

# Pianificazione ed ottimizzazione della legge di moto di attuatori elettrici mediante algoritmi genetici

Roberto Bussola, Monica Tiboni, Andrea Menegolo, Arnaldo Delli Carri

*Department of Mechanical Engineering, University of Brescia, Italy*

*E-mail: [roberto.bussola@ing.unibs.it](mailto:roberto.bussola@ing.unibs.it), [monica.tiboni@ing.unibs.it](mailto:monica.tiboni@ing.unibs.it)*

*Keywords: Motion planning, linear motors, optimization, genetic algorithms*

**SUMMARY.** The paper deals with the motion planning of automatic systems. A methodology for the optimization of the motion law of a mechanical system actuated by a direct-drive linear motor is proposed. The approach is based on the experimental identification of the dynamic parameters of the system and on the optimization of the motion based on a procedure using an elasto-dynamic model of the system by mean a genetic algorithm. Experiments developed on a dedicated test bench demonstrated the effectiveness of the methodology.

## 1 INTRODUZIONE

Nella progettazione di macchine ed impianti automatici per l'automazione industriale sono sempre più adottati sistemi di movimentazione di tipo elettromeccanico basati sull'impiego di motori direct-drive lineari o rotativi (torque motors), malgrado i costi ancora elevati di questi sistemi. Gli azionamenti che si ottengono con queste soluzioni progettuali sono caratterizzati da prestazioni molto elevate e consentono un alto grado di flessibilità ([1,2,3]).

Per la generazione di moto intermittente unidirezionale, ad esempio, non è più rara la scelta di utilizzare torque motors governati da opportune leggi di moto, in luogo dei più tradizionali dispositivi per moto intermittente azionati da motore asincrono.

In applicazioni in cui si deve generare moto traslatorio e sono richieste prestazioni in termini di precisioni di posizionamento e di prontezza di risposta molto elevate è sempre più diffuso l'impiego di motori lineari, in sostituzione dei tradizionali sistemi costituiti da motori rotativi e da dispositivi per la trasformazione del moto; in tal modo si eliminano cedevolezza e giochi e si ottiene un sistema molto più rigido. Sempre più diffusi nelle applicazioni più recenti sono sistemi a camma elettronica o assi comandati elettricamente.

Nella maggior parte di questi casi, la legge di moto di comando o la legge di trasformazione della camma elettronica è definibile agevolmente con software dedicati ed è inoltre garantito un certo livello di precisione nella realizzazione del movimento grazie ai sempre più sofisticati anelli di retroazione implementabili nel sistema di controllo o previsti nei convertitori.

Le caratteristiche di questi sistemi offrono quindi intrinsecamente la possibilità di scegliere le leggi di moto più opportune al fine di garantire un'adeguata dolcezza di funzionamento evitando l'innescio di vibrazioni e/o sovra-sollecitazioni [2].

In questo contesto, la memoria presenta alcuni risultati di un'attività a carattere teorico-sperimentale svolta tramite un banco prova realizzato anche a fini didattici presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università degli Studi di Brescia. L'attività è stata finalizzata ad indagare sperimentalmente i risultati dell'ottimizzazione del comportamento dinamico di un sistema con caratteristiche dinamiche note o misurabili, mediante un'opportuna pianificazione della legge di moto imposta all'attuatore. A tal fine, per il banco prova è stato scelto

un motore lineare tubolare, per garantire un'ottima precisione e prontezza nella generazione del moto. A valle del motore è stato montato un sistema massa-molla per simulare le caratteristiche dinamiche di un ipotetico dispositivo che il motore lineare deve azionare.

Il sistema è stato azionato imponendo al motore lineare differenti leggi di moto (ossia leggi di moto caratterizzate da particolari profili di accelerazione), le leggi di moto tradizionalmente impiegate nei sistemi automatici e leggi di moto derivanti da una procedura di ottimizzazione basata su algoritmi genetici, verificando quindi sperimentalmente la possibilità di ottimizzare il comportamento dinamico del sistema mediante un'opportuna pianificazione del movimento.

Per ottenere leggi di moto ottimizzate per le caratteristiche elasto-dinamiche del sistema è stato utilizzato un software dedicato, sviluppato dagli autori nell'ambito di una precedente attività di ricerca ([6]). In particolare, lo strumento software, basandosi sulla simulazione ottenuta con un semplice modello matematico a parametri concentrati del sistema, permette di ottimizzare i coefficienti di accelerazione di leggi di moto trapezoidali modificate, utilizzando come strumento di ottimizzazione un algoritmo genetico.

L'utilizzo di un criterio di ottimizzazione basato su un algoritmo genetico, permette di adottare la procedura anche in quei casi in cui, a causa della presenza di non linearità e/o discontinuità (stick-slip, giochi, ecc.) delle funzioni rappresentative di alcuni fenomeni, altri metodi più tradizionali possono incorrere in problemi di tipo numerico-matematico [5].

