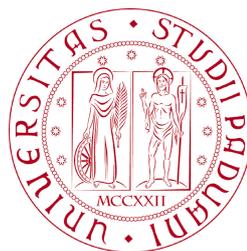


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA



Finito di scrivere il giorno 26 settembre 2010 utilizzando L^AT_EX 2_ε

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

—
DIPARTIMENTO DI INNOVAZIONE MECCANICA E GESTIONALE

—
TESINA DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

MOTORI PIEZOELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE INDUSTRIALE

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIULIO ROSATI

LAUREANDO: ALFREDO NAPOLI

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

a Maria Angelica, Daniel, Silvia, Lucia e Adriano

“ Ogni tecnologia sufficientemente avanzata è indistinguibile dalla magia. ”

ARTHUR C. CLARKE

Indice

Sommario	XIII
Introduzione	XV
1 Piezoelettricità	1
1.1 I materiali	1
1.1.1 Il processo di produzione	3
1.2 Definizioni, coefficienti e direzioni	3
1.3 Le proprietà	5
1.3.1 Risoluzione	5
1.3.2 Proprietà statiche	5
1.3.3 Proprietà dinamiche	6
1.3.4 Calore generato	8
1.3.5 Isteresi	8
1.3.6 Deriva	8
1.3.7 Invecchiamento	9
2 Piezomeccanica	11
2.1 Espansione e contrazione	11
2.2 Forza sviluppabile e costante elastica	11
2.3 Movimento con forze esterne	14
2.4 Funzionamento dinamico	15
2.4.1 Frequenza risonante	15
2.4.2 Fase	15
2.4.3 Tempo di reazione	15

2.5	Influenze e condizioni ambientali	16
2.5.1	Effetti della temperatura	16
2.5.2	Effetti dell'umidità	17
2.5.3	Funzionamento in atmosfere di gas inerti	17
2.5.4	Funzionamento nel vuoto	17
2.6	Vita media di un piezoattuatore	18
3	Modello matematico del piezoattuatore	19
3.1	Il modello elettromeccanico	19
3.2	L'isteresi	21
3.3	Il modello meccanico	22
3.3.1	Estensione al dispositivo di posizionamento piezoattuato	28
3.4	Configurazioni di controllo in tensione e in carica	31
3.4.1	Controllo in tensione	32
3.4.2	Controllo in carica	32
3.5	Modello totale per il controllo in carica	33
4	Controlli e sensori	35
4.1	Controllo di piezoattuatori	35
4.2	Sensori	38
4.2.1	Metrologie	38
4.2.2	Sensori ad alta risoluzione	39
5	Sistemi di posizionamento piezoelettrici	43
5.1	Piezoattuatori	43
5.1.1	A pila	43
5.1.2	Laminari	44
5.1.3	Tubolari	45
5.1.4	Flessibili a struttura bimorfa e multimorfa	46
5.1.5	A taglio	47
5.2	Leve amplificatrici di movimento	47
5.3	Motori piezoelettrici	48
5.3.1	Motori stepper a bloccaggio	48

5.3.2	Motori stepper inerziali	50
5.3.3	Motori ultrasonici ad onda dinamica	50
5.3.4	Motori ultrasonici ad onda stazionaria	51
5.4	Confronto col motore elettrico	52
5.4.1	Rotativi	52
5.4.2	Lineari	54
5.5	Applicazioni	55
	Conclusioni	57
	A Glossario	61
A.1	Glossario di riferimento	61
A.2	Chiavi di ricerca	64
	B Ceramiche PMN	65
	C	67
	Bibliografia	69

Sommario

L'attuatore piezoelettrico è noto per la sua capacità di gestire movimenti estremamente piccoli che vadano da 10 pm a 100 μm , con notevole velocità e precisione. In questo lavoro di tesi si cerca di dare una prima introduzione a questo tipo di motori.

Innanzitutto, nel primo capitolo verrà analizzata la piezoelettricità e le caratteristiche elettriche e strutturali delle piezoceramiche.

Nel secondo capitolo verranno valutate le caratteristiche meccaniche che rendono i piezoattuatori motori potenti, scattanti e affidabili.

Nel terzo capitolo verrà elaborato un modello elettromeccanico dell'attuatore, che sia in grado di tener conto delle non-linearità del sistema basandosi sul comportamento fisico; da qui verrà ricavato il comportamento di un sistema di posizionamento completo.

Nel quarto capitolo verranno presentati i principali tipi di controlli e di sensori, necessari per poter controllare il movimento in così piccole scale.

Infine, nel quinto e ultimo capitolo, verrà fatta una carrellata sui principali tipi di piezoattuatori in commercio, vedendo le attuali applicazioni e effettuando un confronto col motore elettrico.

Introduzione

La piezoelettricità è un fenomeno incontrato spesso nella vita quotidiana. Ad esempio in molti accendini a gas la scintilla viene prodotta applicando pressione su una piezoceramica. I primi ad osservare tale fenomeno furono Jacques e Pierre Curie nel 1890. Scoprirono che si poteva generare un potenziale elettrico applicando una pressione su cristalli di quarzo e battezzarono il fenomeno “effetto piezo”, che in greco significa “pressione”. Più tardi scoprirono che un materiale piezoelettrico cambia forma se sottoposto a un campo elettrico, e chiamarono questo fenomeno “effetto piezo inverso”. La prima applicazione commerciale di questo effetto si ebbe nella Grande Guerra, con l’avvento dei primi sonar, ma la vera rivoluzione ci fu negli anni quaranta, quando si scoprirono nuovi materiali con proprietà piezoelettriche più evidenti. Da allora gli attuatori piezoelettrici hanno trasformato il mondo del posizionamento di precisione e del controllo del movimento essendo in grado di fare movimenti subnanometrici ad alte frequenze, senza per’altro aver parti che ruotino o scorrano e quindi senza attriti. I motori piezoelettrici sono motori che dissipano poco, sono molto precisi e lavorano a frequenze molto elevate. Il limite è dato dalle basse velocità raggiungibili e dalle brevi corse degli attuatori, nonché, per il momento, dal prezzo elevato.

Capitolo 1

Piezoelasticità

In questo capitolo verrà descritta l'anima dei piezoattuatori: la ceramica policristallina e le sue proprietà piezoelettriche, e verrà data una breve descrizione del suo processo di produzione. Verranno poi poste le basi e date le definizioni necessarie per affrontare lo studio che verrà approfondito nei prossimi capitoli. Infine verranno analizzate le caratteristiche elettriche e strutturali di un piezoattuatore. La fonte di questo argomento è [1].

1.1 I materiali

Materiali naturali come la tormalina, il quarzo o il sale di Rochelle godono di proprietà piezoelettriche molto deboli, perciò negli ultimi sessant'anni sono state sviluppate leghe con migliori proprietà quale il titanato di bario e lo zirconato-titanato di piombo (PZT). Oggigiorno le ceramiche PZT, disponibili in molte varianti, sono quelle che vengono più ampiamente utilizzate negli attuatori. In forma meno massiccia viene usato il niobato di piombo e magnesio (appendice B).

Prima del processo di polarizzazione i cristalli di PZT sono costituiti da celle elementari a simmetria cubica. Ma quando la ceramica viene raffreddata al di sotto della temperatura di Curie, la struttura reticolare si deforma perdendo la simmetria e le celle si polarizzano spontaneamente divenendo piezoelettriche. Tuttavia non si osservano effetti macroscopici in quanto l'orientamento non è uniforme,

ma spezzettato in tanti piccoli gruppi di celle, i cosiddetti Domini di Weiss. Sfruttando la natura ferroelettrica del materiale è possibile, applicando un forte campo elettrico, imporre un allineamento permanente ai differenti domini di Weiss. La ceramica così trattata gode di proprietà piezoelettriche: si deforma se viene immersa in un campo elettrico, viceversa sviluppa una tensione elettrica ai capi se viene deformata. La polarizzazione però non è irreversibile, infatti viene degradata se vengono superati i limiti meccanici, elettrici o termici del materiale.

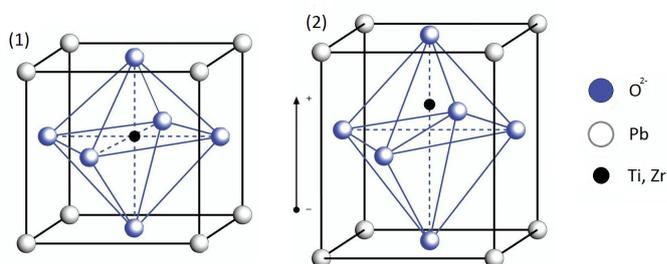


Figura 1.1: (1) cella unitaria di PZT con la sua simmetria cubica, al di sopra della temperatura di Curie e (2) con distorsione tetraedrica, sotto la temperatura di Curie [1].

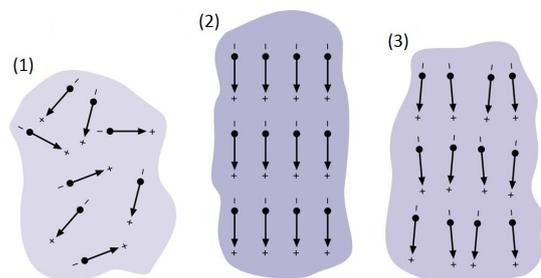


Figura 1.2: Dipoli elettrici nei domini (1) prima, (2) durante e (3) dopo la polarizzazione [1].

1.1.1 Il processo di produzione

Il processo di produzione ha inizio mescolando e macinando il materiale grezzo. Il composto viene scaldato al 75% della temperatura di sinterizzazione e poi rimacinato. Poi si procede alla granulazione con un legante, per rendere il materiale più adatto alle successive lavorazioni. Dopo la modellatura e la compressione, la ceramica viene portata a 750°C per estrarre il legante. La fase successiva è la sinterizzazione, che avviene a temperature tra i 1250°C e i 1350°C. Quindi il blocco viene tagliato, lucidato e lappato fino ad ottenere la forma e la tolleranza desiderate. L'ultimo passo è la polarizzazione, che avviene in un bagno d'olio caldo a campi elettrici di parecchi kV/mm.

