecie, la posizione del treno lungo la traccia. Utilizzando SFA, il treno è in grado di auto-posizionarsi, capacità che minimizza la necessità di installare apparati di terra.

Un algoritmo che tiene conto delle misurazioni di un *set* di sensori, usato in luogo di un semplice *processing* di insiemi di misure provenienti da sorgenti omologhe, permette al sistema di correggere il rumore che disturba le singole misurazioni, realizzando così una nuova misura più accurata di quella che si avrebbe considerando i sensori in maniera mutuamente esclusiva.

ARCHITETTURA DI SISTEMA

In questo capitolo viene descritta l'architettura *hardware* del CPS in esame, in particolare, ne vengono evidenziati i *Constituent System* (CS) e le loro interfacce di comunicazione. Vengono infine descritte le interazioni alle particolari interfacce del sistema.

2.1 DESCRIZIONE GENERALE

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

Tale algoritmo è schematizzabile come una *black-box* (figura 7) la quale prende in ingresso un certo insieme di misure, e fornisce in uscita una stima affidabile della posizione del treno lungo la traccia.

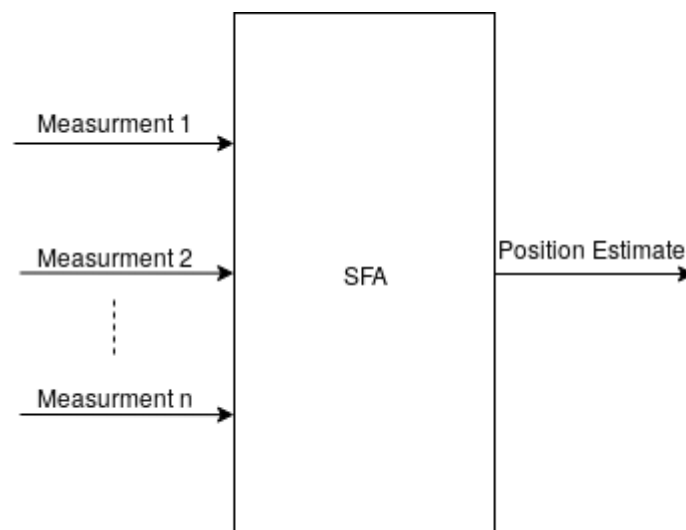


Figura 7: Schema SFA

Questo algoritmo verrà eseguito su di un hardware installato a bordo treno, ed ha lo scopo di monitorare costantemente il moto dello stesso. Le grandezze fisiche che dovranno essere misurate e fornite a SFA sono:

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

SFA utilizzerà queste informazioni in combinazione con un'apposita digitalizzazione della traccia tramviaria su cui si trova il treno monitorato. Queste informazioni si suppongono note a priori ed accedibili tramite un *database* caricato in memoria centrale.

2.2 CONSTITUENT SYSTEMS

Il sistema studiato si compone dei seguenti CS:

- *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}_{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 é 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. [1]

- Odometro:

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



Figura 8: *Inertial Measurment 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.
- Piattaforma di elaborazione dati. Consiste di una scheda Nvidia TX-Jetson su cui viene eseguito SFA.
- *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 INTERFACCHE

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. [2].

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 2).

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 2: Specifica delle RUPI del sistema

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

- 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.

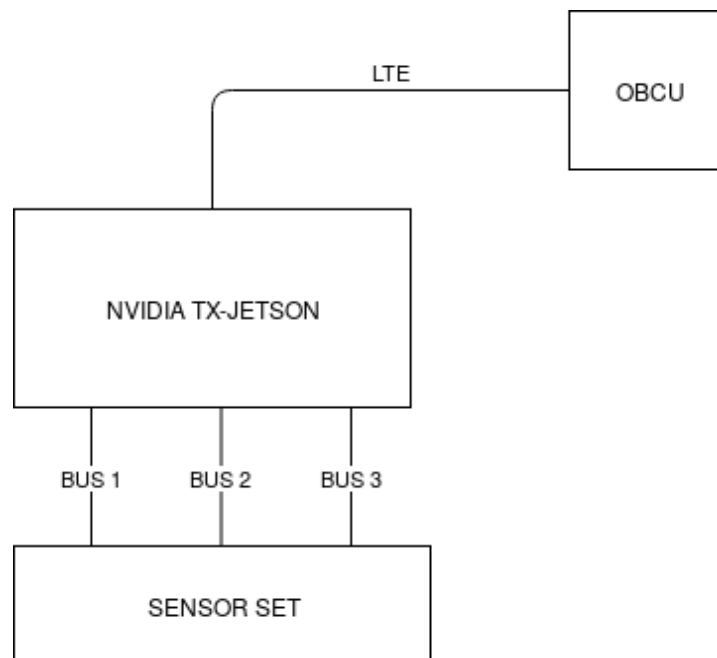


Figura 9: RUMI

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: [3]

- *Time Synchronization Interfaces* (TSI). Le TSI permettono al CPS di effettuare una sincronizzazione col tempo fisico al fine di stabilire una *global timebase* [4].

- *Utility Interfaces (UI)*. Interfacce dei CS che ne consentono la configurazione, il controllo, e l'osservazione non intrusiva del suo comportamento [5].

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.

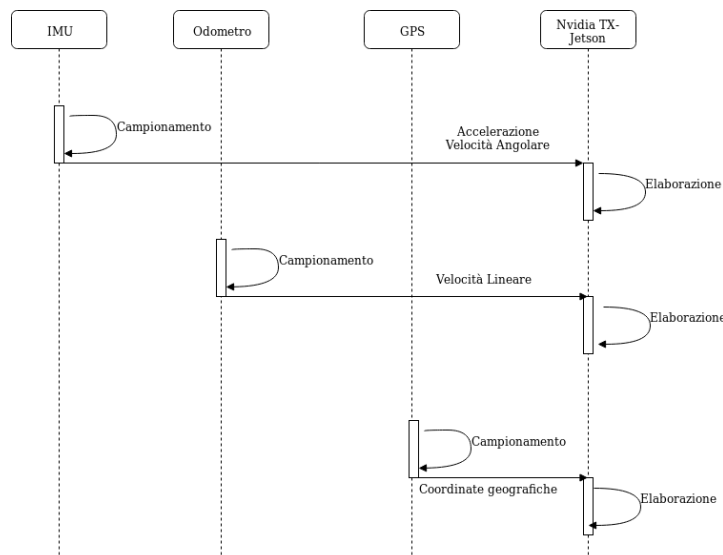


Figura 10: Sequenza di acquisizione dati

In figura 10 viene riportata una sequenza esempio di campionamento e invio dei dati. I protocolli di comunicazione tra *Sensor Set* e la piattaforma di elaborazione dati sono definiti a livello *software*, e saranno descritti nel prossimo capitolo. Questa tipologia di interazione è detta *time-triggered*, in quanto è determinata unicamente dallo scorrere del tempo. [6] [7]

2.4.2 *Trasmissione della posizione*

APPLICAZIONE DI SFA: LA TRAMVIA DI FIRENZE

In questo capitolo verrà analizzata una particolare applicazione di SFA al problema del posizionamento ferrotramviario.

Nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dall'Unione Europea, si è voluto studiare l'usabilità di SFA come sistema di posizionamento ferrotramviario alternativo a quello descritto nel Capitolo 1, il quale fa un largo uso di apparati installati a terra, fatto che si vorrebbe minimizzare. L'idea di base è quella di utilizzare UKF per stimare la posizione del treno attraverso misure di accelerazione, velocità angolare, velocità lineare e posizione. La rilevazione di tali grandezze, per quanto esposto nel Capitolo 2, è caratterizzata da rumore, UKF combina queste informazioni per stimare la posizione del treno al netto dei rumori di processo e dei rumori di misura.

3.1 ARCHITETTURA DI SISTEMA

Il sistema progettato ha lo scopo di eseguire SFA su una piattaforma hardware installata bordo treno, la quale riceve i dati *raw* dai sensori e li elabora al fine di stimare la progressiva chilometrica del treno in ciascun istante di tempo.

Tale posizione sarà inviata, attraverso un modem LTE:

- All'OBCU, per essere utilizzata attivamente all'interno del sistema di *interlocking*
- Ad un arbitrario host che esegue un software grafico di tracciamento del treno: il RailTrackTool (RTT)

È possibile descrivere l'architettura di sistema a due differenti livelli: architettura a livello *hardware* e architettura a livello *software*.

3.1.1 Architettura Hardware

Sul treno è stata installata una scheda Nvidia TX-Jetson quale piattaforma di elaborazione dei dati. I sensori atti a campionare le misurazioni sono stati collegati alla scheda mediante appositi bus dati.

Il *sensor set* utilizzato in quest'applicazione è composto dai seguenti sensori: Ad una data frequenza, i sensori inviano dati verso la scheda; quest'ultima, dopo aver eseguito un'iterazione di SFA¹, invia a OBCU (e/o a RTT) la stima della posizione del treno attraverso apposita modulazione di segnale elettromagnetico, in accordo con il protocollo LTE. Lo schema riportato in figura 11 mostra un diagramma dell'architettura hardware appena descritta.

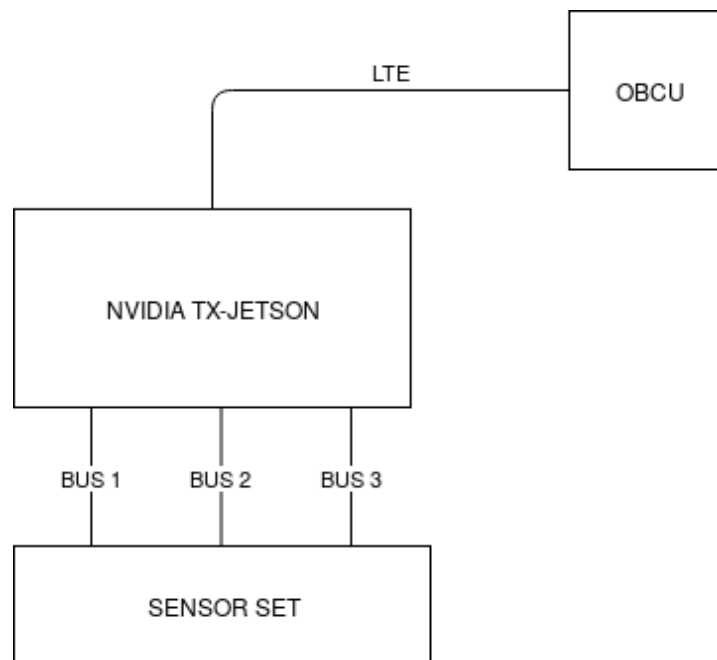


Figura 11: Architettura hardware bordo treno

3.1.2 Architettura Software

Sulla scheda è installato il sistema operativo Ubuntu 16.04 LTS, basato su kernel Linux.

Qualunque software menzionato in questa Tesi è stato sviluppato in

¹ Ossia, un aggiornamento di UKF

linguaggio C++.

Un set di tre moduli software, denominati interface-modules, sono in esecuzione sulla scheda.

Sia MOD_*i* l'*i*-esimo modulo software del set e SERIAL_*i* l'*i*-esima interfaccia seriale della scheda, per $i = 1, 2, 3$.

Il funzionamento di interface-modules è il seguente:

- IMU invia la coppia (accelerazione, velocità angolare) a SERIAL_1, MOD_1 legge i valori da SERIAL_1 e li invia a un secondo modulo software, denominato listener, attraverso l'interfaccia di rete loopback, in quanto listener esegue anch'esso sulla scheda;
- Odometro invia il valore di velocità lineare a SERIAL_2, MOD_2 legge i valori da SERIAL_2 e li invia a listener;
- GPS invia i valori di (latitudine, longitudine, altitudine) a SERIAL_3, MOD_3 legge i valori da SERIAL_3 e li invia a listener.

La comunicazione fra interface-modules e listener avviene attraverso un protocollo applicazione stabilito arbitrariamente, sia esso INPUT_PROTOCOL, mentre a livello di trasporto si utilizza UDP.

I valori ricevuti da listener vengono salvati in apposite *strutture dati* rappresentanti misure della stessa sorgente:

- I vettori accelerazione e velocità angolare rilevati da IMU vengono convertiti nella struttura dati IMU_POD;
- La velocità rilevata dal Radar/Odometro viene convertita nella struttura dati ODO_POD;
- La posizione rilevata dal GPS viene infine convertita nella struttura dati GPS_POD.

Il software che esegue effettivamente SFA è compilato come una libreria, FusionLib, utilizzata da listener. FusionLib dispone di interfacce software in entrata e in uscita, ossia listener è in grado di inviare le misurazioni a SFA, quali variabili di tipo IMU_POD, ODO_POD, GPS_POD ed altresì di ricevere la stima della posizione del treno, essendo questo l'output dell'algoritmo, quale variabile di tipo SFA_OUTPUT_POD.

Ogniqualevolta listener riceva un'uscita da SFA, si fa carico della comunicazione tra scheda e OBCU/RTT. Questa comunicazione, fisicamente possibile attraverso l'utilizzo del modem LTE, avviene utilizzando un protocollo di rete arbitrario a livello applicazione, sia esso OUTPUT_PROTOCOL,

mentre al livello di trasporto la scelta è nuovamente ricaduta su UDP per ragioni di efficienza.

Uno schema dell'architettura software è quello mostrato in figura 12.