Dopo la descrizione del banco prova utilizzato, viene presentato il modello sviluppato e la procedura di validazione sperimentale del modello, successivamente viene descritta la metodologia di ottimizzazione della legge di moto implementata ed, infine, vengono presentati i risultati della sperimentazione delle leggi di moto ottimizzate sul sistema.

## 2 IL BANCO PROVA

Il banco prova utilizzato per l'attività sperimentale (figura 1) è costituito da un azionamento elettromeccanico con un motore lineare tubolare e il relativo convertitore che agisce su un gruppo slitta-molla-slitta a cui è collegata una massa.

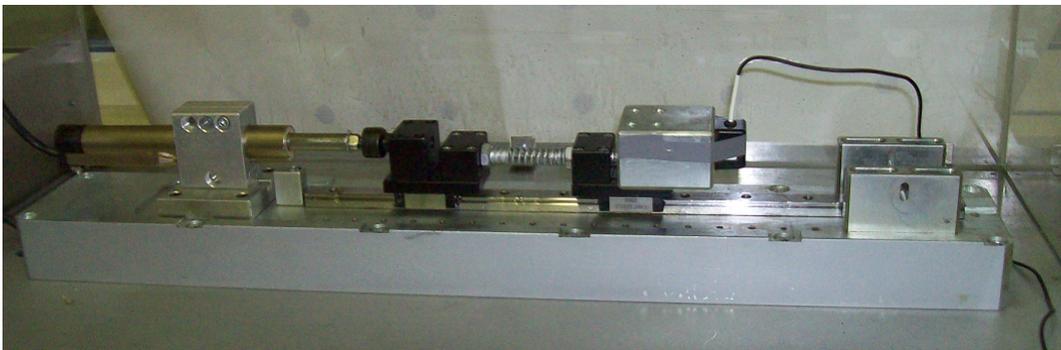


Figura 1: Banco prova con motore lineare utilizzato per le prove sperimentali.

Il motore lineare è costituito da una parte fissa (statore o primario), fissato tramite un supporto al telaio del banco, e da una parte mobile, lo slider (o secondario) che attua il moto comandato.

### 2.1 Il motore lineare

Negli ultimi anni, i motori elettrici lineari hanno dimostrato ottime potenzialità, al giorno d'oggi questi dispositivi trovano applicazione in molti settori industriali. Il grande interesse nei

riguardi di tale tecnologia è testimoniato dal numero crescente di studi di applicabilità da molte ditte operanti in vari settori. I principi fisici alla base del funzionamento di questi motori sono gli stessi dei motori rotativi già molto più conosciuti si possono avere cioè motori lineari in corrente continua, passo-passo, asincroni (a induzione) e sincroni (brushless).

Il motore lineare utilizzato sul banco prova appartiene alla famiglia dei motori lineari tubolari, che tra tutti i motori lineari sono quelli che si collocano in termini di spinta continuativa nella fascia di taglie più basse (al di sotto di  $100\text{ N}$ ). Si tratta di un motore sincrono a due fasi con eccitazione a magneti permanenti. In figura 3 si può osservarne la struttura.



Figura 3: Il motore lineare tubolare utilizzato nel banco prova.

Nello statore (o primario) sono presenti gli avvolgimenti, i cuscinetti, i sensori per il rilevamento della posizione ed il monitoraggio della temperatura.

Il secondario (slider) è costituito da un tubo in acciaio inossidabile sul quale sono fissati i magneti. La rilevazione della posizione viene effettuata mediante opportuni sensori ad effetto Hall montati all'interno dello statore, ossia misurando l'intensità del campo magnetico.

In figura 4 è rappresentato l'andamento della forza massima che il motore può fornire, essa dipende dalle caratteristiche costruttive, dalla tensione di alimentazione e dalla posizione relativa spider-statore. Quando lo statore esce dalla zona denominata SS (shortened stroke) la forza diminuisce perché è diminuito il numero dei magneti permanenti dello slider che interagiscono con il campo magnetico statorico.

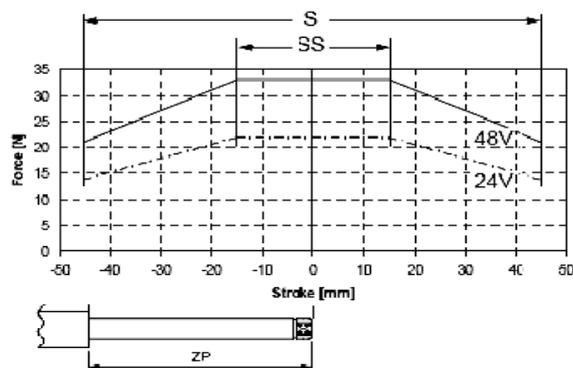


Figura 4: Forza massima che può essere fornita dal motore lineare utilizzato.

