



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
2.2	Misure e rumore	16
2.3	Kalman Filtering	18



---

## 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





---

## 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.

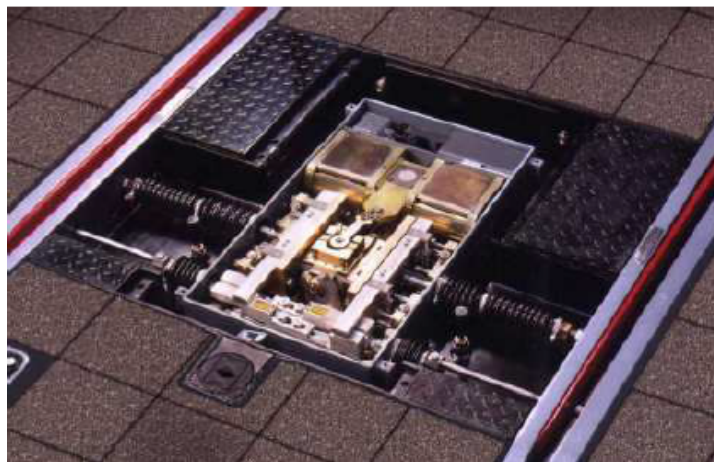


Figura 6: Esempio di *Point Machine* installata su una traccia ferrotramviaria

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).

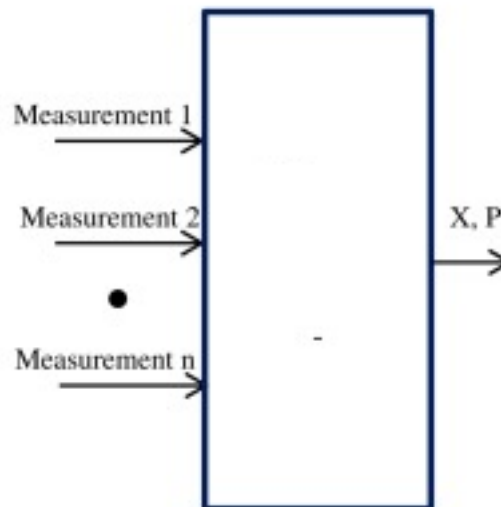


Figura 7: Schema SFA

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

---

### 2.1 PANORAMICA

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.

In un sistema che implementa SFA, ogni sensore è caratterizzato dal tipo dei suoi input e dei suoi output, dalla sua configurazione e dalle sue caratteristiche fisiche. Queste sorgenti eterogenee di dati devono essere integrate al fine di fornire le informazioni ricercate dalla particolare applicazione.

SFA è considerato una famiglia di algoritmi di stima statistica, la scelta di un particolare algoritmo è legata alla particolare applicazione per cui si intende utilizzare SFA. Nel caso del posizionamento ferroviario si utilizza un algoritmo noto come Filtro di Kalman. Esistono diversi tipi di Filtri di Kalman. Una prima classificazione viene fatta sulla base dell'architettura scelta, la quale può essere centralizzata o decentralizzata.

In un'architettura centralizzata esiste un unico modulo che riceve in ingresso le misurazioni dei sensori e fornisce in uscita l'informazione ricercata. Questa architettura è schematizzabile come nella figura 7 mostrata nel Capitolo 1.

Un'architettura decentralizzata differisce dalla prima in quanto:

- Esiste un sensore principale, detto *main sensor*;
- Le misure di ciascun sensore vengono processate assieme alla misura del *main sensor* in sotto moduli, denominati *local filters*, che implementano un Filtro di Kalman su un insieme ridotto di dati;
- Le uscite di ciascun *local filter* vengono infine processate da un modulo denominato *master filter*.

Ulteriori classificazioni vengono fatte su caratteristiche intrinseche dell'algoritmo implementato dal Filtro di Kalman.

## 2.2 MISURE E RUMORE

Un Filtro di Kalman è utilizzato per stimare lo stato di un sistema dinamico in un ambiente caratterizzato da *rumore*. 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.