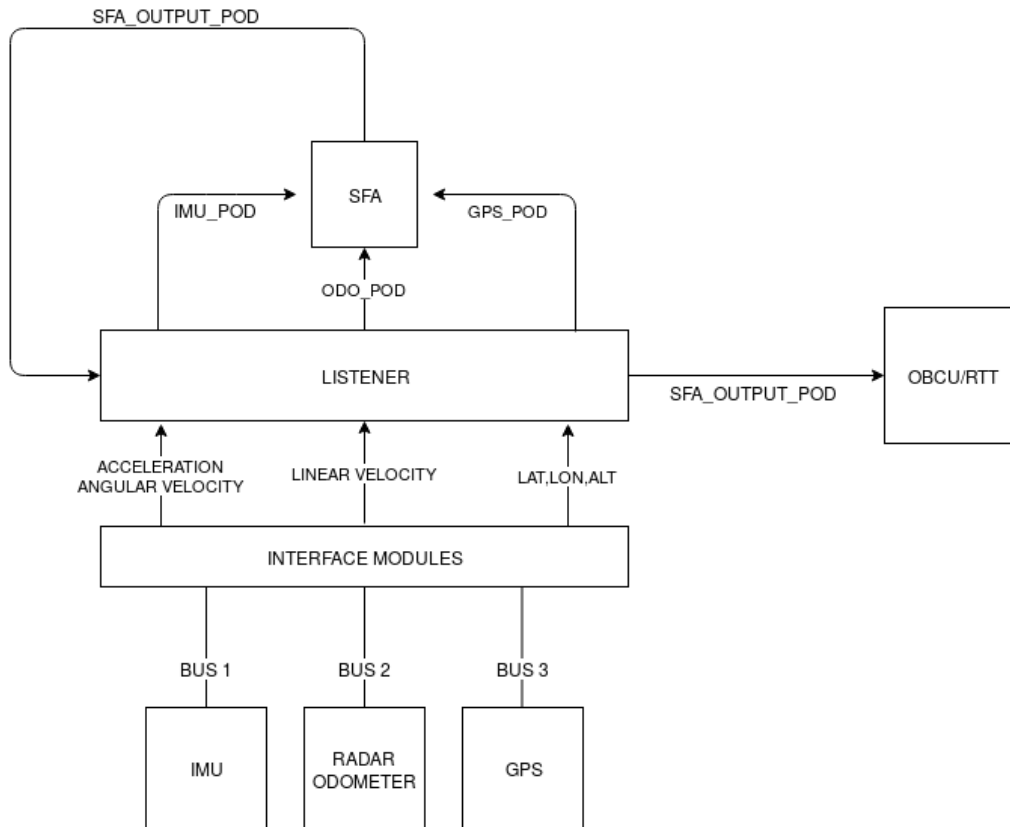


Figura 12: Architettura software bordo treno

3.2 GESTIONE DELLA TRASMISSIONE DEI DATI

Nella precedente sezione sono stati brevemente introdotti i protocolli di comunicazione implementati per gestire la comunicazione UDP:

- In entrata, tra interface-modules e listener (INPUT_PROTOCOL);
- In uscita, tra listener e OBCU/RTT (OUTPUT_PROTOCOL).

3.2.1 Trasmissione in entrata

Per trasmettere i dati da interface-modules a listener, e dunque dai sensori al modulo software che implementa SFA, è stato realizzato un protocollo di comunicazione denominato INPUT_PROTOCOL.

Tale protocollo fa affidamento a livello trasporto su UDP per massimizzare la velocità di trasmissione senza dover necessariamente rinunciare all'integrità dei messaggi trasmessi, in quanto la comunicazione avviene tra processi in esecuzione sulla stessa macchina, e la probabilità che un messaggio venga perso o che questo venga ricevuto con errori, è assolutamente trascurabile.

Il protocollo definisce il formato del *payload* del pacchetto UDP che contiene le informazioni di IMU, Radar/Odometro, o GPS, ed è descritto in tabella 3.

A discrezione del valore del campo SENSOR_TYPE si distingue il tipo di

Campo	Descrizione	Indici di bit	Tipo
SENSOR_TYPE	ID Sensore Sorgente	0-7	uint8_t
Seq.N0	Numero di sequenza	8-23	uint16_t
N_INT	Numero di interi trasmessi	24-31	uint8_t
N_DOUBLE	Numero di double trasmessi	31-38	uint8_t

Tabella 3: Protocollo di comunicazione in entrata

informazione trasportata dal pacchetto, come descritto in tabella 4.

I pacchetti GROUND TRUTH sono pacchetti di inizializzazione dell'algo-

Valore di SENSOR_TYPE	Sorgente del pacchetto
1	IMU
2	ODOMETRO
3	GPS
8	GROUND TRUTH
9	STROBE
10	STOP

Tabella 4: Significato del campo SENSOR_TYPE

ritmo: alla ricezione del pacchetto GROUND TRUTH l'algoritmo si avvia leggendo i valori trasmessi in coda al pacchetto, in accordo al valore

dei campi `N_INT` e `N_DOUBLE`. Tali valori forniscono informazioni come progressiva chilometrica e velocità iniziali del treno.

I pacchetti `STR0BE` sono inviati ogni secondo e forniscono un solo valore `double`, ossia un `timestamp` che l'algoritmo utilizza per sincronizzarsi.

Il pacchetto `STOP` non contiene alcuna informazione utile: indica soltanto all'algoritmo di terminare l'esecuzione.

Alla ricezione di un pacchetto, `listener` legge il valore del campo `SENSOR_TYPE`, e costruisce, in accordo alla relazione sorgente-struttura dati, la variabile da inviare a SFA.

Il corretto ordinamento dei pacchetti trasmessi a SFA è garantito attraverso l'esplicito utilizzo di un buffer, codificato all'interno di `listener`, in cui i pacchetti vengono temporaneamente salvati prima di essere inviati a SFA, ed eventualmente ordinati sulla base del valore del campo `Seq.NO`. Si osservi che se l'integrità non è minacciata dall'utilizzo di UDP quale protocollo di trasporto fra processi all'interno della stessa macchina fisica, altrettanto non si può dire dell'ordinamento dei messaggi. Questi potrebbero subire dei ritardi casuali in base allo stato del sistema operativo, in particolare lo *scheduling* dei processi può avere influenze determinanti sullo scorretto ordinamento dei messaggi trasmessi. Utilizzando TCP si ovvierebbe a questa problematica, ma l'overhead insito nel protocollo stesso causerebbe un notevole degrado delle performance di SFA.

3.2.2 *Trasmissione in uscita*

La trasmissione dei dati in uscita da SFA avviene, in accordo al protocollo `OUTPUT_PROTOCOL` tra `listener` e OBCU, o comunque, tra `listener` e qualunque host arbitrario che intenda ricevere le informazioni in uscita, come ad esempio un PC sul quale viene eseguito RTT.

Come specificato, la comunicazione è posta in essere, a livello fisico, attraverso il protocollo LTE, ossia un protocollo *wireless*; mentre a livello trasporto si è scelto di continuare a usare UDP in luogo di TCP, col fine di massimizzare le *performance* del sistema.

Il rischio di ricevere alcune informazioni in maniera errata, o non riceverle del tutto, è nettamente più elevato rispetto allo scenario precedente, nel caso in cui lo spazio fisico attraverso cui si propaga il segnale LTE è tale per cui quest'ultimo venga disturbato da sorgenti esterne.

Gli effetti deleteri di questa condizione sono particolarmente osservabili in alcuni tratti della linea ferrotramviaria, dove possono essere presenti numerose abitazioni e mezzi di trasporto in strada che si interpongono fisicamente tra la scheda NVidia TX-Jetson su cui esegue SFA e l'arbitra-

rio host su cui viene eseguito RTT.

Occorre tuttavia osservare che il tracciamento del treno tramite RTT non è in alcun modo legato alla *safety* del sistema, in quanto le funzionalità *safety-critical* riguardano la comunicazione tra la scheda e OBCU, ossia tra la scheda e il sistema di *interlocking*.

Questa problematica è risolta attraverso l'esplicito utilizzo di un meccanismo di acknowledgment simile a quello utilizzato da TCP: ciascun pacchetto in uscita da SFA viene indicizzato con un *sequence number* e, in ricezione, viene inviato ogni secondo un *ack* replicante l'ultimo numero di sequenza correttamente ricevuto. Solo quando il mittente riceve l'*ack* i dal destinatario invierà il messaggio contenente l'uscita indicizzata con *sequence number* $i + 1$.

