



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

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

UTILIZZO DI UN ALGORITMO SENSOR
FUSION NELL'AMBITO DELLA
LOCALIZZAZIONE FERROTRAMVIARIA

USE OF A SENSOR FUSION ALGORITHM IN
THE AREA OF TRAMWAY LOCALIZATION

ALEX FOGLIA

ANDREA BONDAVALLI

Anno Accademico 2018-2019

INDICE

1	Stato dell'Arte	7
1.1	Sistemi Ferroviari e Ferrotramviari	7
1.2	Il Problema del Posizionamento	8
1.2.1	Possibili Sviluppi	12
2	Sensor Fusion	15
2.1	Panoramica	15
2.1.1	Sistemi Dinamici	15
2.1.2	Misure e Rumore	16
2.2	I Filtri di Kalman	17
2.2.1	Filtro di Kalman Lineare	18
3	Applicazione di SFA: La Tramvia di Firenze	19
3.1	Architettura di Sistema	20
3.1.1	Architettura lato treno	20

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Segnalazioni semaforiche ferrotramviarie	12
-----------	--	----

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	Treno in arrivo alla stazione ferroviaria di Firenze Santa Maria Novella	8
Figura 2	Tramvia di Danhai, Taipan	8
Figura 3	Schema di un tipico scenario tramviario	9
Figura 4	UCS realizzato da Thales Italia SPA	10
Figura 5	Conta Assi	11
Figura 6	Esempio di <i>Point Machine</i> installata su una traccia ferrotramviaria	11
Figura 7	Schema SFA	13
Figura 8	Grafico dell' errore di stima della posizione con $\alpha = 10^0, \varepsilon = 10^{-3}$	17
Figura 9	Tramvia di Firenze - Linea T1	19
Figura 10	Architettura hardware bordo treno	22
Figura 11	Architettura software bordo treno	23

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 particolare treno all'interno di una particolare traccia ferroviaria. Spesso questa stima viene espressa come progressiva chilometrica rispetto all'origine della linea, oppure più raramente come coordinata geografica. Il problema del posizionamento sorge nel momento in cui, per ragioni



Figura 3: Schema di un tipico scenario tramviario

di *safety*, particolari sezioni di una traccia ferroviaria o ferrotramviaria, hanno caratteristiche tali da poter permettere il transito di un solo veicolo alla volta, come nel caso di una sezione di binario condivisa fra due opposti sensi di marcia, in cui la presenza di un unico veicolo è fondamentale per evitare impatti catastrofici.

Ogni qualvolta la *safety* di un sistema risulti fondamentale, si parla di *sistema critico* o *safety-critical*.

Gli odierni sistemi di posizionamento sono sistemi *safety-critical* e 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.

Per elevato livello di confidenza si intendono rigorose evidenze matematiche sulla *safety* del sistema di posizionamento.

Per quanto concerne la *safety* in ambito ferroviario e ferrotramviario, esiste uno standard internazionale, il *Safety Integrity Level (SIL)*. Esso si articola su cinque livelli, da SIL-0 a SIL-4, ed un sistema, per essere SIL- n , con $0 \leq n \leq 4$, deve disporre di documentate garanzie quantitative e qualitative circa il suo *Mean Time to Failure (MTTF)*, ossia il tempo medio al fallimento, e sulle conseguenze di un suo eventuale fallimento.

I sistemi ferroviari e ferrotramviari, per loro natura, sono sistemi cosiddetti *fail-safe*, i quali si distinguono dai sistemi *fail-operational* in quanto i primi devono poter essere in grado di fallire in modo sicuro, ad esempio un treno che si ferma in campagna non provocherà disastri ma solamente disagi ai passeggeri; ed i secondi devono invece garantire un livello

minimo di operatività anche in caso di fallimenti.

È esempio di un sistema *fail-operational* un aereo che ha subito un fallimento e deve effettuare un atterraggio di emergenza.

Odiarne 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.

Il sottosistema di *interlocking* è la parte che si fa effettivamente carico di offrire al treno un attraversamento sicuro di una *Junction Area (JA)*, ossia del confine tra una sezione non-critica e una sezione critica di una traccia. 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.