## 2.2 Il gruppo slitta-molla-slitta

Lo slider del motore è incernierato attraverso un giunto che possiede un piccolo gioco radiale, ma non assiale, ad una prima slitta collegata tramite una molla ad una seconda slitta, su cui è montata una massa aggiuntiva. Il moto si sviluppa quindi lungo un unico asse (moto lineare). La guida su cui si sviluppa il moto è costituita da una barra di acciaio prismatica, con due scanalature

per il centraggio con le slitte che vengono poi a scorrere sulla guida con un accoppiamento a ricircolo di sfere. Per rilevare sperimentalmente il moto effettivo dell'organo terminale del sistema, su di esso è stato montato un accelerometro capacitivo monoassiale caratterizzato da una sensibilità di  $200 \pm 10 \text{ mV/g}$  ed un range di misura di  $\pm 10 \text{ g}$  (figura 1).

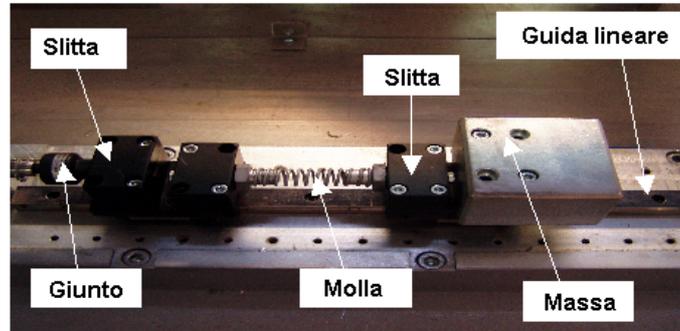


Figura 2: Gruppo slitta-molla-slitta sul banco prova.

### 3 MODELLO ELASTO-DINAMICO DEL SISTEMA E SUA VALIDAZIONE

L'ottimizzazione delle legge di moto si basa sull'uso combinato di un modello elasto-dinamico validato del sistema reale e di uno strumento di ottimizzazione.

Per la modellizzazione, il sistema meccanico è stato pensato costituito da elementi rigidi dotati di massa, collegati tra loro da giunti dotati di cedevolezza. Viene perciò utilizzato un modello a parametri concentrati in cui gli elementi dotati di massa sono privi di elasticità, mentre gli elementi elastici sono privi di massa. Pensando ad un modello più completo è stata anche immaginata la presenza di gioco tra attuatore e massa che viene modellizzata da un andamento lineare a tratti dell'azione trasmessa dal giunto: si ipotizza che, durante il gioco, il giunto non trasferisca nessuna azione fra le sue estremità, e che il suo comportamento diventi elastico lineare quando il gioco viene meno così che gli elementi meccanici siano a contatto tra loro in tale condizione (in realtà in questa memoria si riportano i risultati di una prima serie di prove ottenute con il sistema in assenza di giochi, lasciando aperta l'indagine di questo effetto a lavori futuri). Le perdite di energia sono invece rappresentate da componenti smorzatori che esercitano azioni resistenti viscoso proporzionali alle velocità.

#### 3.1 Il modello matematico

Pur pensando al sistema come ad una *black box*, è stato adottato un semplice modello ad un grado di libertà, basato sulla presenza di un giunto elastico dotato di gioco e smorzatore tra movente e cedente. Nella figura che segue è riportato lo schema del modello utilizzato, in cui si assume il movimento  $(\ddot{y}, \dot{y}, y)$  come imposto dal motore lineare.

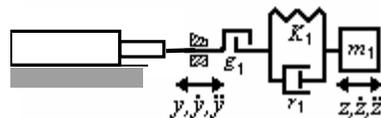


Figura 5: Modello elastico ad 1 GdL.

Con riferimento alla simbologia utilizzata in figura 5, la dinamica del sistema è governata da una semplice equazione differenziale del secondo ordine (1), ove la funzione  $G(ds, d\dot{s})$  rappresenta

l'azione trasferita fra le estremità del giunto ed è definita dalla formula (2), avendo posto  $ds = z-y$ .

$$\ddot{z} = -\frac{1}{m_1} G(z-y, \dot{z}-\dot{y}) \quad (1)$$

$$G(ds, \dot{ds}) = \begin{cases} k_1(ds - g_1/2) + r_1 \dot{ds} & \text{per } ds > g_1/2 \\ r_1 \dot{ds} & \text{per } |ds| \leq g_1/2 \\ k_1(ds + g_1/2) + r_1 \dot{ds} & \text{per } ds < -g_1/2 \end{cases} \quad (2)$$

Imposta la legge di moto al motore lineare, ossia noto l'andamento di  $(\ddot{y}, \dot{y}, y)$  in funzione del tempo, dopo un'integrazione nel tempo della (1) è allora nota anche la cinematica della massa  $m_1$ .

La presenza del giunto elastico e della resistenza di tipo viscoso comporta, in generale, un moto della massa  $m_1$  oscillatorio smorzato, riproducendo in questo modo le vibrazioni del sistema; l'urto, che viene generato dall'eventuale presenza di gioco, tende ad amplificare l'entità di tale effetto vibratorio. Il modello matematico è stato implementato in un apposito software in grado di generare l'andamento di varie leggi di moto e di integrare in modo numerico l'equazione adottando il metodo di Runge-Kutta del 4° ordine.