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.

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  $\varepsilon$  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,  $\varepsilon$  come un valore costante; in realtà  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  aumenta con il quadrato del tempo.

Un Filtro di Kalman è un modello progettato appositamente per risolvere

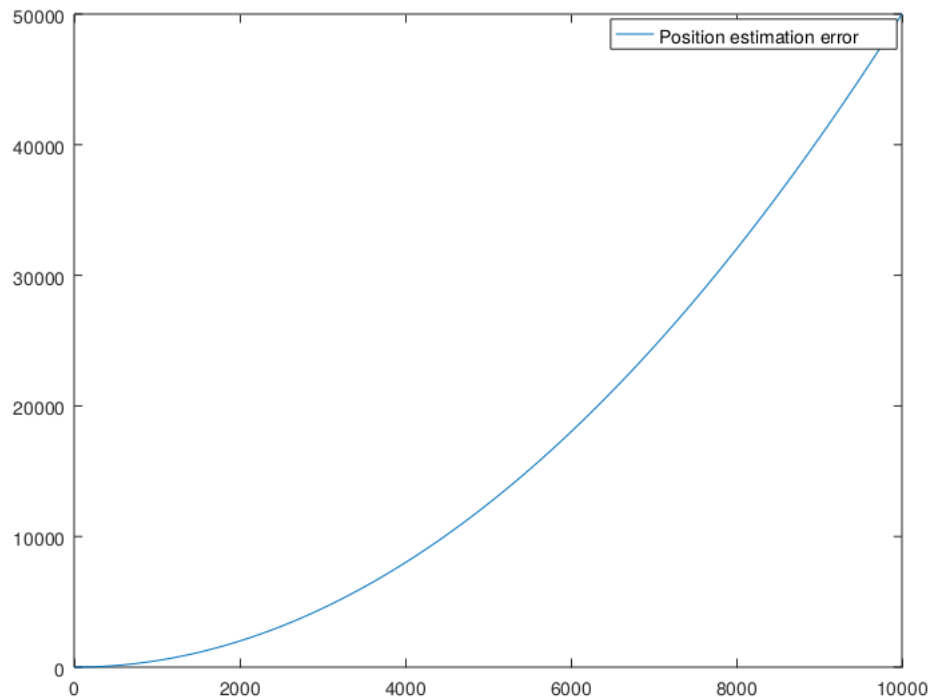


Figura 8: Grafico dell' errore di stima della posizione con  $a = 10^0$ ,  $\varepsilon = 10^{-3}$

o rendere trascurabile il problema del rumore nei processi di misura. Nel modellare un sistema dinamico complesso come il moto di un treno lungo una traccia ferroviaria, occorre tenere in considerazione le misure di accelerazione, velocità, e posizione sia lineari che angolari. Tutte queste misurazioni saranno in generale caratterizzate da un rumore casuale che ne impedisce la corretta acquisizione, in quest'ottica è dunque fondamentale utilizzare un Filtro di Kalman. Per completezza di esposizione, occorre precisare che esistono anche fonti note e deterministiche di errore, oltre alle sorgenti casuali date dal rumore. Un Filtro di Kalman è in grado di rigettare una misurazione quando questa è affetta da un evidente errore deterministico, dello strumento o dell'operatore.

### 2.3 KALMAN FILTERING

Nell'applicare un Filtro di Kalman ad uno specifico sistema, devono essere noti i parametri del modello  $\Phi$ ,  $B$ ,  $H$ , il rumore statistico  $(R, Q)$ , il vettore delle condizioni iniziali  $X_0$ , e la sua matrice di covarianza  $P_0$ . Assumendo per semplicità di avere un processo evolutivo a tempo discreto, un Filtro di Kalman stima il vettore  $X(n+1)$  che rappresenta lo stato del sistema al tempo  $t+1$  con le informazioni disponibili al tempo  $t$ . Il filtro è dato da:

$$P_{(n+1)} = \Phi P_{(n)} \Phi^T + C$$