Figura 5: Conta Assi

- *Point Machines:*

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

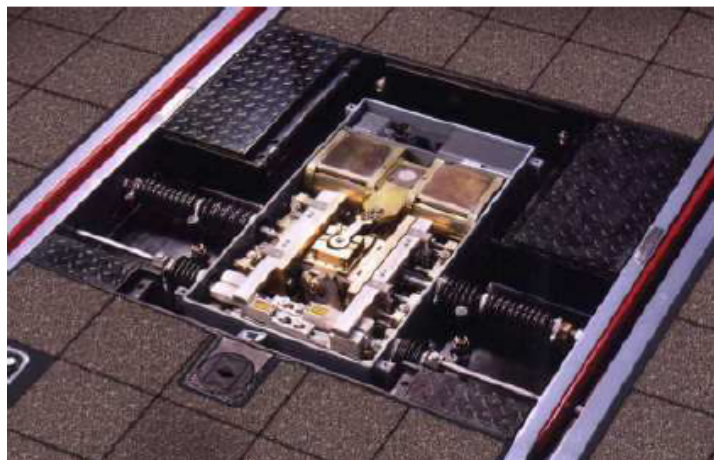


Figura 6: Esempio di *Point Machine* installata su una traccia ferrotramviaria

Il sottosistema di comunicazione treno-traccia è gestito da un computer installato bordo treno, ed ha lo scopo di fornire funzionalità non legate alla *safety* e pertanto poco interessanti. Questo sistema viene principalmente utilizzato per monitorare lo stato del traffico ferrotramviario in una architettura di *monitoring* centralizzata e si basa su comunicazioni *wireless*. In alcune applicazioni può comprendere una comunicazione





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

piú o meno diretta con il sistema di *interlocking* allo scopo di segnalare l'avvicinamento del treno a una JA.

Il sottosistema semaforico prende in ingresso informazioni dal sistema di *interlocking* ed eventualmente, dal sistema di comunicazione treno-traccia, e gestisce i segnali luminosi da mostrare sui semafori a un macchinista che si appresta a superare una JA.

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

1.2.1 Possibili Sviluppi

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 si fanno carico principalmente della comunicazione treno-traccia e forniscono in generale funzionalità non legate alla *safety*, gli apparati installati a terra sono costosi e hanno un impatto ambientale non trascurabile.

È possibile invece considerare il treno e il computer di bordo come un unico sistema, ossia il treno viene modellato come un vero e proprio

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 un vero e proprio elaboratore, che dispone di processore e memoria, e delle interfacce di I/O verso i sensori e gli attuatori. Una simile architettura di sistema, rende possibile 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 come può un CPS sostituire il complesso e costoso sistema di posizionamento tuttora operante, attraverso l'uso combinato di un insieme di sensori i cui dati rilevati vengono processati da un algoritmo noto come *Sensor Fusion Algorithm* (SFA).

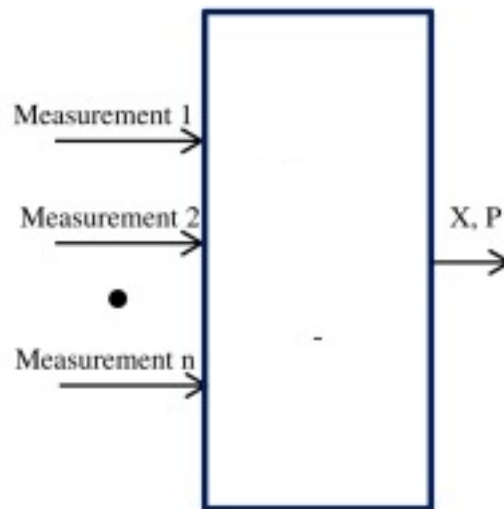


Figura 7: Schema SFA

Tale algoritmo è schematizzabile come una *black-box* la quale, ricevuti i dati dei sensori in ingresso, fornisce in uscita la posizione del treno lungo la traccia ferroviaria (figura 7).

Utilizzando SFA, il treno è in grado di auto-posizionarsi, capacità che

minimizza la necessità di installare apparati di terra.

La necessità di utilizzare un algoritmo che tenga conto delle misurazioni di un *set* di sensori, in luogo di un semplice *processing* di insiemi di singole misure provenienti dalla stessa sorgente, risiede nella capacità che ha SFA di *correggere* il rumore che disturba le singole misurazioni, realizzando così una nuova misura più accurata di quella che si avrebbe considerando i sensori come sorgenti distinte.