### 3.2 Stima dei parametri

Pur essendo note alcune grandezze del sistema (costante elastica della molla), la stima dei parametri del modello è stata operata grazie ad una serie di prove sperimentali in cui, montando successivamente diversi valori di massa sulla slitta a valle della molla, si è sollecitato il sistema imponendo all'attuatore un gradino di forza, generando in questo modo sull'accelerazione della slitta il caratteristico andamento di un sistema libero smorzato (figura 6).

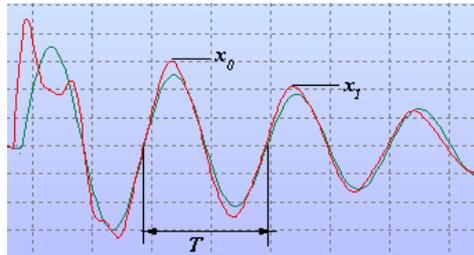


Figura 6: Accelerazione sperimentale (rosso) e simulata (verde).

Come si può osservare dalla figura precedente, l'andamento dell'accelerazione sperimentale presenta un picco iniziale seguito dalla tipica tendenza smorzata. All'aumentare della massa il primo picco assume valori via via più rilevanti rispetto alla parte smorzata: ciò è da imputarsi alla presenza di attrito statico tra guida e slitta che fa sì che la molla venga a caricarsi maggiormente ad inizio moto rispetto al caso di un real sistema libero smorzato.

$m_1$ (g)	$T$ (ms)	$x_0$ (m/s <sup>2</sup> )	$x_1$ (m/s <sup>2</sup> )	$K_1$ (N/m)	$r_1$ (N/ms <sup>-1</sup> )
260 (solo slitta)	46.3	65.75	39.78	4788	5.64
1300 (massa elevata)	102.5	15.09	10.62	4885	8.87

Tabella 1. Stima dei parametri del modello.

In tabella 1 sono riportati i valori dei parametri evidenziati in figura 6 rilevati dalle prove con slitta vuota (massa minima) e con slitta dotata di massa elevata. Sono altresì riportati i corrispondenti valori di rigidità e smorzamento calcolati tramite le seguenti formule:

$$K = m (2\pi/T)^2 \quad (3)$$

$$r \approx 2m / T \ln(x_0/x_1) \quad (4)$$

Mentre il valore della rigidità non dipende molto dalla massa, il fattore di smorzamento offre valori diversi nei vari casi, per cui nel modello si è adottato un valore medio pari a  $7.25 \text{ N/ms}^{-1}$ .

### 3.3 Leggi di moto, affinamento e validazione del modello

Le leggi di moto considerate ed implementate nel software sono quelle note in letteratura e comunemente utilizzate nelle macchine automatiche, vale a dire leggi a sette tratti quali trapezoidali e trapezoidali modificate a raccordo seno, polinomiali e trigonometriche [2, 3].

Con riferimento alla figura 7, supponendo di dover realizzare un movimento costituito da uno spostamento  $\Delta h_1$  in un tempo  $t_1$  seguito da una pausa di durata  $t_p$ , l'ottimizzazione interverrà sull'intervallo  $t_1$ , modificando leggermente il modo con cui viene realizzato il movimento.

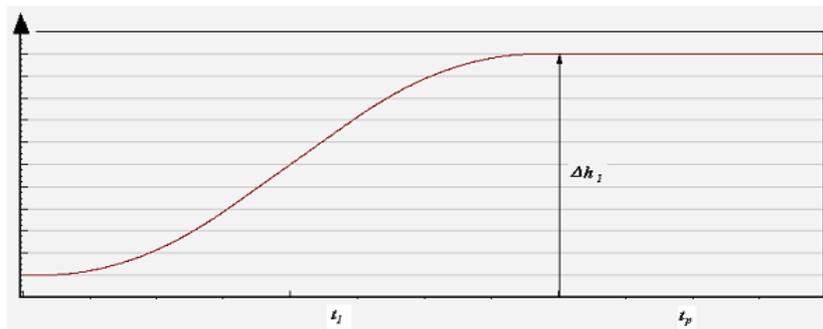


Figura 7: Legge di spostamento imposta.

Una prima campagna di acquisizioni dati è stata fatta allo scopo di verificare la rispondenza del software di simulazione rispetto al reale comportamento del sistema.

Sono stati realizzati diversi gruppi di movimenti tutti caratterizzati dallo stesso valore di spostamento ( $50\text{mm}$ ) e dallo stesso profilo di accelerazione variando solamente il tempo  $t_1$  dedicato al movimento. In generale, per basse velocità si è visto che il modello non sembra rispondere molto bene, in quanto sul sistema reale si manifesta il fenomeno dello stick-slip a meno di una continua lubrificazione della guida lineare. Per valori bassi del tempo di azionamento (a partire da circa  $500\text{ms}$ ) il modello sembra rispondere abbastanza bene durante la fase di movimento, ma appare poco smorzato rispetto al comportamento del sistema reale durante la fase di sosta. A titolo di esempio la figura 8 mostra il risultato, in termini di profili di accelerazione, dell'imposizione di due tipi diversi di leggi di moto di durata pari a  $0.25\text{s}$  (a sinistra accelerazione costante e a destra accelerazione costante tagliata con un lungo tratto a velocità costante): in blu sono indicati gli andamenti imposti, in rosso quelli acquisiti ed in verde quelli simulati.