I piezoattuatori multistrato richiedono un differente processo produttivo. Dopo la macinazione viene preparato un liquame, più adatto alla successiva lavorazione: la laminazione, che permette di ottenere fogli fino a 20 μm di spessore. Degli elettrodi vengono "stampati" sulle lamine, che vengono poi compattate per incrementarne la densità e rimuovere l'eventuale aria intrappolata. Gli ultimi passi sono la bruciatura del legante, la sinterizzazione (a temperature inferiori ai 1100°C), le terminazioni dei conduttori e la polarizzazione.

Tutti i processi, specialmente quelli ad alte temperature, devono essere controllati con tolleranze molto strette per evitare che vengano danneggiate le qualità e le proprietà delle ceramiche.

1.2 Definizioni, coefficienti e direzioni

La natura anisotropica delle ceramiche PZT rende gli effetti piezoelettrici dipendenti dalla direzione. Considereremo i tre assi cartesiani X , Y , Z e i tre assi di rotazione θ_x , θ_y , θ_z , che vengono numerati da uno a sei in quest'ordine. L'asse Z , il terzo, verrà associato alla direzione di polarizzazione.

Vengono introdotti i seguenti coefficienti, che possono essere considerati costanti sotto le ipotesi dei piccoli segnali:

- d_{ij} : coefficiente di deformazione [m/V] o di carico in uscita [C/N], ovvero deformazione sviluppata lungo la direzione j [m/m] per unità di campo

elettrico lungo i [V/m] o densità di carica generata [C/m²] per una data sollecitazione, e viene talvolta chiamato “guadagno”.

- g_{ij} : coefficiente di tensione o di campo in uscita [Vm/N]: campo elettrico [V/m] generato a circuito aperto a causa di una sollecitazione meccanica applicata [N/m²], o deformazione [m/m] causata da una densità di carica [C/m²].
- k_{ij} : coefficiente di accoppiamento, adimensionale in quanto rapporto tra energie; descrive la conversione tra energia meccanica ed elettrica. k^2 è l'energia immagazzinata per energia applicata.

Altri importanti parametri sono i moduli di Young e i coefficienti di permittività dielettrica relativa. In tutti i casi il primo pedice indica la direzione dello stimolo, il secondo quella della reazione del sistema.

Ad esempio d_{33} significa che il campo elettrico e la deformazione sono entrambi lungo l'asse Z , e verrà utilizzato nel calcolo del movimento degli attuatori a pila; solitamente assume valori nell'intervallo 250-550 pm/V. Invece d_{31} significa che mentre il campo elettrico è ancora parallelo all'asse Z , ci si riferisce alla deformazione lungo l'asse X (ortogonale al vettore di polarizzazione), che verrà utilizzato nella descrizione degli attuatori a tubo o a striscia, e solitamente assume valori tra i -180 e i -210 pm/V. Verranno eventualmente usati degli apici per descrivere le condizioni, elettriche o meccaniche, di contorno:

S: deformazione costante (bloccata meccanicamente).

T: sollecitazione costante (non bloccata).

E: campo nullo (circuito chiuso).

D: movimento di carica nullo (circuito aperto).

1.3 Le proprietà

1.3.1 Risoluzione

Il movimento di un piezoattuatore si basa sullo spostamento ionico e l'orientazione delle celle elementari delle PZT, quindi la risoluzione è virtualmente illimitata. Però, dal momento che non ci sono tensioni di soglia, la stabilità della sorgente di tensione è fondamentale e anche un rumore dell'ordine dei μV può causare movimenti indesiderati. Perciò solo l'utilizzo di un amplificatore a basso rumore permette ad un attuatore piezoelettrico di avere un movimento regolare e continuo con risoluzione subatomica, fondamentale in applicazioni quali la microscopia a forza atomica e quella a effetto tunnel.

Tuttavia il rumore situato a frequenze lontane da quella di risonanza del sistema non influisce sulla stabilità del posizionamento, perciò il valore (in mV) del rumore nella tensione di controllo è un dato di scarsa utilità se non abbinato a informazione di tipo spettrale. Le case produttrici preferiscono quindi fornire come dato la risoluzione dell'intero sistema -piezoattuatore ed elettronica di controllo- misurato in nanometri.

1.3.2 Proprietà statiche

Nel funzionamento a frequenze molto più basse della frequenza di risonanza un piezoattuatore ha, secondo una stima al primo ordine, un comportamento capacitivo: tensione proporzionale alla carica immagazzinata. Ma dal momento che il movimento è proporzionale alla tensione, per transitività il movimento sarà proporzionale alla carica immagazzinata.

La capacità dipende dall'area e dallo spessore della ceramica, nonché dalle proprietà del materiale. Negli attuatori a pila, fatti di wafer laminari molto sottili connessi in parallelo, essa dipende anche dal numero di strati. Ai piccoli segnali, la capacità può essere descritta da:

$$C \simeq n \cdot \epsilon_{33T} \cdot \frac{A}{d_s} \quad (1.1)$$

dove:

n = numero di strati = $\frac{L_0}{d_s}$

ϵ_{33T} = costante dielettrica

A = superficie degli elettrodi in uno strato

d_s = distanza tra gli elettrodi, ovvero spessore degli strati

L_0 = lunghezza dell'attuatore

L'equazione 1.1 mostra che, dato L_0 , la capacità aumenta col quadrato di n .

1.3.3 Proprietà dinamiche

I piezoattuatori possono imprimere accelerazioni fino a qualche migliaio di g e pertanto sono ottimi per applicazioni dinamiche. Per la buona riuscita di questo tipo di operazioni bisogna tener conto di slew rate e massima corrente erogabile dall'amplificatore, di forze dinamiche esterne, di risposta in frequenza del sistema retroazionato e di calore generato. Il funzionamento dinamico più elementare è quello sinusoidale, per il quale la corrente media necessaria è data da:

$$i_m \simeq f \cdot C \cdot V_{p-p} \quad (1.2)$$

con V_{p-p} tensione picco-picco, e la corrente al picco è:

$$i_{max} \simeq f \cdot \pi \cdot C \cdot V_{p-p} \quad (1.3)$$

mentre le potenze da erogare sono:

$$P_m \simeq C \cdot V_{max} \cdot V_{p-p} \cdot f \quad (1.4)$$

$$P_{max} \simeq \pi \cdot C \cdot V_{max} \cdot V_{p-p} \cdot f \quad (1.5)$$

dove con V_{max} si indica la tensione nominale dell'amplificatore. Il funzionamento con un'onda triangolare si può conseguire fino ad una frequenza massima data da:

$$f_{max} \simeq \frac{i_{max}}{2CV_{p-p}} \quad (1.6)$$

Per il funzionamento ai grandi segnali, nei calcoli, è d'uso considerare una capacità incrementata del 70%.

Esempio di calcolo: ad un piezoattuatore ad alto voltaggio (HVPZT), con una $C = 40$ nF e corsa nominale $40 \mu\text{m}$ a 1000 V, viene richiesto un movimento sinusoidale di $20 \mu\text{m}$ a 1000 Hz. Per il movimento richiesto sono sufficienti 500 V, quindi con la 1.3 si ottiene la corrente di picco $i_p = 63$ mA.

Nelle applicazioni viene calcolata la corrente necessaria piuttosto che la potenza da erogare, dal momento che la prima cresce linearmente sia con la frequenza che con la tensione (ovvero con lo spostamento). A questo scopo viene utilizzato il comodo coefficiente DOCC (Dynamic Operating Current Coefficient), che è la corrente da fornire per unità di frequenza e per unità di spostamento. I valori ottenuti usando il DOCC sono validi per il funzionamento sinusoidale in catena aperta, mentre in catena chiusa il fabbisogno di corrente può aumentare anche di un 50%.

In un'operazione di switch la tensione sull'attuatore segue (sempre con una stima al primo ordine) l'andamento esponenziale tipico dei sistemi RC:

$$V(t) = V_0 + V_p \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1.7)$$

dove R è la resistenza di uscita della sorgente, e C è la capacità del piezoattuatore.

Quest'approssimazione è valida in condizione quasi-statiche, e sotto le stesse ipotesi all'andamento della tensione corrisponde quello della posizione del terminale. Ma se la tensione sale troppo velocemente può esserci risonanza, e quindi overshoot e oscillazioni.

Inoltre quando un piezoattuatore si espande o si contrae vi sono forze esterne che agiscono sulla ceramica, che causano una tensione aggiuntiva sulla sorgente. Quindi per raggiungere il tempo ideale, pari a un terzo del periodo di risonanza, si usano sistemi per evitare sovraelongazioni. Bisogna però ricordare che la rapida attuazione di nanomeccanismi può causare, nelle meccaniche azionate, oscillazioni dovute al contraccolpo; infatti le rapide accelerazioni impresse potrebbero essere più veloci di quanto possano sopportare le meccaniche tradizionali, e il tempo dovuto all'estinzione di tali oscillazioni potrebbe essere molto superiore al tempo dovuto per il movimento in sè.

1.3.4 Calore generato

Nel funzionamento dinamico, avendo un carico capacitivo, le ceramiche PZT richiedono correnti di carica e scarica che aumentano all'aumentare della frequenza. La potenza dissipata può essere stimata dalla seguente equazione:

$$P \simeq \frac{\pi}{4} \cdot \tan \delta \cdot f \cdot C \cdot V_{p-p}^2 \quad (1.8)$$

dove $\tan \delta$ è il fattore dielettrico, equivalente al fattore di potenza $\cos \psi$, e descrive la frazione di potenza dissipata (ai piccoli segnali assume valori dell'ordine di 0.01-0.02, mentre ai grandi segnali può arrivare fino a 0.08-0.12). Perciò per grandi ampiezze o alte frequenze potrebbero essere necessari sistemi di raffreddamento, magari abbinati a sistemi per il recupero dell'energia.