Anche in questo caso, il protocollo definisce il formato del *payload* del pacchetto UDP inviato da listener, ed è riportato in tabella 5.

In ricezione dovrà essere inviato il pacchetto *ack* al mittente, ed il suo

Campo	Descrizione	Indici di bit	Tipo
Seq.NO	Numero di sequenza	0-15	uint16_t
ECEF_X	Coordinata X del treno	16-79	double
ECEF_Y	Coordinata Y del treno	80-143	double
ECEF_Z	Coordinata Z del treno	144-207	double
FU_ARC_LEN	Progressiva chilometrica	208-271	double

Tabella 5: Protocollo di comunicazione in uscita

formato è descritto in tabella 6. Si osserva che SFA produce la stima

Campo	Descrizione	Indici di bit	Tipo
ACK	Ultimo Seq.NO	0-15	uint16_t

Tabella 6: Formato del pacchetto di *ack*

della posizione del treno sia in termini di progressiva chilometrica che di coordinate ECEF.

ECEF è acronimo di *Earth Centered Earth Fixed* ed è uno standard che misura le coordinate geografiche di un oggetto come la terna $P = (x, y, z)$. Ciascuna coordinata viene espressa considerando la *proiezione su piano* della Terra, e prendendo come origine O l'intersezione fra l'equatore e il meridiano di *Greenwich*.

Le coordinate ECEF misurano tre lunghezze, pertanto, in accordo a SI,

esse sono espresse in metri.

Nella prossima sezione, viene descritto uno scenario di esempio del comportamento del sistema a *runtime*.

3.3 SCENARIO DI ESEMPIO

Si suppongano le condizioni iniziali riportate in tabella 7.

Velocità	ECEF	Progressiva	IMU Sample Rate	ODO Sample Rate
0ms^{-1}	(0, 0, 0) m	0 km	100 Hz	20 Hz

Tabella 7: Condizioni iniziali

1. $t = 0$:

- interface-modules invia a listener il seguente pacchetto GROUND TRUTH:

SENSOR_TYPE	Seq. NO	N_INT	N_DOUBLE
0x08	0x00	0	5

E vi accoda i seguenti tre valori double: 0.0, 0.0, 0.0 ossia le coordinate ECEF iniziali, il seguente valore double: 0.0, ossia la velocità lineare iniziale, e infine il valore double: 0.0 che rappresenta la progressiva chilometrica iniziale.

- listener riceve il pacchetto e inizializza SFA con:
 - ECEF iniziali: (0, 0, 0)
 - Velocità lineare iniziale: 0.0
 - Progressiva chilometrica iniziale: 0.0

2. $t = t_0$:

- IMU campiona il seguente vettore accelerazione:

$$\mathbf{a} = (0.0001, -0.0001, -9.8100)$$

Assieme al seguente vettore velocità angolare:

$$\mathbf{v}_{\text{ang}} = (0.0003, -0.0001, 0.0002)$$

E lo invia, tramite SERIAL_1, a MOD_1 di interface-modules.

- MOD_1 invia a listener il seguente pacchetto IMU:

SENSOR_TYPE	Seq. NO	N_INT	N_DOUBLE
0x01	0x01	0	6

Accodandovi nell'ordine il vettore accelerazione, e il vettore velocità angolare.

- listener riceve il pacchetto, crea e invia a SFA la seguente variabile IMU_POD:

- Seq.NO = 1
- Epoch = t_0
- ACC_X = 0.0001
- ACC_Y = -0.0001
- ACC_Z = -9.8100
- GYRO_X = 0.0003
- GYRO_Y = -0.0001
- GYRO_Z = 0.0002

- SFA elabora il pacchetto e inizia una computazione parallela per fornire a listener una variabile SFA_OUTPUT_POD della forma:

- Seq.NO = 0
- ECEF_X = E_X
- ECEF_Y = E_Y
- ECEF_Z = E_Z
- FU_ARC_LEN = P_{KM}

$$3. \quad t_0 < t < t_0 + \frac{1}{\text{ODO_SAMPLE_RATE}} = t_0 + \frac{1}{20}$$

Fintantoché l'odometro non campiona il suo primo valore di velocità, si ripetono le operazioni viste al passo precedente per ogni campionamento di IMU.

$$4. \quad t = t_0 + \frac{1}{20}$$

- Odometro campiona il seguente valore di velocità:

$$\mathbf{a} = (1.0010)$$

E lo invia, tramite SERIAL_2, a MOD_2 di interface-modules.

- MOD_2 invia a listener il seguente pacchetto ODOMETRO:

SENSOR_TYPE	Seq. NO	N_INT	N_DOUBLE
0x02	Seq_NO	0	2

Accodandovi nell'ordine il valore di velocità rilevato, e il valore dello scarto quadratico medio della sorgente, noto a priori, in quanto caratteristica tecnica intrinseca dello strumento di misura, il radar; sia esso SIGMA_RADAR.

- listener riceve il pacchetto, crea e invia a SFA la seguente variabile ODO_POD:
 - Seq.NO = Seq_NO
 - Epoch = $t_0 + \frac{1}{20}$
 - vel = 1.0010
 - sigma = SIGMA_RADAR
- SFA elabora il pacchetto e utilizza la rilevazione di velocità in maniera utile a correggere il *drift* di IMU, al fine di produrre una stima della posizione più accurata.

5. $t = n t_0 \quad n \in \mathbb{N}^+$

Ogni secondo, il modulo STROBE di interface-modules, invia a listener un pacchetto della forma:

SENSOR_TYPE	Seq. NO	N_INT	N_DOUBLE
0x09	Seq_NO	0	1

Accodandovi un *timestamp* che listener inoltra a SFA per scopi di sincronizzazione.

Quanto elencato viene ripetuto per ciascun campionamento successivo di IMU e odometro.

Non appena un'uscita di SFA si rende disponibile a listener questo si comporta come segue:

- listener riceve la variabile SFA_OUTPUT_POD, da SFA;

- listener costruisce il seguente pacchetto da inviare a OBCU, o a RTT:
 - Seq.NO = 0x00
 - ECEF_X = SFA_OUTPUT_POD.E_X
 - ECEF_Y = SFA_OUTPUT_POD.E_Y
 - ECEF_Z = SFA_OUTPUT_POD.E_Z
 - FU_ARC_LEN = SFA_OUTPUT_POD.P_{KM}
- OBCU, o RTT, riceve il pacchetto e invia a listener l'ack 0x00.

3.4 POSSIBILI SVILUPPI

Il sistema, così come è stato descritto, rappresenta essenzialmente un *core* minimale di un sistema di posizionamento basato su SFA, limitato rispetto alle potenzialità dell'algoritmo e comunque non esente da vulnerabilità legate alla *security*. In questa sezione verranno discusse le principali problematiche della soluzione descritta, in che modo queste possono essere risolte, e quali tecniche possono essere usate per migliorare l'usabilità del sistema.

3.4.1 Problematiche legate alla security

Per *security* si intende un insieme di tecniche che hanno come scopo la protezione dei dati, siano essi stoccati in un sistema informatico, oppure transitanti attraverso un sistema di telecomunicazione.

Tale protezione viene assicurata contro specifiche *minacce*, le quali sfruttano opportune *vulnerabilità*.