SENSOR FUSION

Nei sistemi in cui è richiesta un'alta *reliability* delle misure, l'informazione fornita dai singoli sensori non è sufficiente. In questi casi è raccomandato l'utilizzo di un insieme di sensori in contemporanea.

2.1 PANORAMICA

In generale, un algoritmo SFA viene utilizzato per stimare lo stato di un sistema dinamico in un ambiente caratterizzato da *rumore*.

2.1.1 Sistemi Dinamici

Un sistema dinamico è una modellazione matematica di un processo che evolve nel tempo, la cui evoluzione è descritta attraverso un sistema di equazioni differenziali o alle differenze, nel caso esso si evolva rispettivamente a tempo continuo o a tempo discreto.

Sia S l'insieme dei possibili stati che il sistema può assumere, e sia $m = |S|$ la dimensione dello spazio degli stati.

Senza perdere in generalità, si possono formalizzare questi due tipi di sistemi dinamici come:

$$y'(t) = f(t, y(t)), \quad t \geq 0$$

Con $y(0) \in \mathbb{R}^m$ condizione iniziale nota, e:

$$y_{n+1} = f(n, y_n), \quad n = 0, 1, \dots$$

con al solito $y_0 \in \mathbb{R}^m$ condizione iniziale nota.

Ricavare lo stato del sistema dinamico per un certo istante t , o n , equivale a risolvere le equazioni cui sopra e valutarne la traiettoria soluzione in t

o in n .

Un semplice sistema dinamico è rappresentato da un punto materiale che si muove con una accelerazione costante

$$\vec{a} = a\vec{k}$$

dove \vec{k} è un qualunque versore della base canonica di \mathbb{R}^3 .

Supponendo che il punto si muova con velocità iniziale $\vec{z}'(0) = v_0\vec{k}$ nota e inizi il moto da una coordinata $\vec{z}(0) = z_0\vec{k}$ nota, si ha:

$$z''(t) = a$$

$$z'(t) = \int a dt = at + v_0$$

$$z(t) = \int (at + v_0) dt = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + z_0$$

L'equazione $z(t)$ descrive completamente la traiettoria di moto del punto materiale, mentre $z'(t)$ descrive completamente la traiettoria della velocità del punto durante il suo moto.

2.1.2 Misure e Rumore

In questo semplice esempio, viene fatta l'assunzione di conoscere a priori il valore esatto di a , di v_0 e di z_0 .

Nella pratica, per misurare l'accelerazione a è necessario uno strumento denominato *accelerometro*, il quale produrrà delle misure giocoforza affette da errori casuali. Si supponga di sostituire a nell'equazione $z(t)$ con una sua perturbazione $\tilde{a} = a + \varepsilon$ dove ε è una variazione casuale della misura data dal *rumore* che caratterizza qualsiasi processo di misura. Si può supporre $\text{Var}(\varepsilon) = 0$ e considerare, ai fini di questa trattazione, ε come un valore costante; in realtà ε è una variabile casuale a varianza generalmente non nulla. Si suppongano inoltre $v_0 = z_0 = 0$ per comodità di calcolo:

$$z(t) = \frac{1}{2}\tilde{a}t^2 = \frac{1}{2}(a + \varepsilon)t^2 = \frac{1}{2}(at^2 + \varepsilon t^2)$$

Si nota immediatamente che la variazione della misura $z(t)$ data da ε aumenta con il quadrato del tempo.