1.3.5 Isteresi

Gli attuatori controllati in catena aperta mostrano isteresi elettrica e magnetica nel loro comportamento, soprattutto ai grandi segnali. L'effetto infatti diventa più significativo all'aumentare del campo elettrico, con un gap che comincia a essere tipicamente del 2% ai piccoli segnali, mentre ai grandi segnali raggiunge il 10% – 15%. Ad esempio, considerando un attuatore con una corsa di $50\mu\text{m}$, se si cambia la tensione di un 15% (equivalente a uno spostamento di $5\mu\text{m}$) la ripetibilità rimane sull'1% della corsa totale, ovvero inferiore al micron. Quindi minore è il movimento, minore è l'incertezza. Per questo l'isteresi non può essere paragonata al backlash della meccanica convenzionale: il backlash infatti è indipendente dal percorso, quindi in piccoli movimenti la sua importanza relativa è maggiore.

1.3.6 Deriva

La deriva è la variazione spontanea della deformazione, e avviene senza che vi sia un cambiamento nella tensione di controllo a provocarla. Questo fenomeno è dovuto al fatto che ad ogni variazione della tensione corrisponde un lieve cambiamento nella polarizzazione residua (il guadagno), che si manifesta in un lento cambio di posizione. Il fenomeno è descritto dalla seguente equazione:

$$\Delta L(t) \simeq \Delta L_{t=0.1} [1 + \gamma \cdot \lg(\frac{t}{0.1})] \quad (1.9)$$

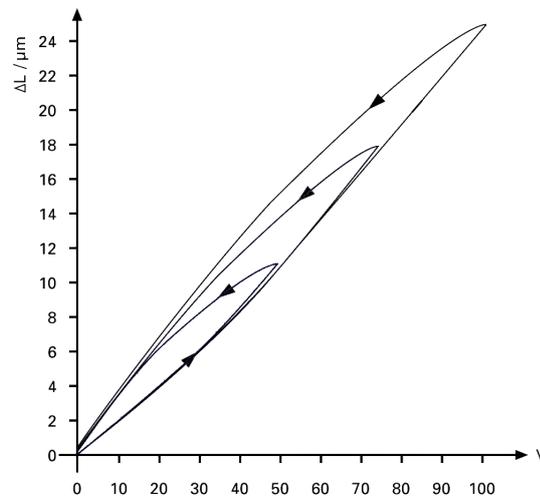


Figura 1.3: Curve d'isteresi in un attuatore controllato in catena aperta, per vari picchi di tensione. Si nota come l'isteresi dipenda dalla distanza percorsa, non dalla corsa nominale [1].

dove:

- $t =$ tempo [s]
- $\Delta L(t)_{0,1} =$ spostamento 0.1 s dopo il termine della variazione nella tensione [m]
- $\gamma =$ fattore di deriva, che dipende dalle proprietà dell'attuatore (solitamente da 0,01 0.02, ovvero 1% o 2% per decade temporale)

Ne consegue che la deriva, dopo qualche ora, può aggiungere qualche punto percentuale al movimento comandato.

1.3.7 Invecchiamento

Parlando d'invecchiamento dei piezoelettrici ci si riferisce a una riduzione nella polarizzazione residua, lenta e graduale col tempo. Tale perdita di prestazioni può essere un problema per applicazioni su sensori o generatori di carica, che sfruttano l'effetto piezo diretto: negli attuatori invece questo effetto è trascurabile, in quanto il materiale si ripolarizza ogni volta che viene investito da un elevato campo elettrico nella direzione di polarizzazione.

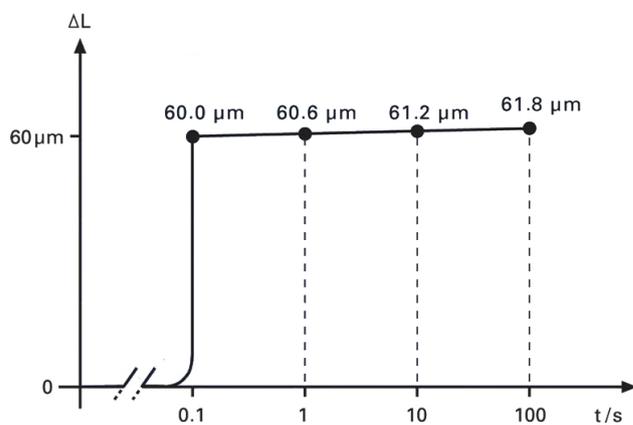


Figura 1.4: Deriva nel movimento di una PZT dopo una variazione della lunghezza di $60\ \mu\text{m}$ in funzione del tempo. Si nota la deriva dell'1% per decade temporale [1].

Capitolo 2

Piezomeccanica

2.1 Espansione e contrazione

La deformazione di una piezoceramica dipende principalmente dal campo elettrico applicato (E), dalla lunghezza dell'attuatore (L), ma anche dalle forze applicate e dal materiale usato; in ogni caso per quel che riguarda l'elongazione, il valore massimo si aggira sul 0.2%. La legge di allungamento è la seguente:

$$\Delta L \simeq \pm E \cdot d_{ij} \cdot L_0 \quad (2.1)$$

dove L_0 è la lunghezza della ceramica a riposo. I valori massimi vengono raggiunti con attuatori a taglio, nella modalità d_{15} , mentre il massimo campo elettrico applicabile si aggira sui 1 – 2 kV/mm nella direzione di polarizzazione. Un attuatore può essere anche attivato con tensione negativa, ottenendo una contrazione della ceramica. Questo tipo di funzionamento è detto “bipolare” e permette di aumentare la corsa effettiva del 20% su quella nominale. Per la tensione negativa il limite è 300 V/mm. Superare questi valori può causare una rottura dielettrica e danni irreversibili.

2.2 Forza sviluppabile e costante elastica

Una ceramica PZT può sostenere pressioni fino a 250 MPa senza rompersi. Ciononostante, questo valore non dovrebbe mai esser raggiunto in applicazioni pratiche, in quanto la depolarizzazione avviene circa al 20-30% del limite meccanico. Negli

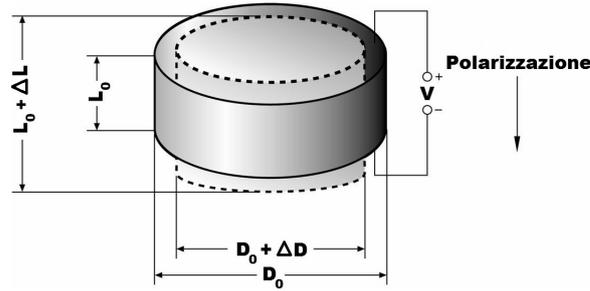


Figura 2.1: Espansione e contrazione di un disco di piezoelettrico in risposta ad uno stimolo di tensione. Si nota che d_{31} che descrive il movimento laterale ΔD è negativo [1].

attuatori a pila o a più stadi si hanno ulteriori limitazioni, e devono esser presi in considerazione parametri come il fattore di forma, l'instabilità, l'interazione degli stadi, etc.

I carichi di trazione dei piezoattuatori non precaricati sono limitati al 5-10% del limite di compressibilità. Per di più le PZT sono molto sensibili alle forze di taglio, che devono essere prevenute da misure esterne come guide flessibili o altre soluzioni.

L'elasticità del piezoattuatore è un parametro importante per calcolare la forza sviluppabile, la frequenza di risonanza e il comportamento generale del sistema. Essa dipende dal modulo di Young del materiale ed è generalmente espressa dalla costante elastica k_t , che descrive la deformazione del corpo in risposta ad una sollecitazione esterna. Però questa definizione è debole, in quanto nelle piezoceramiche è necessario distinguere i casi dinamico o statico, grandi segnali o piccoli segnali, a circuito aperto o chiuso. Il processo di polarizzazione lascia una tensione meccanica residua nel materiale che dipende dall'intensità di tale polarizzazione, e la polarizzazione stessa è influenzata dalla tensione esterna e dalle forze esterne. Quando viene applicata una forza esterna ad una ceramica polarizzata, le variazioni dimensionali dipendono dall'elasticità del materiale e dalla variazione nella tensione meccanica residua. Perciò l'equazione della molla:

$$\Delta L_N = \frac{F}{k_t} \quad (2.2)$$

è valida solo per piccole forze e ai piccoli segnali. Per forze maggiori è necessario

introdurre un termine aggiuntivo, che descriva l'influenza delle variazioni di polarizzazione. Inoltre dato che le piezoceramiche sono materiali attivi, esse generano una risposta elettrica quando vengono sottoposti a stress meccanico. Questa carica, se non drenata, sviluppa una forza opposta alla sollecitazione. Ne è la prova il fatto che un elemento piezoelettrico che abbia gli elettrodi scollegati risulta più duro di uno con gli elettrodi cortocircuitati.

Ad ogni modo, benché concettualmente incompleto e impreciso, il modello della molla viene ampiamente usato e considerato sufficiente per la maggior parte dei calcoli.