La *security* viene garantita attraverso l'uso di appropriate *tecniche preventive*, oppure *contromisure* applicabili in caso di violazioni alle principali *misure* della *security*:

- Integrità
- Confidenzialità
- Autenticazione

In un sistema *safety-critical* come quello descritto, una violazione di *security* potrebbe portare a una violazione di *safety*, pertanto è fondamentale ridurre al minimo le vulnerabilità del sistema. Nella fattispecie descritta

in questa Tesi, tuttavia, la confidenzialità non è una misura fondamentale, mentre lo sono l'integrità e l'autenticazione.

Minacce all'integrità

È stato già discusso che l'utilizzo del protocollo UDP a livello di trasporto, non garantisce affatto che i messaggi ricevuti da OBCU siano corretti e ordinati.

Per ovviare al problema dell'ordinamento è stato implementato il già descritto meccanismo di acknowledgment, tuttavia esso fa l'implicita assunzione che se si è in grado di leggere correttamente il numero di sequenza del pacchetto ricevuto, questo non sia stato alterato.

Si consideri il seguente scenario:

- listener invia a OBCU il seguente pacchetto:
 - Seq.NO = 0x17
 - ECEF_X = SFA_OUTPUT_POD.E_X
 - ECEF_Y = SFA_OUTPUT_POD.E_Y
 - ECEF_Z = SFA_OUTPUT_POD.E_Z
 - FU_ARC_LEN = SFA_OUTPUT_POD.P_{KM}
- OBCU riceve il seguente pacchetto:
 - Seq.NO = 0x25
 - ECEF_X = SFA_OUTPUT_POD.E_X
 - ECEF_Y = SFA_OUTPUT_POD.E_Y
 - ECEF_Z = SFA_OUTPUT_POD.E_Z
 - FU_ARC_LEN = SFA_OUTPUT_POD.P_{KM}

Per come è stato descritto il protocollo, OBCU accetta passivamente che il numero di sequenza ricevuto sia 0x25, anche se prima di questo era stato letto il valore 0x16, ed invierà a listener l'*ack* 0x25.

In questo caso, OBCU dovrebbe essere progettato in maniera tale da controllare sempre di ricevere un numero di sequenza pari all'ultimo ricevuto +1. Dal momento che, viste le caratteristiche intrinseche del protocollo, è impossibile che listener abbia inviato il pacchetto con numero di sequenza 0x25 se l'ultimo *ack* ricevuto non era 0x24, è probabile che, attraversando il canale, il pacchetto abbia subito alterazioni casuali in tutti i suoi bit, e quindi anche l'informazione di posizione potrebbe essere

alterata.

Per ovviare definitivamente alla problematica dell'integrità, è opportuno integrare nel protocollo l'uso di una *funzione hash*. Il protocollo verrebbe modificato come segue:

- listener prepara il pacchetto contenente le informazioni di SFA_OUTPUT_POD;
- listener calcola $H(\text{SFA_OUTPUT_POD}) = y$;
- listener invia la coppia $(\text{SFA_OUTPUT_POD}, y)$

In ricezione, OBCU ricalcola $H(\text{SFA_OUTPUT_POD}) = y'$, e accetta il messaggio solo se $y' = y$. Infatti, grazie alla proprietà delle funzioni *hash*, una minima variazione del messaggio m causa una grande variazione del *digest* $H(m)$, quindi è altamente improbabile che un'alterazione casuale dei bit trasmessi, sia essa $(\text{SFA_OUTPUT_POD_WRONG}, Y_WRONG)$, mantenga la proprietà $H(\text{SFA_OUTPUT_POD_WRONG}) = Y_WRONG$.

Minacce all'autenticazione

Si consideri il caso in cui un malintenzionato sia in grado di inviare messaggi a OBCU e abbia interesse nel non segnalare al sistema di *interlocking* l'avvicinamento del treno alla JA.

L'attaccante si comporta come segue:

- Intercetta il messaggio $(\text{SFA_OUTPUT_POD}, H(\text{SFA_OUTPUT_POD}))$
- Modifica la posizione del treno ponendola lontano da una JA, forgiando un nuovo messaggio, sia esso SFA_OUTPUT_POD_DANGEROUS
- Calcola $H(\text{SFA_OUTPUT_POD_DANGEROUS}) = Y_DANGEROUS$
- Invia a OBCU la coppia $(\text{SFA_OUTPUT_POD_DANGEROUS}, Y_DANGEROUS)$

Per ovviare a questa problematica si potrebbero usare le seguenti tecniche:

1. Cifratura del *digest* della funzione *hash* con una chiave simmetrica condivisa tra listener e OBCU;
2. Cifratura del *digest* della funzione *hash* con la chiave privata di listener (Firma Digitale DSA);
3. Uso di una funzione *hash* che prende in ingresso sia il messaggio che una chiave simmetrica condivisa tra listener e OBCU (HMAC);

4. Accodare un segreto condiviso tra listener e OBCU al messaggio prima di calcolarne il *digest*.

In ciascuno di questi scenari, fatta assunzione di proprietà di *strong collision resistance* della funzione *hash* utilizzata, si garantisce che il messaggio può essere stato inviato solo da listener, in quanto un attaccante non avrebbe modo di modificare il messaggio e calcolare un *digest* valido. La soluzione meno dispendiosa in termini di complessità computazionale e più adatta a un simile scenario è la soluzione 4, in quanto non è necessario garantire anche la *non-ripudiabilità* ma solo l'autenticazione e l'integrità.

3.4.2 Miglioramenti al protocollo in uscita

Il sistema realizzato esegue una versione di SFA basata su un UKF. Ad ogni campionamento di IMU, Odometro, o GPS, viene eseguita la fase di *aggiornamento* del filtro che comprende la valutazione di quantità interessanti dal punto di vista di valutazione delle *performance* dell'algoritmo. In particolare, si potrebbe analizzare il comportamento di SFA al variare di parametri come:

- La frequenza di aggiornamento;
- Il tipo di misure con cui viene effettivamente aggiornato il filtro.

Nel classico scenario di utilizzo, che comprende la comunicazione con OBCU, l'unica informazione effettivamente utile è la progressiva chilometrica.

In uno scenario di *acceptance test*, naturalmente preliminare al rilascio del sistema, potrebbe essere utile fornire a RTT, oltre alle informazioni sulla posizione, anche i valori in entrata all'algoritmo che hanno prodotto il risultato di posizione.

Inoltre, se fosse trasmessa anche la matrice di covarianza della stima a posteriori, verrebbero fornite indicazioni importanti sul comportamento qualitativo dell'algoritmo.

Queste modifiche comporterebbero una minima variazione di OUTPUT_PROTOCOL in quanto occorrerebbe semplicemente prevedere dei campi aggiuntivi al formato del pacchetto, che si aggiungerebbero ai campi relativi alle coordinate ECEF e alla progressiva chilometrica.

RISULTATI SPERIMENTALI

In questo capitolo vengono discussi i risultati degli esperimenti effettuati sul sistema.

Gli esperimenti sono divisi principalmente in due categorie:

- Esperimenti *offline*:

I dati di IMU, Odometro e GPS vengono generati attraverso RTT e passati a un'istanza locale di FusionLib.

I risultati forniti da SFA vengono mostrati su RTT in forma grafica.

Questi esperimenti sono essenzialmente *Integration Test* volti a validare l'implementazione di SFA e vengono eseguiti interamente con RTT, il quale genera un report per ogni esperimento effettuato.