Appare evidente come in entrambi i casi il modello non sia in grado di rappresentare bene il decadimento delle oscillazioni durante la fase di pausa. Ciò evidenzia che a causa di un precario sull'accoppiamento guida-slitta o anche ad opera della sola forza d'attrito, l'entità dello smorzamento assume valori diversi a seconda che l'attuatore sia o meno in movimento.

Questo aspetto ha suggerito l'introduzione di una modifica al modello matematico così da fare assumere due valori diversi al parametro  $r_1$  a seconda che la velocità imposta  $\dot{y}$  sia o meno nulla.

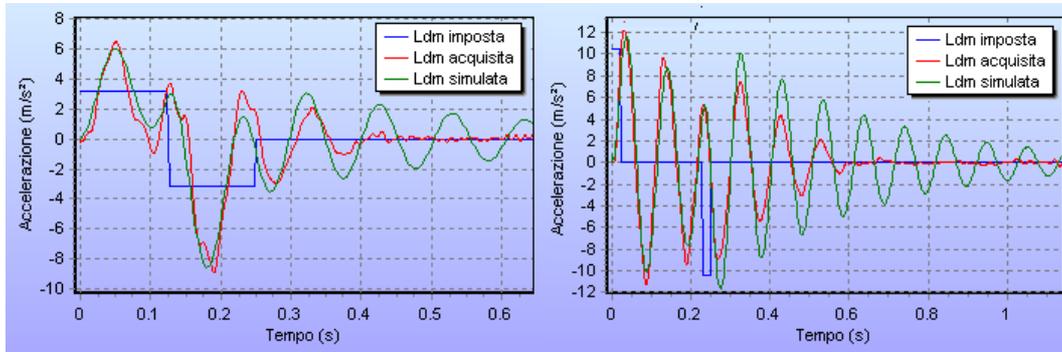


Figura 8: Confronto tra dati sperimentali e simulati.

Mantenendo il valore sopra stimato per  $r_1$  nella fase di moto e adottando  $r_1=30 \text{ N/ms}^{-1}$  nella fase di fermo, si sono ottenuti per i moti precedentemente esposti gli andamenti riportati in figura 9, ove si riscontra molto più appropriata la risposta del modello matematico.

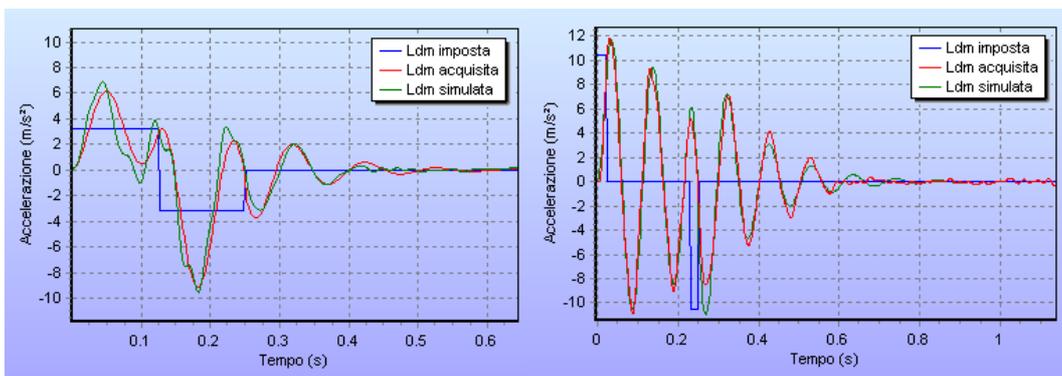


Figura 9: Confronto tra dati sperimentali e simulati con modello a smorzamento definito a tratti.

#### 4 OTTIMIZZAZIONE DELLA LEGGE DI MOTO

Come già accennato nell'introduzione, uno degli aspetti importanti nella pianificazione di un movimento è la scelta di leggi di moto in grado di garantire un'opportuna dolcezza di funzionamento evitando l'innescio di vibrazioni e/o sovra-sollecitazioni sul sistema meccanico.

Da questo punto di vista si è pensato ad un'ottimizzazione diretta secondo due obiettivi: il primo si propone di ridurre l'entità delle azioni dinamiche minimizzando il valore assoluto dell'accelerazione cui è soggetta la massa a valle dell'attuatore; il secondo punta invece a ridurre i fenomeni vibratorii residui nella fase di fermo del sistema (minimizzazione dell'overshoot). L'algoritmo implementato agisce su entrambi gli obiettivi permettendo di pesarne gli effetti.

