

In applicazioni di controllo industriale è fondamentale avere a disposizione misure accurate delle grandezze d'interesse. Gli Stimatori Bayesiani permettono di migliorare la qualità della misura a partire da una caratterizzazione statistica delle informazioni a disposizione.

## **STIMATORI BAYESIANI NON-LINEARI DAL FILTRAGGIO AL *SENSORLESS MEASUREMENT***

Mediante l'utilizzo degli Stimatori Bayesiani è possibile spostare parte della complessità del proprio sistema dall'hardware al software, migliorando i risultati e risparmiando su costosi componenti.

Gianluca Guadagno\*

---

\*Sintesi

Il mondo della robotica e delle macchine utensili gravita intorno al concetto di "precisione", intendendo con questo termine un mix ponderato di diversi parametri che concorrono a definire quanto una macchina sia fedele al lavoro che le è prescritto in termini di posizioni e orientazioni assunte dall'utensile nello spazio di lavoro.

Per poter raggiungere standard di precisione sempre più elevati è necessario possedere sistemi in grado di fornire misure attendibili di questi parametri, integrati in un controllo elettronico capace di guidare la macchina verso le prestazioni richieste.

Attraverso l'applicazione delle più recenti tecniche di stima Bayesiana, è possibile trasferire una parte della sensoristica dal mondo fisico dell'hardware a quello virtuale del software.

In questo modo è possibile venire incontro alle esigenze sempre crescenti del mondo produttivo che impone lo sviluppo di soluzioni che non solo siano più performanti delle precedenti ma che offrano flessibilità e riconfigurabilità. Sintesi, attraverso un uso innovativo delle tecniche di filtraggio Bayesiano, ha sviluppato sistemi per la misura di spostamento, velocità ed accelerazioni migliorando il rapporto costo/prestazioni delle macchine industriali.

### **Il Kalman Filter**

Nel 1960 Rudolph E. Kalman pubblicò in un articolo i risultati dei suoi studi, nei quali descriveva una soluzione al problema della stima di grandezze fisiche a partire da misure alterate da rumore ed incertezza.

I suoi sforzi valsero al suo sistema il nome di *Kalman Filter* (KF). Applicato con successo in campo aeronautico e precisamente al programma spaziale Apollo, il filtro rese possibile sviluppare algoritmi che permettessero di determinare posizione e velocità dei satelliti e, successivamente, delle navette spaziali, con la maggiore precisione possibile.

Da allora, soprattutto grazie ai progressi dell'elettronica digitale, il KF ha trovato applicazioni in tutti i campi dall'ingegneria alla finanza, dimostrando la sua grande validità e versatilità.

Uno dei settori storici d'applicazione del KF è quello della navigazione autonoma o assistita, nella quale si intende stimare la posizione di un veicolo a partire da misure inerziali, barometriche o GPS per le quali il KF contribuisce a migliorare la precisione in tempo reale.

Il KF, in altri termini, è un insieme di equazioni in grado di fornire una stima dello stato di un sistema in maniera estremamente efficiente. E' stato dimostrato che il KF ha il pregio di essere, tra tutti i filtri lineari, quello che rende minimo l'errore della stima e, per questo motivo, viene considerato il miglior filtro attualmente disponibile.

La condizione necessaria per poter applicare l'algoritmo di Kalman alla stima di stato di un sistema è che il sistema in questione possa essere rappresentato matematicamente mediante un modello *lineare*. Purtroppo, in molte applicazioni ingegneristiche, non è possibile caratterizzare il proprio sistema in termini di un modello lineare e quindi, in questi casi non è possibile implementare direttamente il KF. Alcuni esempi di macchine per le quali non è possibile ottenere un modello lineare, a meno di grossolane approssimazioni, sono i motori sincroni a magneti permanenti ed i motori ad induzione, componenti di uso frequente nel mondo dell'automazione e delle macchine utensili.

Per risolvere i problemi relativi alla stima di stato in caso di sistemi non-lineari, negli anni sono state sviluppate molte varianti all'algoritmo originale del KF. La più famosa ed utilizzata è rappresentata dall'*Extended Kalman Filter* (EKF). Tuttavia, con questa variante, non è raro imbattersi in divergenze nella stima di stato a causa delle approssimazioni introdotte.