In figura 13 si mostra lo schema logico di un esperimento effettuato con RTT.

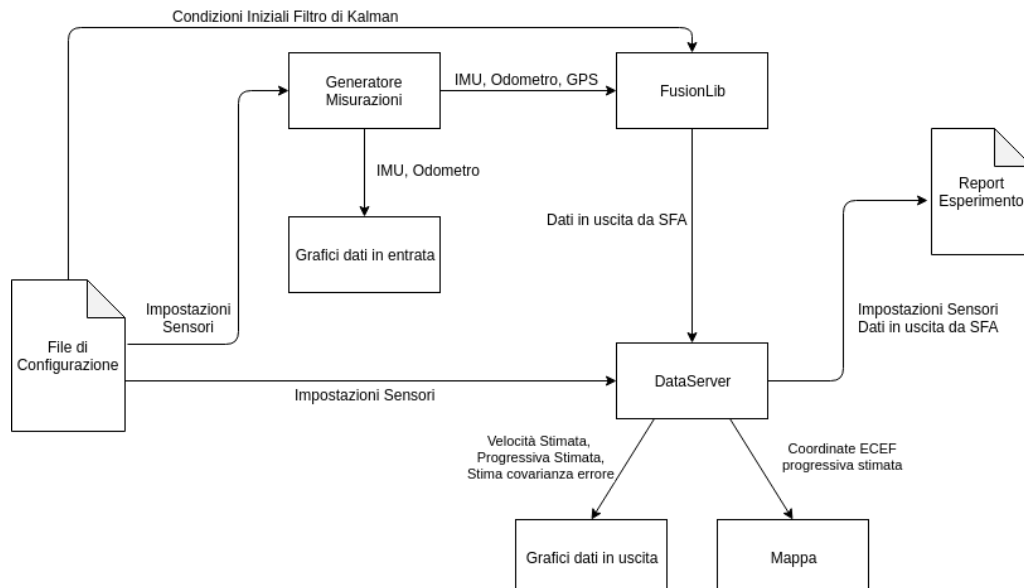


Figura 13: Esperimenti offline

- Esperimenti *online*:

Il software SynthDataGenApp (SDGA), essenzialmente un'opportuna estrazione di codice da RTT, è un software capace di generare i dati di IMU, Odometro e GPS.

SDGA si comporta come un'astrazione di interface-modules, e le misurazioni prodotte vengono inviate in accordo a INPUT_PROTOCOL a una scheda NVidia TX-Jetson su cui è replicato l'ambiente HW e SW bordo treno. Tali dati sono inviati alla scheda attraverso un'interfaccia ethernet, utilizzata in luogo dell'interfaccia loopback prevista dal sistema reale.

La scheda invia i dati in uscita da SFA, attraverso la medesima interfaccia ethernet, al mittente dei dati in entrata in accordo a OUTPUT_PROTOCOL.

In questo caso, l'interfaccia ethernet sostituisce l'utilizzo del modem LTE.

Questi esperimenti sono essenzialmente *End to End Test* e hanno lo scopo di validare i protocolli di comunicazione.

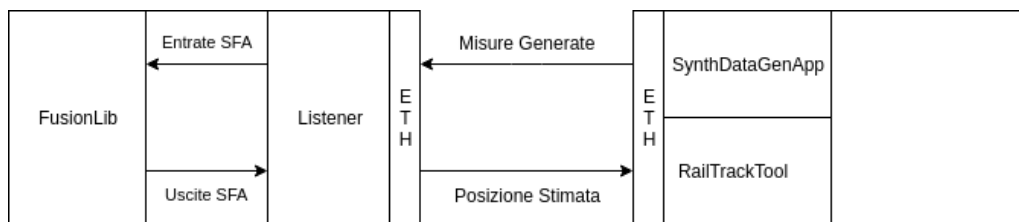


Figura 14: Esperimenti online

La linea ferrotramviaria scelta come ambiente di prova è la linea T1 della Tramvia di Firenze, che collega la stazione di *Villa Costanza*, sita nel comune di Scandicci, all'ospedale di *Careggi*, sito quest'ultimo nel comune di Firenze. La linea è mostrata in figura 15.

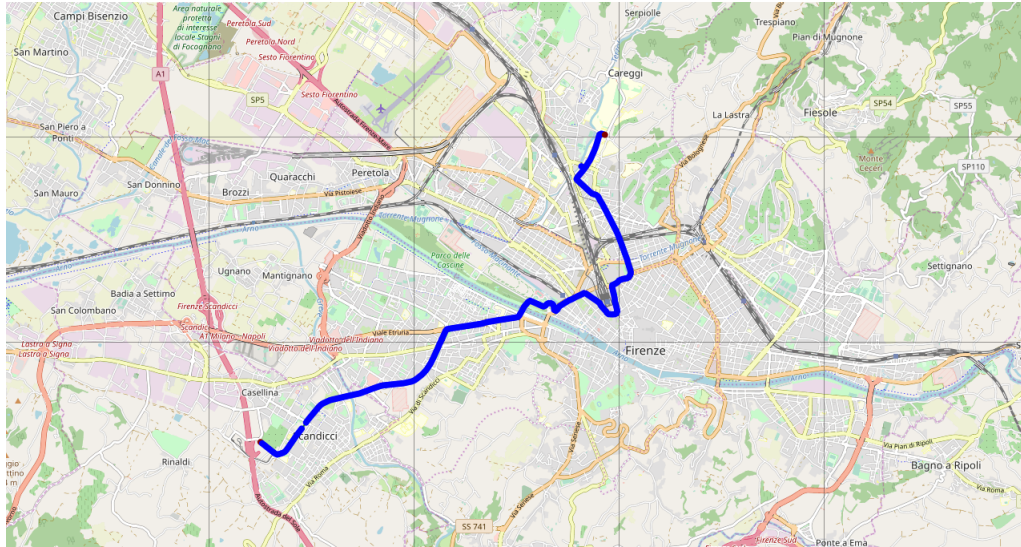


Figura 15: Tramvia di Firenze - Linea T1

4.1 SOFTWARE IMPIEGATI

In questa sezione vengono descritti i SW utilizzati negli scenari sopra descritti.

4.1.1 *FusionLib*

Come accennato nel Capitolo 3, FusionLib è una *libreria software* che implementa SFA. Tale libreria viene compilata sia su Windows 10, su cui esegue RTT, che su Ubuntu 16.04 LTS, su cui esegue listener. FusionLib è pertanto una libreria inclusa da listener e RTT.

Per determinare la posizione del treno lungo la traccia FusionLib utilizza le informazioni ricevute dal chiamante, quindi le misure, combinate con le informazioni della traccia su cui si assume il treno si stia muovendo. Tali informazioni sono salvate in un *database SQL*. Lo schema logico è riportato in figura 16.

La traccia entro cui il treno si muove è rappresentata da una *spline*. Una *spline* è una funzione polinomiale a tratti che interpola una serie di N coppie (x_i, y_i) , dette *nodi*, utilizzando differenti funzioni polinomiali per ciascun intervallo (x_i, x_{i+1}) per $i = 1, \dots, N - 1$.