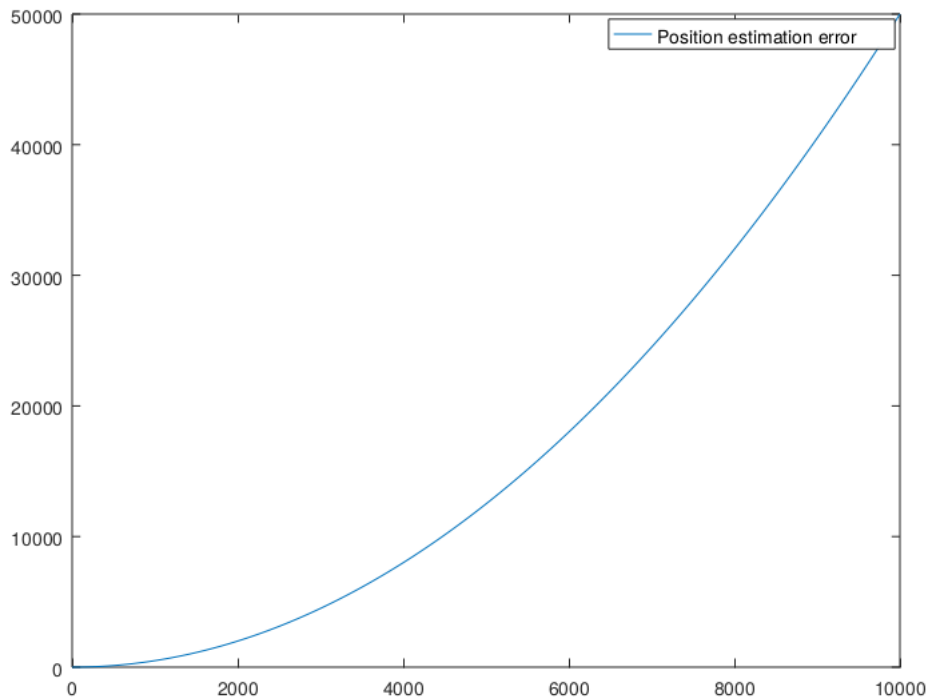


Figura 8: Grafico dell' errore di stima della posizione con $\alpha = 10^0, \varepsilon = 10^{-3}$

2.2 I FILTRI DI KALMAN

Un Filtro di Kalman, o in inglese *Kalman Filter* (KF), è un modello di SFA progettato appositamente per risolvere o rendere trascurabile il problema del rumore nei processi di misura.

Siano X_1, \dots, X_N N sorgenti distinte di dati.

Si definisce *misurazione* del valore j dall' i -esima sorgente l'osservazione dell'evento:

$$X_i = j$$

Per un opportuno j e per $i = 1, \dots, N$.

Modellando ciascuna X_i come una variabile casuale, si ha che ciascuna X_i è caratterizzata da una distribuzione di probabilità:

$$p_{X_i} = \{p_j : P(X_i = j) = p_j\}, \quad i = 1, \dots, N$$

Un KF è essenzialmente un algoritmo che utilizza una serie di osservazioni $X_i = j$, e cerca di produrre la stima di una *distribuzione di probabilità congiunta* delle variabili casuali X_i .

2.2.1 Filtro di Kalman Lineare

I KF sono comunemente basati su sistemi dinamici *lineari* a tempo discreto, ossia, il modello statistico sottostante è una Catena di Markov a tempo discreto, o in inglese *Discrete Time Markov Chain* (DTMC).

In una DTMC, la probabilità che un sistema dinamico al tempo n si trovi nello stato j , si esprime attraverso il *vettore di probabilità di occupazione di stato* $\Pi(n) \in \mathbb{R}^m$ dove m è la cardinalità dello spazio degli stati.

Supposto noto $\Pi(0)$ vettore di probabilità iniziale, l'evoluzione del sistema ad ogni *timeframe* è data dalla seguente operazione lineare:

$$\Pi(n) = \Pi(n-1)\mathbf{F}$$

La matrice $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ è detta *matrice di transizione di stato*:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} P(1 \rightarrow 1) & \dots & P(1 \rightarrow m) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P(m \rightarrow 1) & \dots & P(m \rightarrow m) \end{pmatrix}$$

La matrice \mathbf{F} è tale per cui ciascun $F_{ij} = P(i \rightarrow j)$ indica la probabilità che ha il sistema dinamico di evolversi, in un *timeframe*, dallo stato i allo stato j .

APPLICAZIONE DI SFA: LA TRAMVIA DI FIRENZE

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

Nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dall'Unione Europea, si è voluto studiare l'usabilità di KF 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. 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'altezza dell'omonimo parcheggio di interscambio dell'autostrada A1, all'ospedale di *Careggi*, sito quest'ultimo nel comune di Firenze.