Per poter superare questi limiti, si sono concentrati recentemente numerosi studi attorno al problema della stima di stato per sistemi non-lineari. L'insieme degli algoritmi proposti è stato riorganizzato nel cosiddetto *Framework degli Stimatori Bayesiani*.

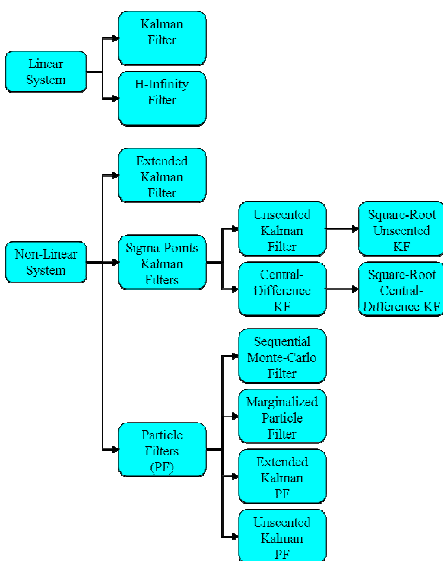


Figura 1 Framework degli stimatori Bayesiani

In particolare, il gruppo dei *Sigma-Points Kalman Filters* (SPKFs) risolve il problema della stima non-lineare senza introdurre approssimazioni grossolane, dimostrando una prestazione superiore all'EKF a parità di costo computazionale e permettendo una più semplice ed intuitiva implementazione.

## Un esempio di applicazione: il Sensorless Measurement

Una delle principali applicazioni industriali delle tecniche di stima precedentemente menzionate è il cd. *Sensorless Measurement*. Attraverso l'utilizzo di un appropriato algoritmo di stima, come il KF, si ha la possibilità di stimare una grandezza di rilievo senza utilizzare un sensore specifico ma ricavandola dalle misure di grandezze ad essa correlata, risparmiando così sui costi e sugli ingombri e conservando o addirittura migliorando la prestazione.

Ad esempio, per realizzare un controllo efficace sulla dinamica del movimento è necessario ottenere delle misure di velocità molto accurate e, per questo, si impiegano spesso delle righe ottiche ad alta risoluzione.

Tuttavia l'impiego di righe ottiche richiede una spesa aggiuntiva rilevante oltre a comportare un aumento della complessità del sistema.

In realtà, nel caso di un motore a magneti permanenti, per esempio, questi problemi possono essere risolti attraverso l'utilizzo di un algoritmo derivato dal KF, l'*Unscented Kalman Filter* (UKF) che può garantire la stima non solo della velocità angolare del motore, ma anche della coppia di carico, partendo soltanto dalla conoscenza delle tensioni di ingresso al motore, delle correnti che scorrono negli avvolgimenti e della posizione del rotore (misurata mediante un encoder o un resolver).

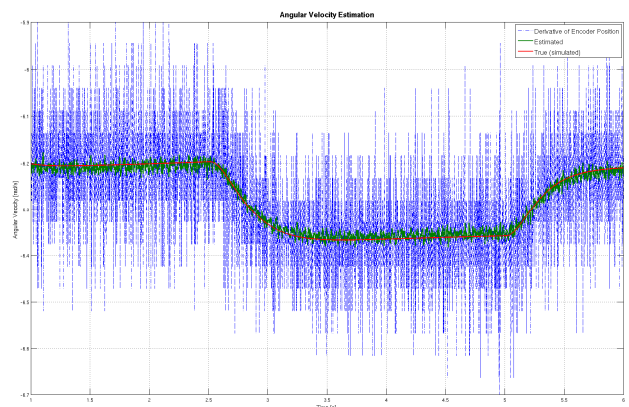


Figura 2 Stima della velocità angolare

Nella figura 2 sono evidenti i risultati di stima della velocità angolare. In particolare, viene confrontata la stima effettuata mediante l'UKF (linea verde) con quella che si otterrebbe utilizzando i metodi classici (linea blu). Il valore effettivo della velocità angolare (linea rossa) è quasi indistinguibile da quello stimato. In questo caso, l'impiego dello stimatore ha permesso di ridurre l'incertezza sulla velocità angolare del motore di oltre il 90% senza l'impiego di un sensore specifico.