Nelle figure 17 e 18, si mostra come una spline polinomiale sia in grado di approssimare in maniera accettabile una funzione sufficientemente

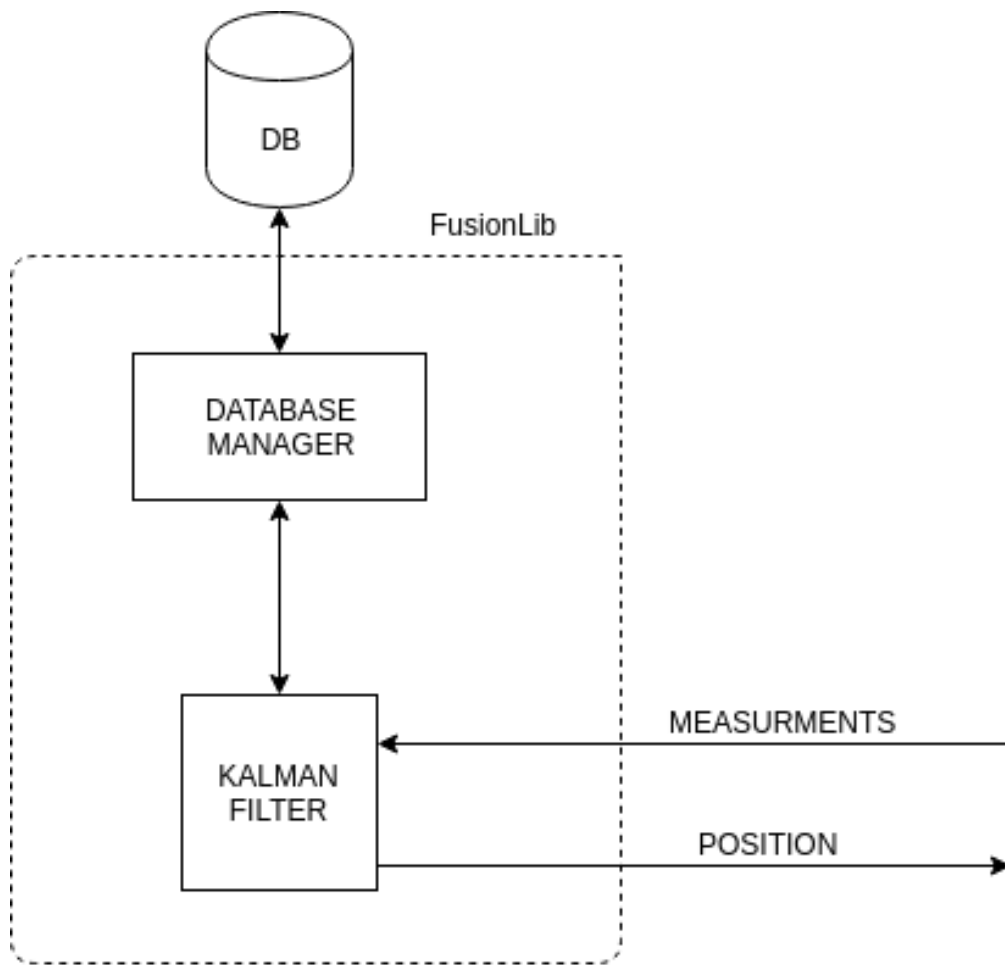


Figura 16: Architettura logica di FusionLib

regolare.

La logica è quella di campionare, per una data traccia, una serie di coppie $(x_i, y_i) = (\text{longitudine}, \text{latitudine})$ di punti geografici appartenenti alla traccia. Queste coppie vengono salvate nel database insieme al valore P_k di progressiva chilometrica che caratterizza ciascuna coppia. Durante l'esecuzione di SFA, il database viene consultato per recuperare il valore corretto delle coordinate geografiche attuali del treno:

- La k -esima ricezione di misure causa l'aggiornamento del filtro;
- L'aggiornamento del filtro produce la k -esima stima della pro-

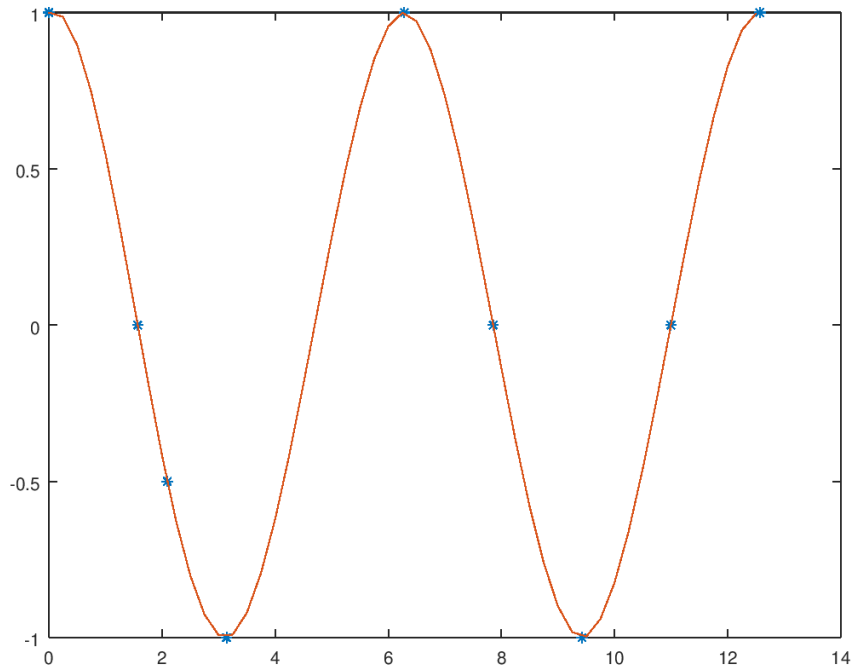


Figura 17: Spline interpolante la funzione $\cos(x)$ nelle ascisse $\frac{k\pi}{2}$ $k = 0, \dots, 8$

gressiva chilometrica attuale: \hat{x}_k . La distanza percorsa rispetto all'iterazione precedente è data da:

$$D_k = \hat{x}_k - \hat{x}_{k-1}$$

- Dal database vengono recuperate le coppie (x_0, y_0) , (x_1, y_1) della traccia, tali per cui:
 1. La progressiva chilometrica associata alla coppia (x_0, y_0) è il massimo P_k tale per cui $P_k < \hat{x}_k$
 2. La prorogressiva chilometrica associata alla coppia (x_1, y_1) è il minimo P_k tale per cui $P_k > \hat{x}_k$

In altre parole, si è determinato l'intervallo della spline in cui il treno è stimato trovarsi al passo k .

È opportuno precisare che le coppie ottenute dal database non sono in formato ECEF, infatti esse sono espresse in gradi. Tuttavia, è possibile applicare una nota trasformazione per convertire la coppia $(x_i, y_i) = (\text{longitudine}, \text{latitudine})$ nel formato ECEF.