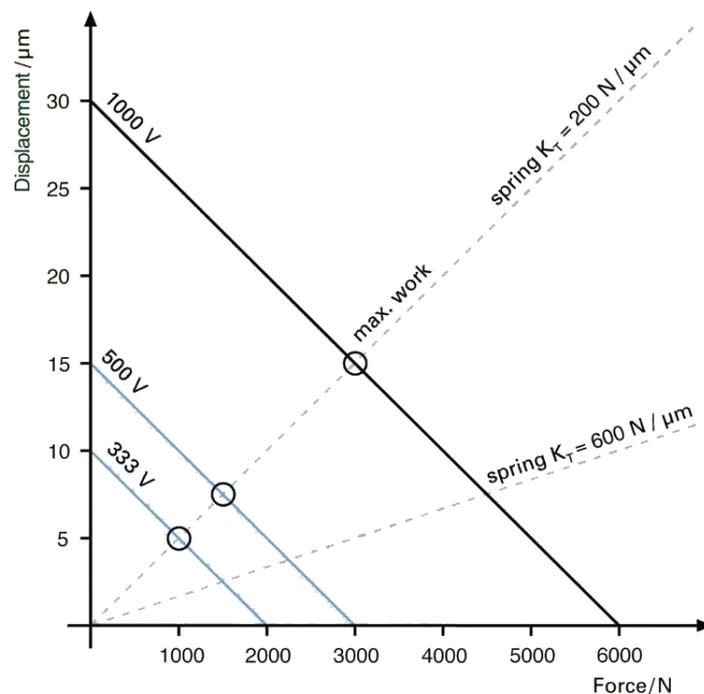


Figura 2.2: Forza sviluppata vs. spostamento per un piezoattuatore (corsa $30 \mu\text{m}$, rigidità $k_t = 200 \text{ N}/\mu\text{m}$) alle varie tensioni operative. Le linee tratteggiate sono le curve delle forze elastiche esterne, mentre i punti d'intersezione, cerchiati, sono i punti di lavoro. Il lavoro massimo si fa quando le elasticità interne ed esterne sono equivalenti [1].

Benché i piezoattuatori vengano solitamente usati per la movimentazione, se usati in modo controllato possono essere adoperati per sviluppare forze o pressioni (ad esempio per stampare). Ciò comporta una riduzione nella corsa, proporzionale

alla forza che si vuole sviluppare. Dal momento che il sistema è assimilabile a una molla, possiamo utilizzare l'equazione (2.2) per descrivere la forza massima sviluppabile su un vincolo infinitamente rigido:

$$F_{max} \simeq k_t \cdot \Delta L_0 \quad (2.3)$$

dove ΔL_0 è la massima elongazione possibile quando non vi sono vincoli esterni. Nelle reali applicazioni il vincolo può non essere così rigido, e gli si può quindi attribuire un comportamento elastico, ovvero una sua costante elastica k_s , e la 2.3 diventa:

$$F_{maxeff} \simeq \Delta L_0 \left(1 - \frac{k_t}{k_t - k_s}\right) \quad (2.4)$$

Esempio di calcolo: Un piezoattuatore viene utilizzato per un'operazione di impressione a secco nanometrica. A riposo, la distanza tra la punta e il materiale è di $30 \mu\text{m}$, ed è necessaria una forza di 500 N per sbalzare il materiale. Può essere impiegato un attuatore con corsa di $60 \mu\text{m}$ e costante di durezza di $100 \text{ N}/\mu\text{m}$? $30 \mu\text{m} \cdot 100 \text{ N}/\mu\text{m} = 3000 \text{ N}$, quindi in condizioni ideali la risposta è affermativa. Se però il supporto dov'è montato il materiale da sbalzare avesse una costante elastica di $10 \text{ N}/\text{m}$, usando la 2.4 si trova che verrebbe sviluppata una forza di appena 300 N , insufficiente a sbalzare il materiale.

2.3 Movimento con forze esterne

Se il piezoattuatore è collegato ad un carico, è necessario distinguere due casi: che il carico rimanga costante o che il carico vari durante il processo.

Nel primo caso si usa la 2.2 per determinare l'offset di posizionamento:

$$\Delta L_N \simeq \frac{F}{k_t} \quad (2.5)$$

Nel secondo caso si usa la 2.4 per determinare la corsa effettiva dell'attuatore:

$$\Delta L \simeq \Delta L_0 \left(\frac{k_t}{k_t + k_s}\right) \quad (2.6)$$

Esempio di calcolo: Un piezotraslatore con corsa nominale $15 \mu\text{m}$ con $50 \text{ N}/\mu\text{m}$ viene montato su un supporto a molla con costante elastica $k_s = 100 \text{ N}/\text{m}$. Dalla 2.6 deriva che il massimo spostamento conseguibile è $5 \mu\text{m}$, ovvero $1/3$ della corsa nominale.

2.4 Funzionamento dinamico

Nel funzionamento dinamico è necessario considerare che per imprimere un'accelerazione è necessario applicare una forza proporzionale all'inerzia totale di ceramica e carico. La forza massima è data dalla 2.3, che per un movimento oscillatorio dev'essere maggiore a quella richiesta, che è:

$$F_{dyn} = \pm 4\pi^2 \cdot m_{eff} \left(\frac{\Delta L}{2}\right) f^2 \quad (2.7)$$

dove m_{eff} è la massa effettiva, ovvero quella del carico più 1/3 della massa della ceramica, mentre f è la frequenza operativa.

2.4.1 Frequenza risonante

Un attuatore senza carico è assimilabile ad un sistema massa-molla ideale, perciò la frequenza risonante è:

$$f_0 = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \sqrt{\frac{k_t}{m_{eff}}} \quad (2.8)$$

Aggiungendo una massa M la massa effettiva diventa $m'_{eff} = m_{eff} + M$ la frequenza cala secondo la legge:

$$f'_0 = f_0 \sqrt{\frac{m_{eff}}{m'_{eff}}} \quad (2.9)$$

2.4.2 Fase

La fase può essere approssimata con un sistema del secondo ordine dall'equazione:

$$\psi \simeq 2 \cdot \arctan \frac{f}{f_0} \quad (2.10)$$

dove f_0 è la frequenza risonante, mentre f è quella operativa.

2.4.3 Tempo di reazione

Il basso tempo di risposta è una delle caratteristiche fondamentali degli attuatori piezoelettrici: ad una rapida variazione nella tensione di controllo segue un repentino movimento del terminale. Questa proprietà è particolarmente apprezzata in

applicazioni come la microscopia, la stabilizzazione di un'immagine, il funzionamento di valvole, i generatori di onde d'urto, i sistemi anti-vibrazione, etc.

Un piezoattuatore raggiunge la corsa nominale in circa 1/3 del periodo di risonanza, sempre che il controllore eroghi la potenza sufficiente con un adeguato slew rate:

$$T_{min} \simeq \frac{1}{3f_0} \quad (2.11)$$

Ma se non vengono prese le misure adeguate da una catena di retroazione, a quest'espansione repentina seguirà un significativo overshoot.

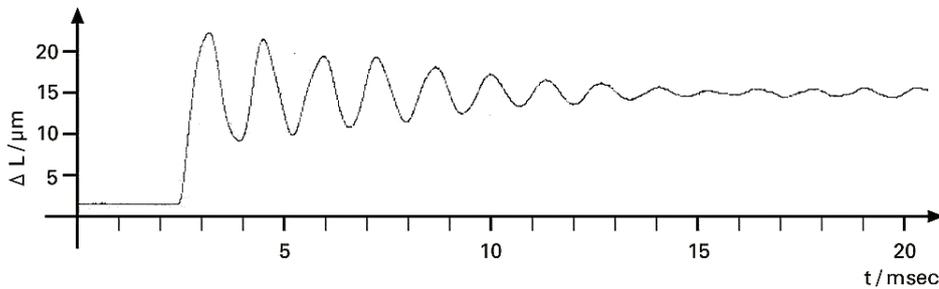


Figura 2.3: Risposta al gradino di un piezoattuatore, dove non è stata usata nessuna tecnica di controllo per prevenire overshoot e oscillazioni [1].

2.5 Influenze e condizioni ambientali

2.5.1 Effetti della temperatura

La stabilità termica delle piezoceramiche è migliore di quella di molti altri materiali, il che permette ai piezoattuatori di lavorare in ampi intervalli di temperatura. L'entità dell'effetto piezo dipende dalla temperatura, al punto che l'effetto diventa nullo all'approssimarsi allo zero assoluto. A temperature da elio liquido (4 °K) il guadagno perde circa il 10-20% rispetto al suo valore a temperatura ambiente [2]. Si ricorda inoltre che le PZT si depolarizzano se scaldate oltre la temperatura di Curie. Ad esempio gli HVPZT hanno una temperatura di Curie di 350°C e possono operare fino a 150°C, mentre gli LVPZT hanno una temperatura di Curie di 150°C e possono operare fino a 80°C. Le nuove ceramiche

PICMA, monolitiche e con temperatura di Curie pari a 320°C possono operare fino a 150°C [3].

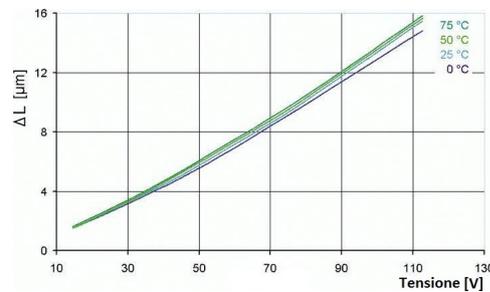


Figura 2.4: Espansione in un attuatore monolitico PICMA, solo lievemente influenzato dalla variazione di temperatura [1].

2.5.2 Effetti dell'umidità

Nei piezoattuatori i polimeri usati per l'isolamento elettrico sono sensibili all'umidità: le molecole d'acqua si diffondono lungo gli strati di polimero e possono causare cortocircuiti tra le lamine di piezoelettrico. Per le applicazioni in ambienti molto umidi possono essere usati speciali sistemi resistenti all'acqua, con sistemi integrati di deumidificazione, o in alternativa le ceramiche PICMA, nelle quali l'isolamento stesso è fatto con materiali ceramici [3].

2.5.3 Funzionamento in atmosfere di gas inerti

In ambienti saturi di gas inerti vi è il rischio di scariche elettriche, perciò è consigliabile a ridurre la tensione massima operativa del sistema. Un metodo possibile è adottare un funzionamento semibipolare, ovvero usare tensione negativa per sfruttare la contrazione dell'attuatore.