Per rendere ancora più performante il controllo del moto, è spesso necessario misurare la coppia di carico applicata al motore, poiché essa potrebbe variare durante l'esecuzione del compito assegnato. Una misura errata della coppia di carico ha infatti, come prima conseguenza l'aumento del tempo di risposta del motore che si riflette su un aumento del tempo ciclo complessivo. In quest'ottica, il risultato riportato in Figura 3 mostra chiaramente la capacità dell' algoritmo Bayesiano di stimare con buona approssimazione la coppia di carico del motore senza che sia presente nessun sensore di coppia.

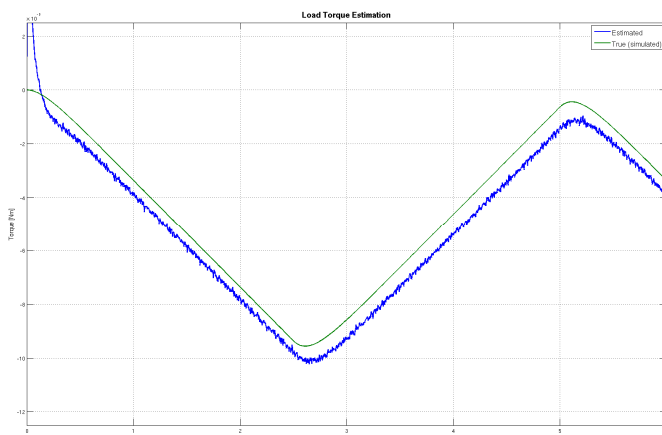


Figura 3 Stima della coppia di carico

Questi risultati mostrano come sia possibile applicare efficacemente le tecniche di Stima Bayesiana non-lineare in applicazioni industriali reali.

**Spostando la complessità del sistema dalla componentistica al software si ottengono notevoli vantaggi: riduzioni di costo, maggiore flessibilità applicativa, maggiore robustezza rispetto alle variazioni delle condizioni operative.**

## Applicazioni Avanzate: il Sensor Fusion

Una delle applicazioni più recenti delle tecniche di Stima Bayesiana è il *Sensor Fusion* tra differenti tipologie di sensori. Un esempio efficace è l'applicazione del SensorFusion tra misure inerziali e misure convenzionali su macchine utensili e manipolatori industriali.

In pratica, si utilizza un sensore inerziale (IMU, Inertial Measurement Unit), in grado di fornire misure di accelerazione e di velocità angolare, in combinazione con le misure dei sensori tradizionali. Il Filtro Bayesiano fonde poi le due fonti d'informazione contribuendo ad ottenere stime più accurate di posizione, velocità ed accelerazione dell'organo terminale della macchina.

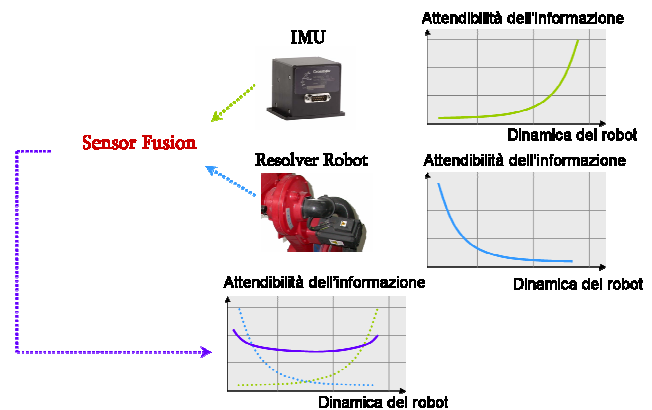


Figura 4 Sensor Fusion

In Figura 5 è riportato uno dei risultati sperimentali ottenuto su un manipolatore industriale.

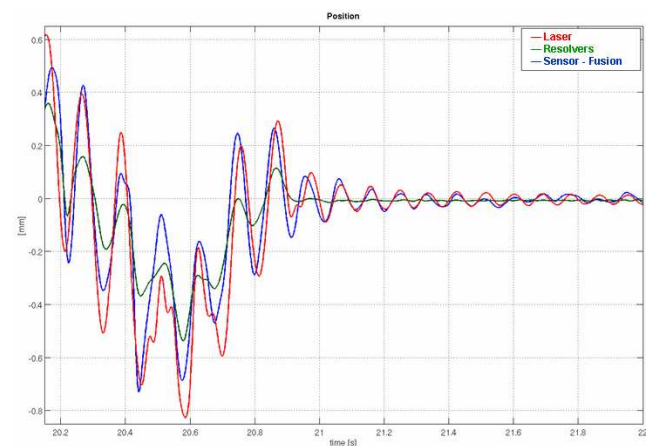


Figura 5 Misura di posizione mediante Sensor Fusion

L'unità inerziale è stata montata in corrispondenza dell'organo terminale del manipolatore ed i dati sono stati acquisiti in real-time dal sensore inerziale e dal controllo del robot.