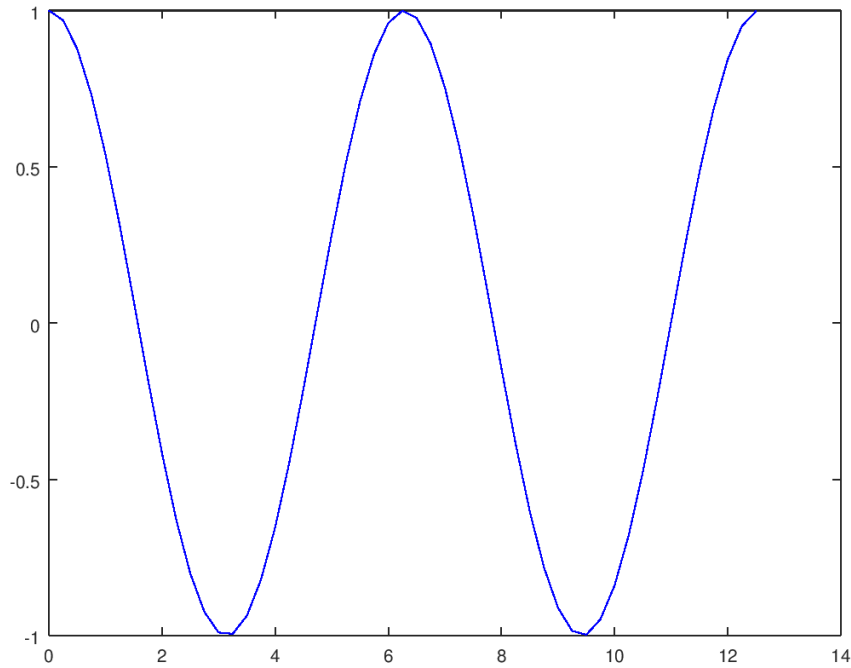


Figura 18: Funzione $\cos(x)$ nell'intervallo reale $[0, 4\pi]$

- Date le coppie individuate, se ne determina il polinomio interpolante¹. Sia esso $p(x)$.
- Le coordinate ECEF al passo k , (x_k, y_k) , sono date da:

$$\begin{cases} x_k = x_0 + D_k \\ y_k = p(x_0 + D_k) = p(x_k) \end{cases}$$

4.1.2 RTT

RTT ha più modalità di funzionamento:

1. INTERFACE_EXT_FILTER:

In questa modalità, RTT funziona come interfaccia verso un'istanza esterna di FusionLib per visualizzare le uscite di SFA su una mappa. I dati sono letti da una *socket* UDP in accordo al protocollo

¹ Si osservi che è sempre possibile, a condizione che $x_0 \neq x_1$.

OUTPUT_PROTOCOL.

In questo caso RTT ha il ruolo di OBCU.

2. INTERFACE_SENSOR:

In questa modalità RTT si interfaccia verso interface-modules, o comunque qualunque processo che sia in grado di fornire misure di IMU, Odometro e GPS via UDP, in accordo al protocollo INPUT_PROTOCOL. I dati ricevuti vengono inviati alla propria istanza di FusionLib durante un'esecuzione di SFA.

In questo caso RTT ha il ruolo di listener.

3. STANDALONE:

Modalità standard di funzionamento, come descritta in figura 13.

In questa modalità, RTT genera misure le misure da inviare alla propria istanza di FusionLib per eseguire SFA.

In questo caso RTT simula l'intero processo del sistema di posizionamento.

La modalità INTERFACE_EXT_FILTER viene usata per visualizzare graficamente i risultati degli esperimenti *online*.

La modalità STANDALONE viene usata per gli esperimenti *offline*.

Per quanto riguarda la modalità INTERFACE_SENSOR, essa non ha una particolare applicabilità sperimentale, infatti questa modalità è stata principalmente usata per scopi di *debug* dei protocolli di comunicazione. Questo aspetto sarà discusso in seguito.

4.1.3 Listener

Modulo in esecuzione su NVidia TX-Jetson, il cui funzionamento è stato descritto nel Capitolo 3.

Ricapitolando, listener riceve le misure dei sensori in accordo a INPUT_PROTOCOL ed esegue SFA, aggiornando il KF con le misure ricevute in ingresso.

Non appena viene calcolata un'uscita di SFA, questo software è incaricato di inoltrare tale uscita a OBCU o a RTT. Negli scenari sperimentali descritti in questo Capitolo, le uscite di SFA verranno inviate a RTT.

4.1.4 SDGA

Semplice software estratto da RTT. Il compito di SDGA è generare le misure ed inoltrarle a listener, secondo il protocollo INPUT_PROTOCOL.

4.2 ESPERIMENTI OFFLINE

Lo scopo degli esperimenti offline era quello di validare l'implementazione di SFA e di valutare il suo comportamento al variare dei parametri di configurazione.

4.3 ESPERIMENTI ONLINE

CONCLUSIONI

Lo scopo della Tesi era quello di mostrare un sistema di posizionamento ferrotramviario basato su SFA, alternativo al sistema attualmente in uso. Nel Capitolo 1, definiti i sistemi ferroviari e i sistemi ferrotramviari, le loro similitudini e le loro differenze; è stato introdotto il problema del posizionamento: determinare la posizione di un treno lungo una traccia. Questo problema è di fondamentale importanza poichè il posizionamento di un treno attiva il sistema di *interlocking*, il quale deve garantire un attraversamento sicuro e corretto delle JA, al fine di evitare fallimenti catastrofici.

È stato descritto lo stato dell'arte nell'ambito del posizionamento ferrotramviario e ne sono state evidenziate le relative criticità; si è dunque introdotto il concetto di SFA quale sistema di posizionamento ferroviario atto a risolvere molte delle criticità esposte.

Nel Capitolo 2 è stato formalizzato, da un punto di vista matematico, il concetto di sistema dinamico, quale è un treno in movimento lungo una traccia ferrotramviaria. In particolare, sono stati formalizzati i concetti di rumore di processo e rumore di misura. In quest'ottica, sono stati introdotti i KF come base matematica di un algoritmo in grado di stimare lo stato di un sistema dinamico caratterizzato da rumore intrinseco, attraverso misurazioni caratterizzate anch'esse da rumore..

Nel Capitolo 3 è esposta un' architettura essenziale di un sistema di posizionamento ferrotramviario che sia in grado di sfruttare un algoritmo SFA.

Sono state evidenziate le criticità di tale architettura e le relative mitigazioni.

Il Capitolo 4 rappresenta infine la parte *sperimentale* della Tesi: sono mostrati gli esperimenti effettuati, i risultati ottenuti, e di conseguenza gli argomenti a supporto dell'utilizzo di SFA come sistema di posizionamento ferrotramviario.

BIBLIOGRAFIA

- [1] X. Liu, A. Goldsmith, *Kalman Filtering with Partial Observation Losses*, Department of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, CA 94305-9515, USA (Cited on page 18.)
- [2] H. Kopetz, *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications 2nd edn*, Springer, New York (2011) (Cited on page 20.)
- [3] A. Ceccarelli et al, *Basic Concepts on Systems of Systems, Cyber-Physical Systems of Systems*, Springer (2017) (Cited on page 21.)
- [4] H. Kopetz, W. Ochsenreiter, *Clock synchronization in distributed real-time systems*, IEEE (1987) (Cited on page 21.)
- [5] K. Wolter et al, *Resilience Assessment and Evaluation of Computing Systems*, Springer (2012) (Cited on page 22.)
- [6] M.J. Pont, *Patterns for Time-Triggered Embedded Systems*, Addison-Wesley (2001) (Cited on page 23.)
- [7] H. Kopetz, *Event-Triggered versus Time-Triggered Real-Time Systems*, Springer (1991) (Cited on page 23.)
- [8] A. Mirabadi, N. Mort, F. Schmid, *Application of sensor fusion to railway systems*, IEEE, Conference Paper, 1996.