2.5.4 Funzionamento nel vuoto

Tutti i piezoattuatori possono funzionare a pressioni inferiori ai 100 Pa, ma si devono considerare due fattori: la stabilità dielettrica e il degassamento. La tensione di ripartizione dielettrica di un gas è proporzionale alla pressione e alla distanza

degli elettrodi. L'aria è un ottimo isolante alla pressione atmosferica, ma al calare della pressione può smettere di esserlo. La minima tensione di ripartizione di 300 V si ha a 1000 mm·Pa [2].

Per il degassamento vengono usati modelli progettati specificatamente per situazioni di vuoto estremo e sono tutte prive di polimeri nell'isolamento (PICMA [3]).

2.6 Vita media di un piezoattuatore

È stato dimostrato [2] che i piezoattuatori possono affrontare miliardi di cicli di lavoro senza usurarsi, perciò sono invulnerabili al logorio. Ad ogni modo, come i condensatori, sono sensibili a lungo andare all'intensità del campo elettrico, il cui valor medio dovrebbe esser mantenuto il più basso possibile, ad esempio adottando soluzioni in cui a riposo non ci sia tensione nell'attuatore. Le statistiche affermano che la maggior parte dei guasti vengono causati da stress meccanici, come trazioni, forze di taglio, torsioni e shock meccanici. Per proteggere la ceramica da questo tipo di eventi vengono usate punte flessibili o a sfera e precarichi.

Capitolo 3

Modello matematico del piezoattuatore

Un difetto dell'attuatore piezoelettrico è la non-linearità nel comportamento ingresso-uscita causata dall'isteresi. Ciò significa che l'uscita non è determinata univocamente dall'ingresso, ma dipende dalla storia dell'ingresso stesso.

In questo modello viene adottata un'equazione differenziale del primo ordine per descrivere l'effetto isteretico, e una alle derivate parziali per il comportamento meccanico. In seguito verranno considerate le influenze di questo tipo di meccanismo, sia nell'attuatore come sistema meccanico autonomo, che integrato in un sistema di posizionamento. Inoltre verranno derivati i modelli dei controlli in tensione e controllo in carica, che verranno confrontati esaustivamente.

3.1 Il modello elettromeccanico

La più comune configurazione di un piezoattuatore è quella a pila, che consiste in una serie di wafer piezoelettrici connessi con un elettrodo ogni due strati. Si può quindi dire che i wafer sono in serie meccanicamente e in parallelo elettricamente. Perciò ai capi di ogni wafer vi è la stessa tensione che ai capi del piezoattuatore, che chiameremo v_{pea} .

Benché se il sistema è controllato in carica nessun fenomeno isteretico è osservabile [5], l'isteresi compare visibilmente nel controllo in tensione, perciò viene

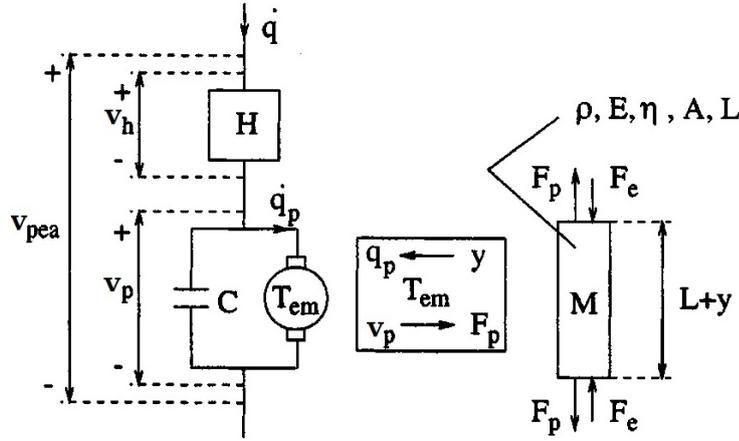


Figura 3.1: Il modello elettromeccanico [4].

usato H per rappresentare l'isteresi e v_h per la tensione dovuta ad essa. L'effetto piezo viene rappresentato con T_{em} , ovvero considerando il piezoattuatore come un trasduttore elettromeccanico con coefficiente di trasformazione T_{em} . La capacità C rappresenta la capacità totale, calcolata come somma delle capacità individuali dei wafer. La corrente totale che scorre nel circuito è \dot{q} , mentre q è la carica totale di cui q_p è la carica trasdotta meccanicamente. Dualmente, v_p è la tensione dovuta all'effetto piezo, che è parte della tensione totale v_{pea} . Delle forze, F_p è quella dovuta alla trasduzione elettrica mentre F_e è quella applicata esternamente, perciò la risultante è la loro differenza. Lo spostamento risultante del terminale è y . M è la relazione meccanica tra F_p e y . E indica il modulo di Young del materiale, η la viscosità, ρ la densità di massa. Infine la geometria: lunghezza L e area della sezione A , da cui ricaviamo massa, rigidità e smorzamento:

$$m_p = \rho AL \quad (3.1)$$

$$k_p = \frac{EA}{L} \quad (3.2)$$

$$c_p = \frac{\eta A}{L} \quad (3.3)$$

mentre le equazioni elettromeccaniche sono [6]:

$$v_{pea} = v_h + v_p \quad (3.4)$$

$$q = H(v_h) \quad (3.5)$$

$$q = Cv_p + q_p \quad (3.6)$$

$$q_p = T_{em}y \quad (3.7)$$

$$F_p = T_{em}v_p \quad (3.8)$$

$$y = M(F_p - F_e) \quad (3.9)$$

3.2 L'isteresi

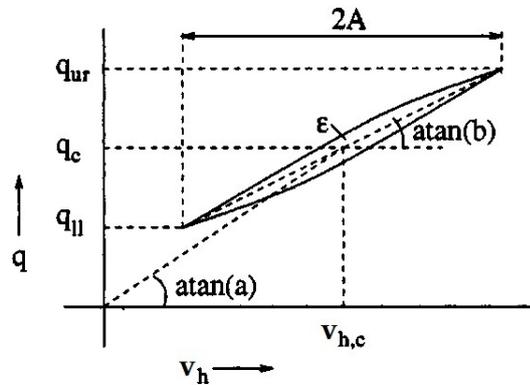


Figura 3.2: Un ciclo d'isteresi realistico [4].

Per definizione, l'isteresi è un effetto dinamico, tempoinvariante e non lineare. Un ciclo isteretico è definito come un ciclo stazionario del piano ingresso-uscita per un ingresso monotono oscillatorio quasi-statico, ovvero una sinusoide a bassa frequenza. L'equazione presa in considerazione è un'equazione differenziale del primo ordine originariamente usata per descrivere l'isteresi magnetica, che i dati sperimentali hanno confermato essere adatta alla descrizione dell'isteresi elettrica di un piezoattuatore [7]:

$$\dot{q} = \alpha|v_h|(f(v_h) - q) + v_h g(v_h) \quad (3.10)$$

dove le funzioni $f(v_h)$ e $g(v_h)$ descrivono la forma del ciclo. Tale ciclo è centrato in $q_c = f(v_{h,c})$, e ha una pendenza media pari a $g(v_{h,c})$. In teoria i piezoattuatori hanno una saturazione d'allungamento, ma stando lontani da questo tipo di saturazione i cicli di saturazione sono tutti del tipo 3.10, e le funzioni f e g possono

essere scelte così:

$$f(v_h) = av_h \quad (3.11)$$

$$g(v_h) = b \quad (3.12)$$

con a e b costanti, ottenendo:

$$q_c = av_{h,c} \quad (3.13)$$

$$q_{ur} - qv = b2A \quad (3.14)$$

dove q_{ur} e q_u sono i punti rispettivamente in alto a destra e in basso a sinistra del ciclo, mentre A è l'ampiezza dell'ingresso.

3.3 Il modello meccanico

Spesso [6] il comportamento meccanico viene descritto usando come modello un singolo sistema massa-molla-smorzatore. Questo approccio ha però delle limitazioni che appaiono evidenti osservando i diagrammi di Bode: mentre il massa-molla-smorzatore ha un unico picco di risonanza, un piezoattuatore ne ha pressochè infiniti in quanto è un sistema a parametri distribuiti, ovvero la massa non è concentrata in alcuni punti ma distribuita nell'elemento [8].

Perciò si rivela più efficace un approccio con equazioni differenziali alle derivate

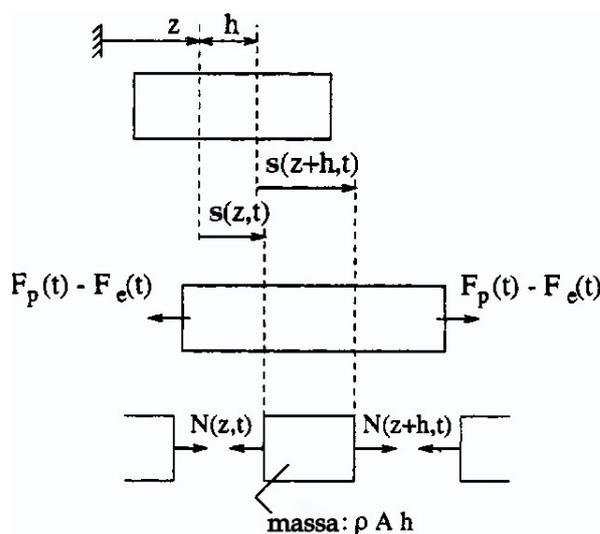


Figura 3.3: Modello di deformazione di un piezoattuatore [4].

parziali. A questo proposito si fa riferimento alla figura 3.3, dove si considera una sezione di piezoattuatore di spessore h alla generica posizione iniziale z . La sua posizione viene descritta nel tempo con $s(z, t)$, mentre la forza normale tra essa e la sezione precedente è $N(z, t)$, da cui si deriva:

$$N(z + h, t) - N(z, t) = \rho Ah \frac{\partial^2 s(z, t)}{\partial t^2} \quad (3.15)$$

che dividendo per h e facendo il limite per $h \rightarrow 0$ diventa l'equazione del moto:

$$\frac{\partial N(z, t)}{\partial z} = \rho A \frac{\partial^2 s(z, t)}{\partial t^2} \quad (3.16)$$