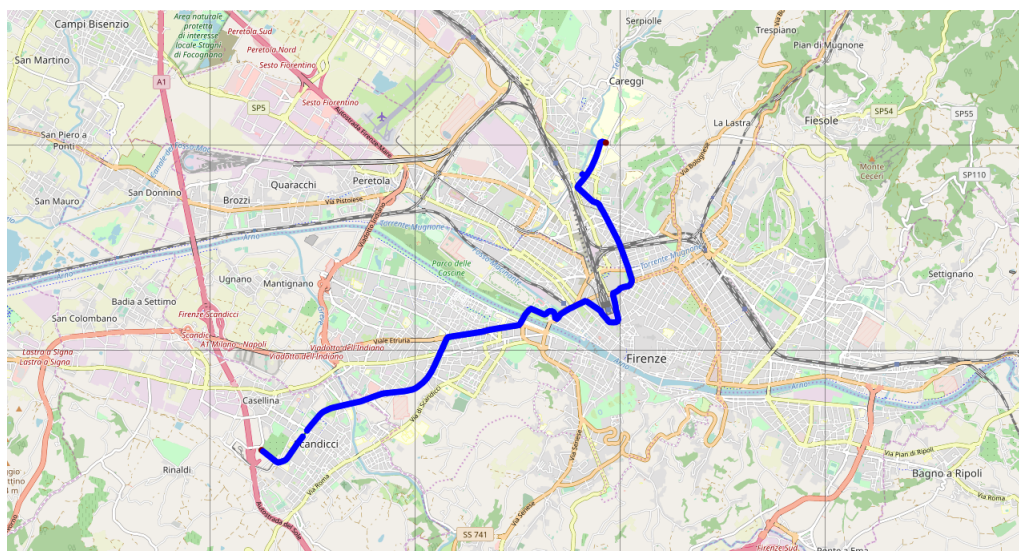


Figura 9: Tramvia di Firenze - Linea T1

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)

3.1.1 Architettura lato treno

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

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:

- *Inertial Measurement Unit* (IMU):
Unità incaricata di misurare i vettori accelerazione (**a**) e velocità angolare (**v_{ang}**) attraverso l'uso combinato di un accelerometro e un giroscopio. Le misure di IMU sono prese rispetto a un sistema inerziale solidale con il binario e sono espresse in unità stabilite dallo standard internazionale (SI):

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

Si tratta del sensore principale su cui si basa l'esecuzione di SFA.

- Odometro:

Per realizzare l'odometro è stato installato un rilevatore radar su una ruota del treno. Il radar misura il tempo impiegato dalla ruota a compiere un giro completo, e determina la velocità angolare della ruota $\varphi'(t) = \frac{2\pi}{\text{tempo}} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$.

Noto il raggio r [m] della ruota, è possibile determinare la velocità lineare alla circonferenza della ruota $x'(t)$ attraverso la relazione cinematica $x'(t) = r\varphi'(t) \left[\frac{\text{m rad}}{\text{s}} \right] = r\varphi'(t) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$.

Approssimando il treno come un *corpo rigido*, questa sarà la velocità lineare con cui il treno si sta muovendo.

- Global Positioning System (GPS):

Modulo che riceve i dati di posizione attraverso il sistema satellitare GPS.

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.

In generale queste misure sono le meno affidabili in quanto la *varianza* della variabile aleatoria che modella tale sorgente è la più significativa.

Ad una data frequenza, i sensori inviano dati verso la scheda; quest'ultima, dopo aver eseguito un'iterazione di SFA, 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 10 mostra un diagramma dell'architettura hardware appena descritta.

Architettura Software

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

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

Sia MOD_i l'*i*-esimo modulo 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 SERIAL₁, MOD₁ legge i valori da SERIAL₁ e li invia a un secondo modulo software, denominato listener, attraverso l'interfaccia di rete loopback, in quanto listener esegue anch'esso sulla scheda;