Lo schema logico seguito è quello di utilizzare il modello matematico per prevedere il comportamento del sistema, e di manipolare la legge di moto dell'attuatore al fine di "controllare" il reale moto della massa a valle della catena cinematica.

Pensando alle leggi di moto a sette tratti (a cui anche in seguito si farà riferimento), che vengono definite da altrettanti coefficienti a partire dal diagramma dell'accelerazione [2], nel caso

più generale, si hanno allora a disposizione sette coefficienti su cui intervenire durante l'ottimizzazione (figura 10).

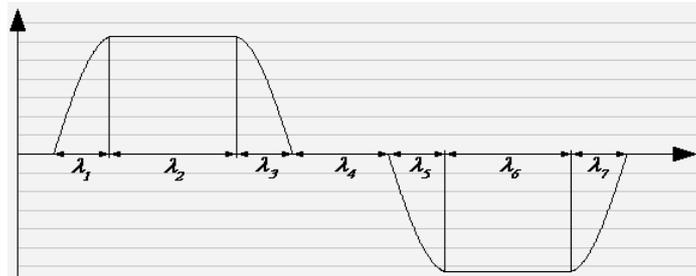


Figura 10: Coefficienti della legge di moto da ottimizzare.

Più in generale, indicando con  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$  l'insieme dei parametri da ottimizzare e con  $F = F(\lambda)$  la funzione obiettivo da raggiungere, il problema diviene quello di minimizzare la funzione  $F$ , ossia il determinare  $\lambda^*$ , tale che  $F(\lambda^*) = \min F(\lambda)$ .

Visto che  $F$  può essere discontinua, o non derivabile (a causa dell'eventuale modellizzazione di giochi e stick-slip), si è utilizzata una procedura di ottimizzazione non convenzionale, quale l'algoritmo genetico illustrato nel paragrafo che segue.

#### 4.1 Algoritmi genetici per l'ottimizzazione

Gli algoritmi genetici e, più in generale, gli algoritmi evolutivi, sono correntemente noti come efficienti strumenti di ottimizzazione, e sono ormai largamente usati nei più svariati campi applicativi [4, 5, 6, 7]. Queste tecniche sono basate sull'evoluzione di un insieme di potenziali soluzioni al problema; il processo evolutivo è guidato dalla massimizzazione di un funzionale che "misura" la qualità di ogni soluzione (detta "fitness"). In altre parole viene ripercorso il processo di selezione naturale di una qualche specie animale che deve adattarsi a particolari condizioni ambientali, pena l'estinzione.

In questo contesto, ogni potenziale soluzione al problema è assimilata al codice genetico (o ad un cromosoma che lo rappresenta) di un particolare individuo. Ad ogni cromosoma  $\lambda$ , caratterizzato da un certo numero di geni  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$  che matematicamente costituiscono gli elementi di ogni vettore soluzione, è possibile associare il valore della funzione fitness in modo strettamente dipendente dalla funzione obiettivo da raggiungere (nel nostro problema il fitness sarà l'inverso della funzione obiettivo, dovendo questa essere minimizzata).

Più precisamente, dopo la definizione in modo casuale, di un primo gruppo di cromosomi  $A^0 = \{\lambda^0_0, \lambda^0_1, \dots, \lambda^0_m\}$ , l'algoritmo manipola e ricombina i loro geni applicando in sequenza e con una certa probabilità alcuni operatori genetici, in seguito descritti, ottenendo così, un nuovo insieme di cromosomi. Questa operazione viene poi reiterata più volte, definendo un successione di gruppi di cromosomi ( $A^0, A^1, A^2, A^3, \dots$ ) in cui gli elementi convergono mediamente verso quello ignoto con caratteristiche migliori (ottimo assoluto). La non divergenza del metodo è garantita reinserendo, in ogni nuovo insieme generato, il miglior cromosoma del gruppo precedente. Il processo viene terminato se viene oltrepassato un certo numero massimo di iterazioni ammesso, o quando un valore prefissato dell'obiettivo viene raggiunto.

Questo modo di procedere, fa sì che i nuovi cromosomi possano essere, molto simili o totalmente differenti dai loro "antenati", migliorando generalmente le caratteristiche del gruppo.

Maggiori dettagli sullo specifico algoritmo implementato possono essere reperiti in [6] e [7].

## 5 RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati dell'applicazione della tecnica sopra esposta sono legati ad una serie di prove sperimentali in cui si è scelto di realizzare uno spostamento di  $50\text{mm}$  in un tempo pari a  $500\text{ms}$ .

Al fine di apprezzare meglio i risultati si confrontano dapprima l'andamento delle acquisizioni di accelerazione ottenuti applicando la legge di moto costante e quella trapezoidale modificata standard (che come suggerito dalla letteratura dovrebbe già di per sé migliorare la risposta del sistema). Si sono riportati tutti i grafici nella stessa scala così da facilitare il successivo confronto fra i vari andamenti. Come si osserva nella figura 11 a sinistra, l'uso di una trapezoidale modificata standard (curva verde) comporta certamente una riduzione dell'overshoot rispetto al caso di accelerazione costante (curva rossa), ma oltre ad aumentare il valore dell'accelerazione positiva, peggiora vistosamente anche il picco di accelerazione negativa portandolo da un valore pari a  $-2.35\text{ m/s}^2$  ad oltre  $-3.16\text{ m/s}^2$ .