Per specificare il comportamento del materiale vengono introdotte le quantità di tensione meccanica σ e di deformazione ϵ , definite così:

$$\sigma(z, t) = \frac{N(z, t)}{A} \quad (3.17)$$

$$\epsilon(z, t) = \frac{\partial s(z, t)}{\partial z} \quad (3.18)$$

e vengono messe in relazione col modello Kelvin-Voigt, che considera un elemento elastico che obbedisce alla legge di Hooke, in parallelo ad un fluido viscoso newtoniano:

$$\sigma(z, t) = E\epsilon(z, t) + \eta \frac{\partial \epsilon(z, t)}{\partial t} \quad (3.19)$$

e con le 3.17 e 3.18, risolvendo rispetto a N si ha:

$$N = EA \frac{\partial s}{\partial z} + \eta A \frac{\partial^2 s}{\partial z \partial t} \quad (3.20)$$

Finalmente, da 3.16 e 3.20 si ha l'equazione differenziale alle derivate parziali:

$$E \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 s}{\partial z^2 \partial t} = \rho \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \quad (3.21)$$

Una definizione alternativa si ottiene usando le definizioni di massa, rigidità, smorzamento 3.1-3.3:

$$k_p L \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} + c_p L \frac{\partial^3 s}{\partial z^2 \partial t} = \frac{m_p}{L} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \quad (3.22)$$

Nel tentativo di esplicitare i modi elementari e le frequenze corrispondenti, consideriamo l'evoluzione libera, ovvero quella che si ottiene ponendo $F_p - F_e = 0$, che può essere esplicitata a partire dai modi stessi:

$$s(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} s_i(z, t) \quad (3.23)$$

Un singolo modo generico viene estrapolato col principio di separazione delle variabili, ovvero è esprimibile nel seguente modo:

$$s_i(z, t) = Z_i(z)T_i(t) \quad (3.24)$$

Sostituendo la 3.24 nella 3.22, dopo qualche passaggio si ottiene:

$$\frac{Z_i''}{Z_i} = \frac{\ddot{T}_i}{L^2 \frac{c_p}{m_p} \dot{T}_i + L^2 \frac{k_p}{m_p} T_i} \quad (3.25)$$

dove l'apostrofo indica la derivata rispetto a z , mentre il punto la derivata temporale. Il fatto che la parte a sinistra dipende solo da z e quella a destra solo da t porta a dire che quest'equazione è pari a un valore costante, che viene definito come $-\mu^2$, ottenendo le seguenti:

$$Z_i'' + \mu_i^2 Z_i = 0 \quad (3.26)$$

$$\ddot{T}_i + \mu_i^2 L^2 \frac{c_p}{m_p} \dot{T}_i + \mu_i^2 L^2 \frac{k_p}{m_p} T_i = 0 \quad (3.27)$$

Una soluzione generale per la 3.26 è

$$Z_i(z) = A_i \cos(\mu_i z) + B_i \sin(\mu_i z) \quad (3.28)$$

Come condizioni iniziali basta porre che il piezoattuatore sia fisso per $z = 0$

$$\forall t \ s_i(0, t) = Z_i(0)T_i(t) \rightarrow Z_i(0) = 0 \rightarrow A_i = 0 \quad (3.29)$$

e libero per $z = L$, quindi $Z_i'(L) = 0$

$$\forall t \ N_i(L, t) = Lk_p Z_i'(L)T_i(t) + Lc_p Z_i'(L)\dot{T}_i(t) \quad (3.30)$$

$$\rightarrow N_i(L, t) = 0 \rightarrow \mu_i = \frac{i\pi}{2L} \quad i = 1, 3, 5, \dots \quad (3.31)$$

L'espressione per Z_i può quindi essere determinata a meno di una costante:

$$Z_i(z) = B \sin\left(\frac{i\pi}{2L} z\right) \quad i = 1, 3, 5, \dots \quad (3.32)$$

Per i naturale dispari $|Z_i(L)|$ ha un massimo, che corrisponde a un ventre per l'elongazione $y_i(t)$. Invece per i pari $Z_i(L) = 0$, che corrisponde a un nodo di $y_i(t)$.

Per valutare le frequenze proprie, consideriamo la ben nota equazione differenziale generale per sistemi lineari tempo-invarianti del secondo ordine

$$\ddot{T}_i + 2\xi_i\omega_{n,i}\dot{T}_i + \omega_{n,i}^2 T_i = 0 \quad (3.33)$$

dove $\omega_{n,i}$ indica la frequenza naturale (risonante) i -esima mentre ξ_i denota il relativo smorzamento. Tali caratteristiche si derivano confrontando la 3.27 con la 3.33 e usando la 3.31:

$$\omega_{n,i} = \frac{i\pi}{2} \sqrt{\frac{k_p}{m_p}} \quad i = 1, 3, 5, \dots \quad (3.34)$$

$$\xi_i = \frac{i\pi}{4} \frac{c_p}{\sqrt{k_p m_p}} \quad i = 1, 3, 5, \dots \quad (3.35)$$

Da ciò si comprende che, anche per piccoli valori di c_p , i modi alti vengono fortemente smorzati. Le radici della 3.33 sono:

$$-\xi_i\omega_{n,i} \pm j\omega_{s,i}, \quad \text{con } \omega_{s,i} = \omega_{n,i}\sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (3.36)$$

dove si suppone $\xi_i < 1$, non vero per i grande. $\omega_{s,i}$ sono le frequenze smorzate, che sono quelle che effettivamente appaiono. Sostituendo la 3.34 e la 3.35 nella 3.36

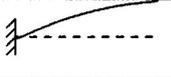
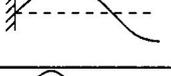
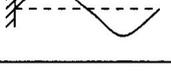
i	Modo	Frequenza smorzata	polo/zero
1		$\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{k_p}{m_p} - \left(\frac{\pi}{2} \frac{c_p}{m_p}\right)^2}$	polo
2		$\pi \sqrt{\frac{k_p}{m_p} - \left(\pi \frac{c_p}{m_p}\right)^2}$	zero
3		$\frac{3\pi}{2} \sqrt{\frac{k_p}{m_p} - \left(\frac{3\pi}{2} \frac{c_p}{m_p}\right)^2}$	polo
4		$2\pi \sqrt{\frac{k_p}{m_p} - \left(2\pi \frac{c_p}{m_p}\right)^2}$	zero
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

Figura 3.4: I modi $\omega_{s,i}$ del piezoattuatore qui rappresentati corrispondono a onde stazionarie nel dominio spaziale per un istante temporale t fissato. Ovviamente si ha a che fare con onde longitudinali, qui rappresentate come trasversali per maggiore chiarezza [4].

si ottengono per i dispari i poli e per i pari gli zeri della funzione di trasferimento

$$M(s) = \frac{y(s)}{(F_p(s) - F_e(s))} \quad (3.37)$$

con s la variabile di Laplace. Con l'estremo fisso in $z = 0$ abbiamo $y(s) = s(L, s)$. Si può dimostrare che zeri e poli che abbiano $\xi_i \leq 1$ stanno nel cerchio con centro $(-k_p/c_p, 0)$, mentre gli altri poli/zeri stanno sull'asse reale [4].

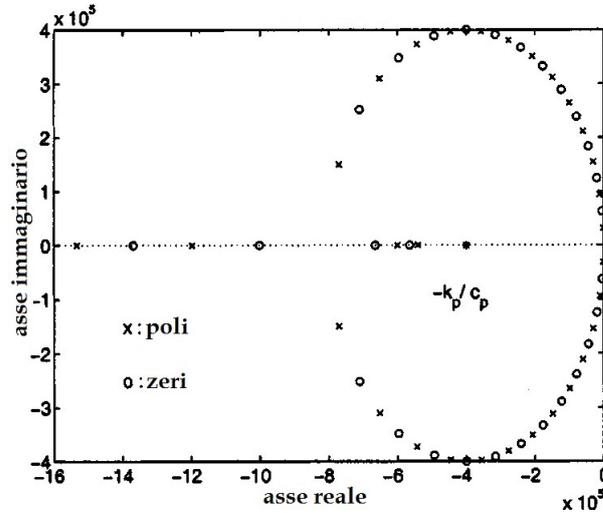


Figura 3.5: Disposizione di zeri e poli del modello meccanico di un piezoattuatore per $k_p=4 \cdot 10^7$ N/m, $c_p=1 \cdot 10^2$ kg/s, e $m_p=0.1$ kg [4].