Com'è possibile notare, la sola misura dei resolver presenti sulla macchina (verde) mostra una risposta ritardata ed incompleta, incapace di fornire sufficienti indicazioni circa i moti oscillatori dell'organo terminale, soprattutto a causa dell'elasticità dei giunti e della flessibilità dei link.

L'applicazione della tecnica di Sensor Fusion permette, invece, di recuperare l'informazione mancante utilizzando le misure inerziali provenienti dall'IMU (vd. Linea blu).

Il confronto con la misura di riferimento, ottenuta mediante laser interferometrico (linea rossa) mostra l'attendibilità della tecnica utilizzata.

Un altro risultato indicativo delle potenzialità della tecnica di Sensor Fusion tra segnali inerziali e misure degli encoder è presentato nella Figura 6.

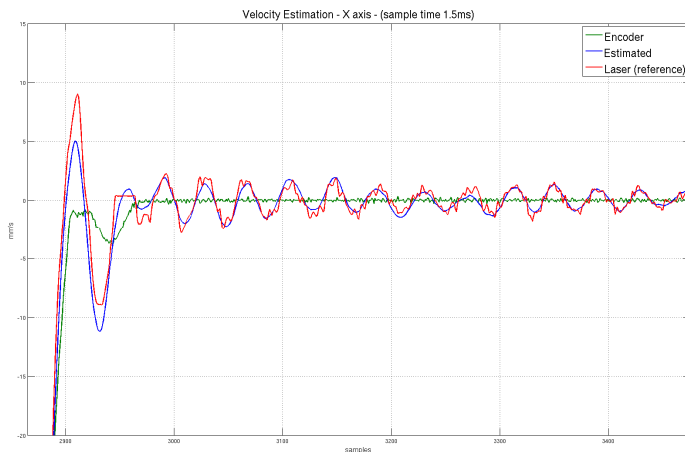


Figura 6 Stima di Velocità – transitorio

In questo caso, le misure sono state effettuate su una macchina utensile cartesiana e sono relative al moto dell'asse x.

Si può notare, ancora una volta, come l'aggiunta dell'informazione sull'accelerazione misurata all'organo terminale possa incrementare considerevolmente la qualità della stima di velocità.

La grandezza stimata (in blu) si avvicina a quella misurata mediante il laser interferometrico (in rosso) molto più della grandezza ricavata a partire dalle misure dagli encoder (in verde).

## DAS - Direct Acceleration Sensor

Attraverso l'applicazione delle tecniche di stima non-lineare, Sintesi ha realizzato un sensore inerziale di nuova generazione, completamente privo di giroscopi, capace di fornire misure di accelerazione lineare e di accelerazione angolare: il Direct Acceleration Sensor.

Il DAS è stato progettato per essere poco ingombrante, sviluppandosi completamente su un singolo circuito stampato ovviando in questo modo alle incertezze di montaggio di schede ortogonali tipiche dei sensori inerziali tradizionali.

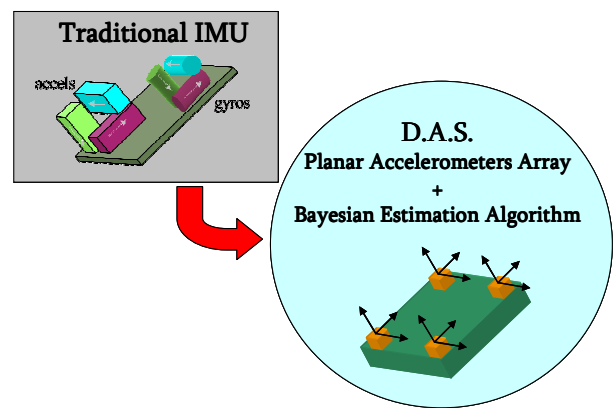


Figura 7 Confronto qualitativo tra un IMU tradizionale ed il DAS

In questo modo si è spostata la complessità dal mondo dell'hardware a quello del software. Le misure provenienti dagli accelerometri coplanari vengono elaborate mediante un Algoritmo Bayesiano per stimare l'accelerazione angolare impressa al sensore.