A partire dai coefficienti della trapezoidale modificata si è operata una prima ottimizzazione conseguendo l'obiettivo di minimizzare il valore assoluto dell'accelerazione. Nella figura 11 a destra è mostrato il raffronto tra l'andamento ottenuto in base alla trapezoidale standard precedente (verde) e quello rilevato a seguito dell'applicazione della legge di moto ottimizzata (rossa). Si nota un netto miglioramento dei valori di accelerazione positiva e negativa pur dimezzandosi l'entità dell'overshoot.

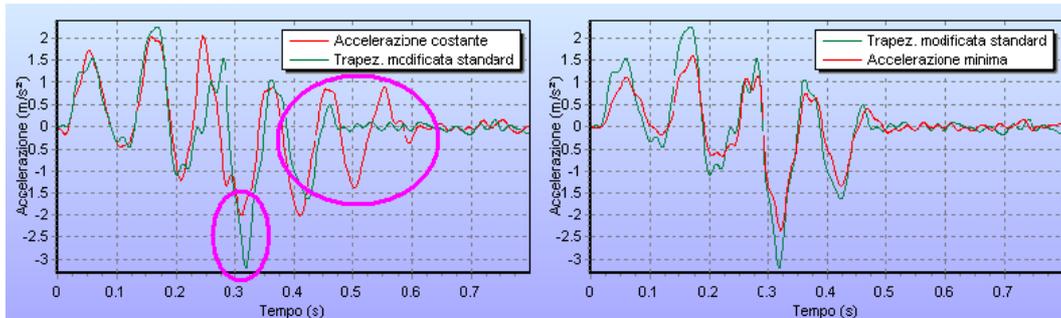


Figura 11: Confronto tra l'applicazione di leggi di moto ad accelerazione costante, trapezoidale modificata standard e ottimizzata ad accelerazione minima.

Legge di moto	Coefficienti							A+	A-	Over shoot
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$			
<i>Accelerazione costante</i>	0	0.5	0	0	0	0.5	0	2.04	-2.02	0.9
<i>Trapezoidale modificata</i>	0.125	0.25	0.125	0	0.125	0.25	0.125	2.26	-3.17	0.5
<i>Ottimizzata accelerazione assoluta minima</i>	0.249	0.0	0.241	0	0.261	0.249	0.204	1.6	-2.35	0.1
<i>Ottimizzata accelerazione e overshoot minimi</i>	0.118	0.204	0.166	0	0.104	0.204	0.204	1.3	-2.06	0.08

Tabella 2: caratteristiche delle leggi di moto adottate.

La tabella 2 raccoglie i dati che caratterizzano le leggi di moto menzionate con i relativi valori sperimentali ottenuti dalla loro applicazione. L'ultima riga riguarda un'ottimizzazione attuata inseguendo sia l'obiettivo di minimizzare il valore assoluto dell'accelerazione che l'effetto

dell'overshoot: tale legge di moto ha portato ad ottenere l'andamento della curva blu riportata in figura 12 che confrontata con la risposta alla trapezoidale modificata (curva verde) evidenzia i risultati dell'ottimizzazione.

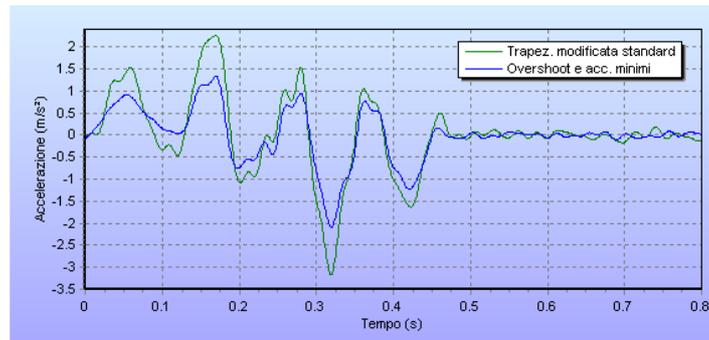


Figura 12: confronto tra l'applicazione di leggi di moto trapezoidale standard ed ottimizzata.

Da un punto di vista numerico si ottiene una riduzione del 42% dell'accelerazione positiva, del 35% dell'accelerazione negativa e di oltre l'84% dell'overshoot. Pur apparendo i risultati molto buoni è necessario segnalare che a rigor di metodo sarebbero necessarie ulteriori prove sperimentali da realizzarsi una volta lasciato il sistema meccanico in azione per lunghi tempi al fine di verificare la *stabilità* delle soluzioni ottenute.