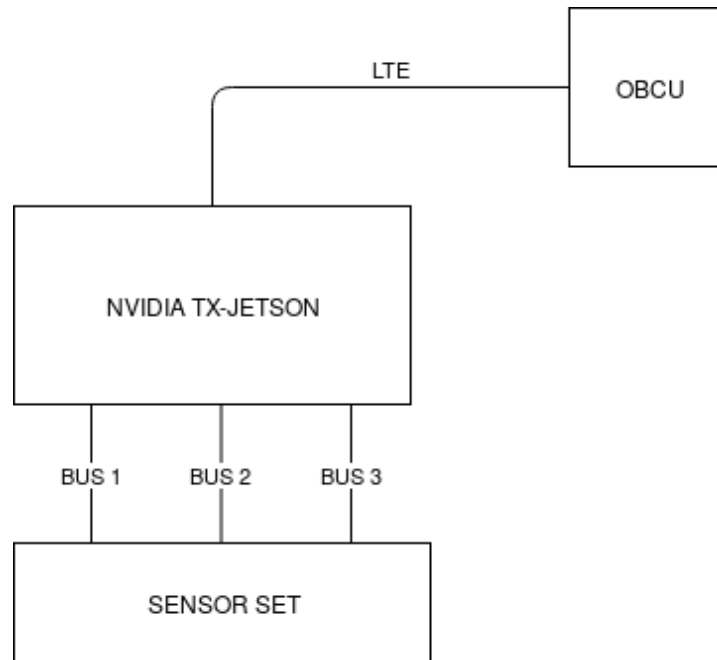


Figura 10: Architettura hardware bordo treno

- 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 il valore 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.

Ogniqualvolta listener riceva un'uscita da SFA, esso si fa carico della comunicazione tra scheda e OBCU (oppure tra scheda e 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.

Si osserva che INPUT_PROTOCOL e OUTPUT_PROTOCOL sono entrambi protocolli arbitrari a livello applicazione, ma necessariamente differenti. Questo aspetto verrà discusso nella prossima sezione. Uno schema dell'architettura software è quello mostrato in figura 11.

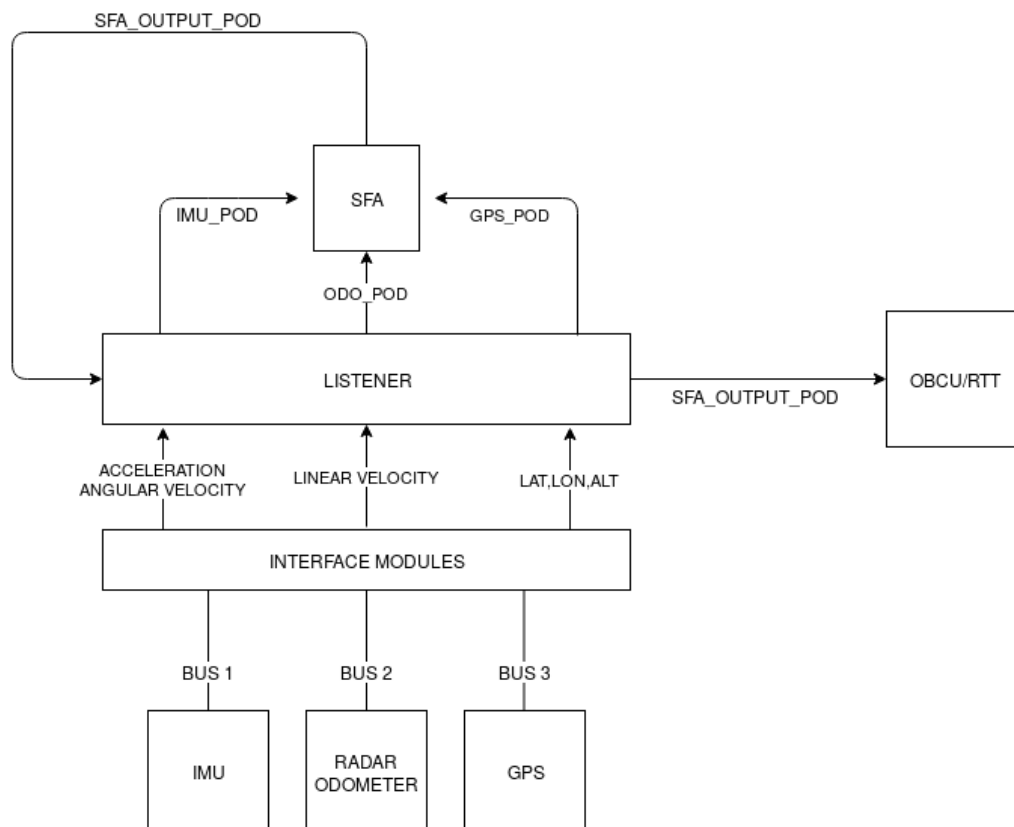


Figura 11: Architettura software bordo treno