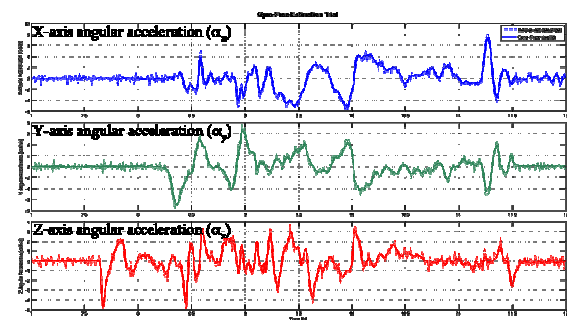


Figura 8 Confronto Qualitativo tra un IMU tradizionale un DAS

Nella Figura 8 viene riportato un confronto tra la derivata numerica della velocità angolare misurata da un IMU tradizionale di fascia medio-alta (linea tratteggiata) e l'accelerazione angolare stimata dal DAS (linea spessa). Com'è possibile notare, la ricostruzione del segnale d'interesse è ottima ed in più si evita l'amplificazione dei disturbi causata dall'operazione di differenziazione.



L'immagine (indicativa) mette in evidenza come, attraverso l'applicazione delle più innovative tecniche di stima bayesiana si possano ottenere vantaggi in termini di precisione, di tempo e quindi di costo sulle lavorazioni.

---

**L'utilizzo degli stimatori bayesiani permette di ottenere misure qualitativamente elevate che rendono più preciso il sistema senza per questo renderlo più costoso e più complesso**

---

## Conclusioni

Il processo di sviluppo tecnologico a cui stiamo assistendo tende sempre più ad una costante dematerializzazione che presuppone il passaggio dalla materia all'informazione.

Quanto più si riesce a trasferire informazione in un sistema, tanto più il valore aggiunto del sistema aumenta. Il valore economico della conoscenza è infatti diventato una fondamentale risorsa strategica e l'applicazione delle tecniche di stima bayesiana sono una chiara dimostrazione di questo andamento. Gli esempi di applicazione riportati e gli esiti ottenuti evidenziano come un accurato uso degli stimatori bayesiani permetta di raggiungere risultati eccellenti con un ottimo rapporto qualità/costo.

Per raggiungere questi risultati è però necessario disporre di un forte know-how in grado di superare le tradizionali tecnologie, spesso ingombranti e costose, a vantaggio di tecnologie innovative più performanti capaci di conferire un vero vantaggio competitivo sotto molteplici aspetti.

Sintesi, per rendere più agevole la realizzazione di soluzioni flessibili e adattabili sulla base di stimatori bayesiani, ha sviluppato un'apposita libreria software chiamata *State Estimation Library*, mediante la quale è possibile implementare rapidamente modelli di simulazione e confrontare i risultati ottenuti da algoritmi differenti. Inoltre, essendo perfettamente integrabile con Orchestra Control Engine (vd. articolo "*Con l'Open Source il controllo diventa un elemento di differenziazione*"), è possibile generare automaticamente il codice eseguibile in hard real-time per la realizzazione rapida di algoritmi di controllo con integrate capacità di Stima Bayesiana. Grazie agli stimatori bayesiani quindi, si possono ottenere misure sempre più accurate e sistemi sempre più precisi intervenendo esclusivamente sulla parte software. Il che equivale a realizzare sistemi per applicazioni industriali con costi più contenuti, dall'hardware meno complesso e dalle prestazioni sempre più elevate, che permettono di migliorare nettamente il rapporto costo/prestazioni delle macchine industriali.

**Per maggiori informazioni su queste tecniche e sulla possibilità di applicarle a robot e macchine, potete contattare Gianluca Guadagno all'indirizzo [techrequest@sintesi-scpa.com](mailto:techrequest@sintesi-scpa.com) o visitare il sito [www.sintesi-scpa.com](http://www.sintesi-scpa.com)**

**Sintesi è una società che sviluppa tecnologie e componenti meccatronici specializzata nelle tecnologie di misure, controllo, design meccatronico e sistemi di produzione.**