In un diagramma di Bode di $M(s)$ (figura 3.6), poli e zeri appaiono rispettivamente come picchi di risonanza e di attenuazione. Considerando la funzione di trasferimento 3.37, il numeratore e il denominatore hanno la forma polinomiale non monica del tipo:

$$N_p(s) = \prod_{i=1}^{\infty} \left(\frac{m_p}{\mu_{2i}^2 L^2} s^2 + c_p s + k_p \right) \quad (3.38)$$

$$D_p(s) = \prod_{i=1}^{\infty} \left(\frac{m_p}{\mu_{2i-1}^2 L^2} s^2 + c_p s + k_p \right) \quad (3.39)$$

Si possono fare approssimazioni a qualsiasi ordine troncando la produttoria per un qualsiasi valore di i ma, dal momento che il sistema in questione è fisico, in ogni approssimazione il numero di poli dovrebbe eccedere quello degli zeri portando (nel caso di un solo polo in più) ad un guadagno statico della funzione

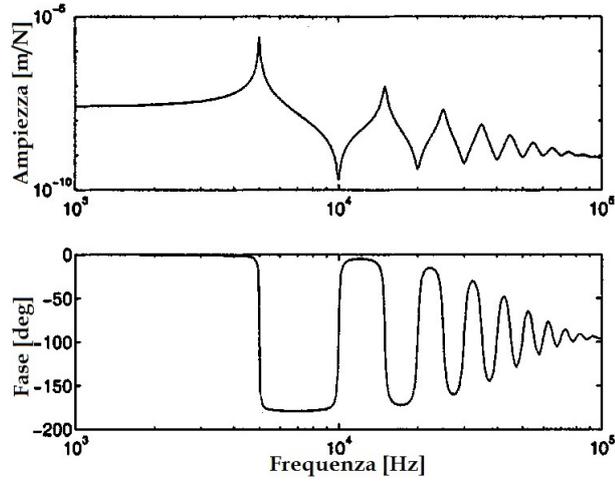


Figura 3.6: Diagramma di Bode per il piezoattuatore di figura 3.5, ma con $c_p = 10$ kg/s in modo da rendere meglio visibili i picchi [4].

di trasferimento pari a $1/k_p$. Si possono altresì ottenere modelli altrettanto validi procedendo con il metodo delle differenze finite, approssimando numericamente le derivate spaziali dell'equazione alle derivate parziali. Ad esempio la derivata seconda rispetto a z diventa:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{v_{l+1} - 2v_l + v_{l-1}}{h^2} \quad (3.40)$$

dove $v_l = v(z_l, t)$ con $z_l = lh$ per $l = 0, 1, \dots, n$ con $n = L/h$ che sostituito in 3.22 dopo qualche passaggio da:

$$nk_p(v_{l+1} - v_l) - nk_p(v_l - v_{l-1}) + nc_p(\dot{v}_{l+1} - \dot{v}_l) - nc_p(\dot{v}_l - \dot{v}_{l-1}) = \frac{m_p}{n} \ddot{v}_l \quad (3.41)$$

per $l = 1, \dots, n - 1$, mentre gli estremi vengono rappresentati con la metà della massa:

$$nk_p(v_{l+1} - v_l) + nc_p(\dot{v}_{l+1} - \dot{v}_l) - F_p + F_e = \frac{m_p}{2n} \ddot{v}_l, \quad l = 0 \quad (3.42)$$

$$-nk_p(v_l - v_{l-1}) - nc_p(\dot{v}_l - \dot{v}_{l-1}) + F_p - F_e = \frac{m_p}{2n} \ddot{v}_l, \quad l = n \quad (3.43)$$

Ciò corrisponde fisicamente ad una catena di sistemi massa-molla-smorzatore. Il vantaggio di un approccio con le differenze finite è quello di fornire un modello più flessibile rispetto alle variazioni delle condizioni di contorno, che possono essere integrate nelle equazioni per gli estremi del piezoattuatore, ovvero 3.42 e 3.43.

3.3.1 Estensione al dispositivo di posizionamento piezoattuato

Consideriamo ora che l'estremo libero del piezoattuatore ora sia fissato ad uno stadio, ovvero vi sia una forza agente sul piezoattuatore del tipo:

$$F_s = m_s \ddot{y} + c_s \dot{y} + k_s y \quad (3.44)$$

che nel dominio di Laplace può scrivere:

$$F_s = D_s(s)y(s) \quad D(s) = m_s s^2 + c_s s + k_s \quad (3.45)$$

Si può derivare facilmente la relazione tra F_p e y , che risulta essere:

$$y(s) = \frac{N_p(s)}{N_p(s)D_s(s) + D_p(s)} F_p(s) \quad (3.46)$$

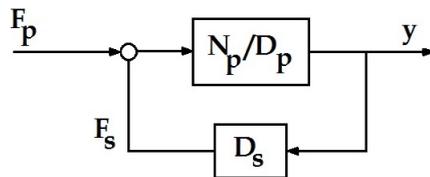


Figura 3.7: La presenza dello stadio può essere descritta anche con un diagramma a blocchi, dove rigidità, smorzamento e massa agiscono rispettivamente come retroazione di posizione, velocità e forza [9].

Si nota che il numeratore non è cambiato, vale a dire che gli zeri non cambiano al variare delle proprietà dello stadio.

Per determinare i nuovi poli consideriamo separatamente i casi in cui si ha solo rigidità, solo massa e solo smorzamento.

Nel caso di sola rigidità (figura 3.8) si ha al denominatore il polinomio $N_p(s)k_s + D_p(s)$, con i poli che coincidono con quelli originali per $k_s = 0$, mentre per $k_s \rightarrow \infty$ alcuni tendono agli zeri e gli altri vanno a infinito (in un'approssimazione uno solo va a infinito, gli altri cadono sugli zeri).

Nel caso di solo smorzamento (figura 3.9) al denominatore abbiamo $sN_p(s)c_s + D_p$, dove s può essere considerato come uno zero aggiuntivo nell'origine, al quale tende

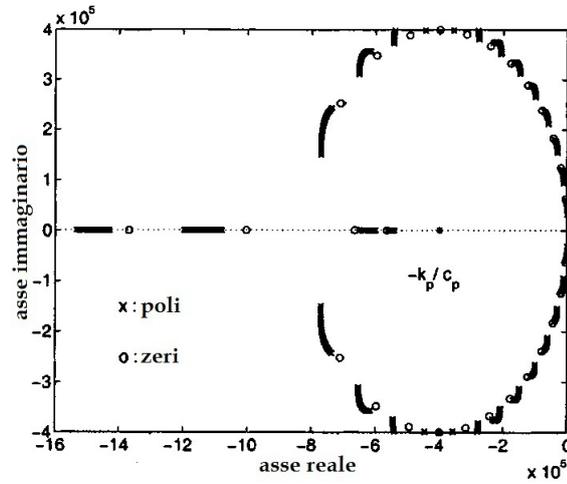


Figura 3.8: Luogo delle radici al variare della rigidità per $0 < k_s < 50k_p$ [4].

un polo per $c_s \rightarrow \infty$, perciò anche in questo caso un solo polo va a infinito.

Nel caso di sola massa (figura 3.10) al denominatore abbiamo $N_p(s)s^2m_s + D_p(s)$,

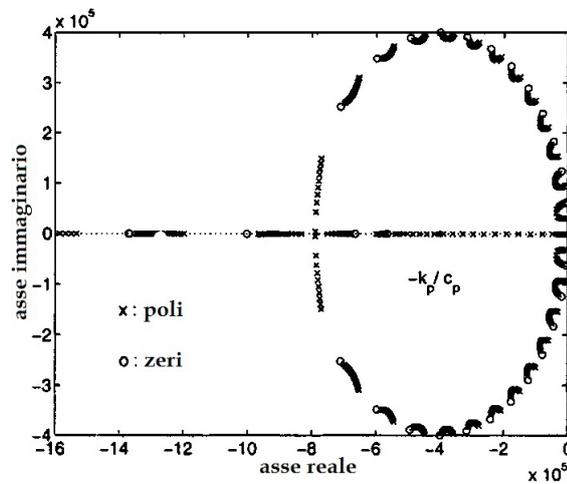


Figura 3.9: Luogo delle radici al variare dello smorzamento per $0 < c_s < 50c_p$ [4].

dove s^2 sono due zeri aggiuntivi nell'origine, cui tendono due poli all'aumentare della massa del carico.

Per m_s crescenti i poli restano nel cerchio ma si spostano significativamente e una coppia di poli si avvicina all'origine facendo diminuire la prima frequenza propria del sistema. Una prima frequenza più bassa significa anche una banda minore per il sistema, che in linea di massima significa una migliore stabilità e quindi

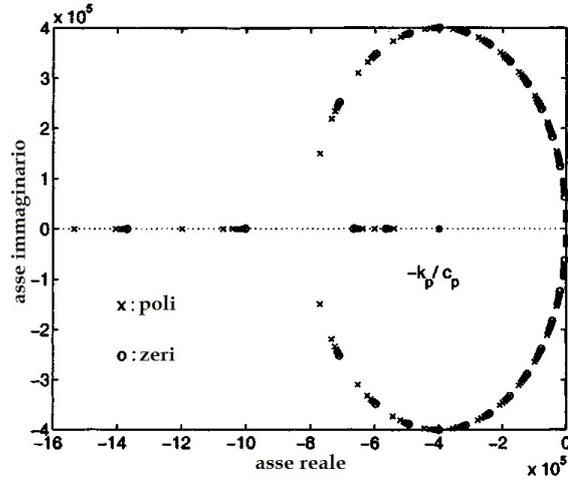


Figura 3.10: Luogo delle radici al variare della massa per $0 < m_s < 50m_p$ [4].

ha un effetto limitatamente benefico. Tipicamente la prima frequenza propria del sistema di un piezoattuatore cade nell'intervallo 5-10 kHz a causa dell'alta rigidità e della poca massa, perciò modificare k_s , grande, è meno incisivo sul comportamento del sistema rispetto modificare m , piccola. Anche lo smorzamento strutturale del piezoattuatore è molto basso e perciò aumentarlo è un altro modo di agire sulla risposta del sistema. Le simulazioni hanno mostrato che specialmente alle alte frequenze l'effetto di un aumento di m_s domina sull'effetto di c_s . In sostanza i poli tendono agli zeri immutati, ovvero avvengono cancellazioni zero-polo che non si osservano nel diagramma di Bode. L'unica cosa che si vede è la prima coppia di poli, modificabile a piacimento agendo su m_s e c_s , che è visibile come frequenza di taglio. In buona approssimazione, la relazione tra la forza dovuta a trasduzione elettrica F_p e y è data da:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_p \quad (3.47)$$

con:

$$m = \frac{m_p}{\mu_1^2 L^2} + m_s = \frac{4m_p}{\pi^2} + m_s \quad (3.48)$$

$$c = c_p + c_s \quad (3.49)$$

$$k = k_p + k_s \quad (3.50)$$

Questo modello riflette l'importanza del carico nel primo modo proprio del sistema. Ad esempio, puntiamo ad una prima frequenza propria a 1 kHz con relativo

smorzamento di $\frac{\sqrt{2}}{2}$. Consideriamo $k_s = 5 \cdot 10^6$ N/m, che con $k_p = 4 \cdot 10^7$ N/m da $k = 4.5 \cdot 10^7$ N/m. Il parametro m_s viene scelto in modo da avere la frequenza di taglio a 1 kHz, e data $m_p = 0.1$ kg segue che il valore dev'essere 1.1 kg. Inoltre, dal momento che lo smorzamento del piezoattuatore è circa $c_p = 10^2$ kg/s, vogliamo $c_s = 10^4$ kg/s. Il risultato è visibile in figura e si capisce che anche se in 10^4 Hz la cancellazione zero-polo non è perfetta, avendo progettato bene lo stadio successivo al piezoattuatore, il sistema può diventare pressoché equivalente ad un massa-molla-smorzatore, molto più semplice da trattare.