## 6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Pur consapevoli dell'ampia trattazione dell'argomento in letteratura, si ritiene che la procedura proposta possa essere efficacemente utilizzata ogniqualvolta siano note alcune caratteristiche del sistema (inerzie, attriti ed elasticità) ed il modello matematico sia sufficientemente rappresentativo. Il lavoro ha portato alla realizzazione di un banco prova che dal punto di vista didattico permette di verificare fisicamente alcuni aspetti teorici legati alla pianificazione del moto. In questo contesto si sta inoltre lavorando per rendere il sistema comandabile da remoto così da seguire un progetto di *e-learning* verso una didattica innovativa dando modo agli studenti di operare sul banco prova a distanza.

Per ciò che concerne ulteriori ricerche è stata prevista, oltre la possibilità di modificare l'elasticità del sistema, anche quella di introdurre nella catena cinematica opportuni inserti atti a realizzare giochi ad ampiezza imposta così da poter testare modelli matematici più complessi e poter quindi indagare aspetti di non semplice trattazione.

A tal proposito, ricordando che, come inizialmente menzionato, a basse velocità si verifica il fenomeno dello stick-slip si segnala l'avvio di un'ulteriore campagna di prove atte a studiare tale comportamento. In questa direzione una prima evoluzione del modello matematico ha visto l'introduzione nell'equazione del moto di una forza d'attrito con un andamento dipendente dalla velocità della massa in moto. Come mostrato nella foto che segue, grazie all'inserimento di una cella di carico tra le due slitte si è potuto misurare l'entità della forza d'attrito imponendo particolari movimenti all'attuatore.

Le prime misure hanno consentito di valutare la forza di attrito statica e dinamica presente tra slitta e guida permettendo di estendere le simulazioni adattando il modello anche ai casi a basse velocità. Malgrado siano necessari ulteriori perfezionamenti e misure più accurate al fine di irrobustire il modello, come si osserva nella figura 14 a destra, i primi risultati ottenuti applicando

una legge di moto della durata di 2s caratterizzata da un lungo tratto a velocità costante appaiono più che confortanti. La frequenza delle oscillazioni dipende molto dal valore dei coefficienti d'attrito adottati, ma allo stato attuale non si è ancora riusciti a definire un modello completo che simuli sufficientemente bene tutti i casi sperimentati.

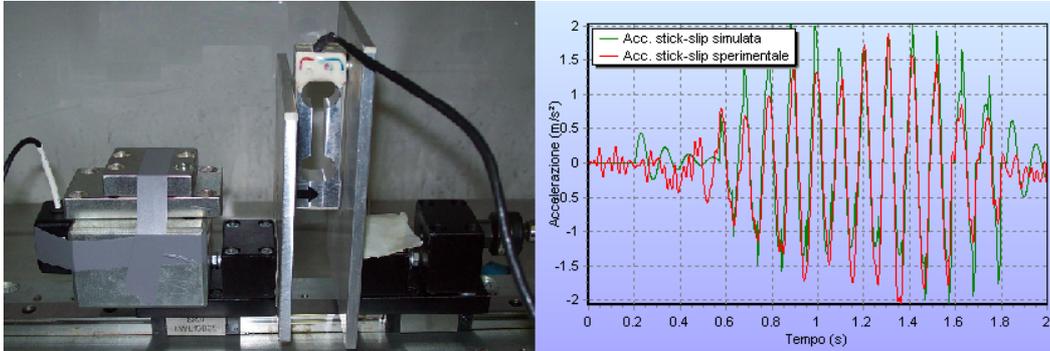


Figura 13: Sistema dotato di cella di carico e simulazione dello stick-slip.

#### Bibliografia

- [1] Erdman A. G., Sandor G. H., "Mechanism Design" Vol. I, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA (1987).
- [2] Magnani P. L., Ruggeri G., Meccanismi per macchine automatiche, UTET, Torino (1986).
- [3] Legnani G., Tiboni M., Adamini R., Meccanica degli azionamenti, vol. 1- Azionamenti elettrici, Società editrice Esculapio, Bologna, (2008).
- [4] Goldberg D., Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning, Edison Wesley, New York, (1989).
- [5] Holland J. H., Genetic Algorithms, Scientific American, July, (1992).
- [6] Bussola R., Sistemi meccanici cedevoli ad uno e due gradi di libertà: ottimizzazione del comportamento dinamico mediante algoritmi genetici, Atti del XIV congresso AIMETA, Como, (1999).
- [7] Bussola R., Tiboni M., *Parametrical Identification for a Complex Mathematical Model of Indexing Cam Mechanisms by Means of a Genetic Algorithm*, Proceedings of EUROGEN99, Jyväskylä, Finland, May 30- June 3, 1999.
- [8] Andreja Rojko, Darko Hercog, Karel Jezernik., *Professional E-training in mechatronics/robotics with remote experiments on Scara robot*, Proceedings of RAAD2009, Brasov, Romania, May 25-27, 2009.
- [9] Mark Denny *Stick-slip motion : an important example of self-excited oscillation*. Eur. J. Phys **25**, 2004