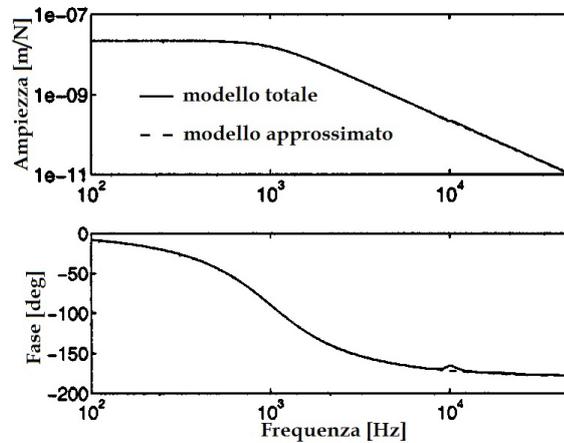


Figura 3.11: Diagramma di Bode dell'esempio proposto, dove la linea tratteggiata indica il comportamento calcolato con l'approssimazione modello meccanico del sistema di posizionamento, mentre la linea continua viene dal modello non approssimato [4].

3.4 Configurazioni di controllo in tensione e in carica

Vi sono due tipi di controllo fondamentali: quello in tensione e quello in carica. Il controllo in tensione è più semplice, ma presenta un'isteresi tra ingresso e uscita; quello in carica è più complesso, ma una volta installato non presenta alcuna isteresi [5].

3.4.1 Controllo in tensione

La relazione tra la tensione in uscita al controllore e quella ai capi del piezoattuatore è semplicemente:

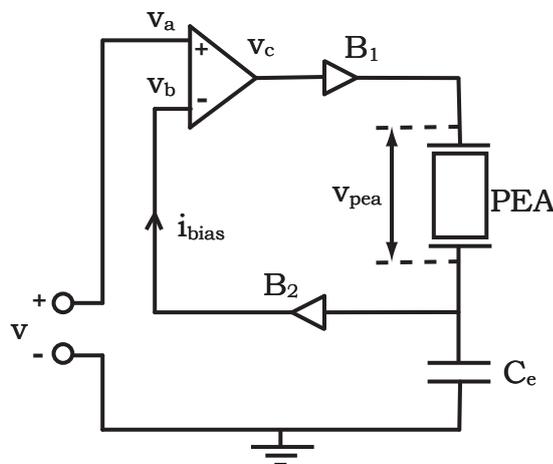
$$Bv_{max} = v_{pea,max} \quad (3.51)$$

dove B è il fattore amplificativo, che deve essere scelto in modo da consentire ad esempio in un HVPZT i 1000 V necessari per l'elongazione massima. Inoltre bisogna considerare l'impedenza del piezoattuatore, che in parte dipende dall'isteresi.

3.4.2 Controllo in carica

Una configurazione di questo tipo dev'essere progettata in modo che la carica presente nel piezoattuatore sia indipendente dalla sua impedenza, e in questo senso è assolutamente analoga ad una controllata in corrente [10]. Per realizzarlo è possibile usare un generatore di corrente, oppure in modo più diretto con un generatore di tensione, un amplificatore operazionale, una capacità esterna ed un amplificatore ad alta tensione [5]. Due apparenti svantaggi sono primo che il piezoattuatore è flottante, ovvero non connesso ad alcuna massa; la seconda è l'elevata sensibilità alle correnti di bias dell'operazionale. In ogni caso vi sono molte contromisure proposte come soluzione, in particolare in [11].

In questa sede viene considerata una configurazione base mostrata in figura a lato, dove v_a e v_b sono le tensioni in ingresso all'operazionale e v_c quella in uscita, B_1 e B_2 sono amplificatori ad alta tensione mentre C_e è la capacità esterna. Nell'analisi supponiamo l'operazionale ideale, ovvero $v_a = v_b = v$ e $i_{bias} = 0$. Sotto queste ipotesi la carica del piezoattuatore q equivale a quella su C_e ,



ovvero:

$$\frac{C_e}{B_2}v \quad (3.52)$$

Dalla 3.13 si vede che il valore massimo di v_h viene raggiunto per il massimo valore di q e perciò è dato da $v_{h,max} = (1/a)q_{max}$. Invece dalle 3.6 e 3.7 deriviamo il valore massimo di v_p in funzione di q e y : $v_{p,max} = (1/C)q_{max} - (T_{em}/C)y_{max}$, e sostituendo questi risultati in 3.4 otteniamo la tensione massima ai capi del piezoattuatore:

$$v_{pea,max} = \frac{a+C}{aC}q_{max} - \frac{T_{em}}{C}y_{max} \quad (3.53)$$

Usando la 3.52 possiamo derivare la seguente regola di progetto:

$$\frac{C_e}{B_2}v_{max} = \frac{aC}{a+C}(v_{pea,max} + \frac{T_{em}}{C}y_{max}) \quad (3.54)$$

dove a destra abbiamo solo proprietà del piezoattuatore, mentre a sinistra variabili di progetto ovvero del circuito di controllo in carica, che devono adattarsi allo specifico piezoattuatore.

La tensione sul piezoattuatore è data da $v_{pea} = B_1v_c - (1/B_2)v$, per cui la seconda regola di progetto è:

$$B_1v_{c,max} = v_{pea,max} + \frac{1}{B_2}v_{max} \quad (3.55)$$

dove a destra abbiamo proprietà del piezoattuatore e variabili di progetto calcolate con la prima regola e a sinistra abbiamo altre due variabili. Tutte le variabili devono essere scelte entro le possibilità dell'elettronica a disposizione, in modo da essere fisicamente realizzabili.

3.5 Modello totale per il controllo in carica

Di tutte le equazioni elettromeccaniche, solo le seguenti sono fondamentali nel controllo in carica: 3.6, 3.7, 3.8 e 3.47.

$$q = Cv_p + q_p \quad (3.56)$$

$$q_p = T_{em}y \quad (3.57)$$

$$F_p = T_{em}v_p \quad (3.58)$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_p \quad (3.59)$$

che con qualche passaggio diventano:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + k_o y = \beta_o q \quad (3.60)$$

con k_o e β_o sono definiti come:

$$k_o = k + \frac{T_{em}^2}{C} \quad (3.61)$$

$$\beta_o = \frac{T_{em}}{C} \quad (3.62)$$

In sintesi, passando ad un controllo in carica, è possibile evitare sia i fenomeni isteretici sia il modello a parametri distribuiti, offrendo un modello molto più semplice e più adatto a essere posto a base di un sistema di controllo.

In conclusione, in questa sezione è stato illustrato un modello elettromeccanico per il piezoattuatore, con l'utilizzo di un'equazione differenziale non lineare del primo ordine per descrivere l'isteresi e un'equazione differenziale alle derivate parziali per descrivere il comportamento meccanico. Sono state determinate analiticamente le frequenze e i modi propri, con i relativi smorzamenti. Sono stati individuati i poli e gli zeri del modello meccanico, che giacciono tutti in un cerchio di cui è stato calcolato centro e raggio; i picchi di risonanza relativi ai poli sono stati individuati nel diagramma di Bode, dove appaiono alternati ai picchi di attenuazione relativi agli zeri. Sono stati considerati complessivamente il comportamento del piezoattuatore e del sistema di posizionamento, osservando il movimento del luogo delle radici. A parte la prima coppia di poli, tutti gli altri poli tendono agli zeri (che invece restano fermi) e perciò nella funzione di trasferimento essi scompaiono attraverso cancellazioni zero-polo. Il comportamento della prima coppia di poli può essere progettato a piacimento, al punto di poter rendere l'intero sistema equivalente ad un singolo massa-molla-smorzatore. Sono state presentate entrambe le configurazioni di controllo possibili: in tensione e in carica, ed è stato mostrato come la seconda non presenti isteresi al contrario della prima. Per il controllo in carica è stato infine derivato il modello completo per un meccanismo di posizionamento piezoattuato.

Capitolo 4

Controlli e sensori

4.1 Controllo di piezoattuatori

I servo-controllori di posizione servono a eliminare le non-linearità nel comportamento delle piezoceramiche come l'isteresi o la deriva, per aumentare la rigidità e in linea di massima per incrementare la stabilità, la ripetibilità e l'accuratezza. Questi controlli in catena chiusa usano sensori di posizione dotati di precisione subnanometrica, alta linearità e banda fino a 10 kHz per confrontare l'effettiva posizione del terminale con la tensione ai capi della ceramica. In questa sezione vengono dati alcuni esempi.

Azione in avanti: fa una stima dell'errore e lo precompensa nel segnale d'ingresso al sistema.

Premodellazione del segnale: si basa su un approccio analitico nel quale viene calcolata la funzione di trasferimento del sistema, per poi trasformarla matematicamente ed applicarla come azione in avanti per ridurre l'errore di inseguimento. La risposta in frequenza e le armoniche, dipendenti dalle non-linearità dell'effetto-piezo, vengono determinate usando la Fast Fourier Transformation e i risultati vengono utilizzati per calcolare il nuovo segnale di controllo in grado di compensare le non-linearità del sistema. Questo metodo è più efficace degli approcci phaseshifting e può migliorare la banda effettiva di un fattore 10 nelle applicazioni multifrequenza, dal momento che permette di ridurre il roll-off, l'errore di fase e l'isteresi quando l'ingresso è

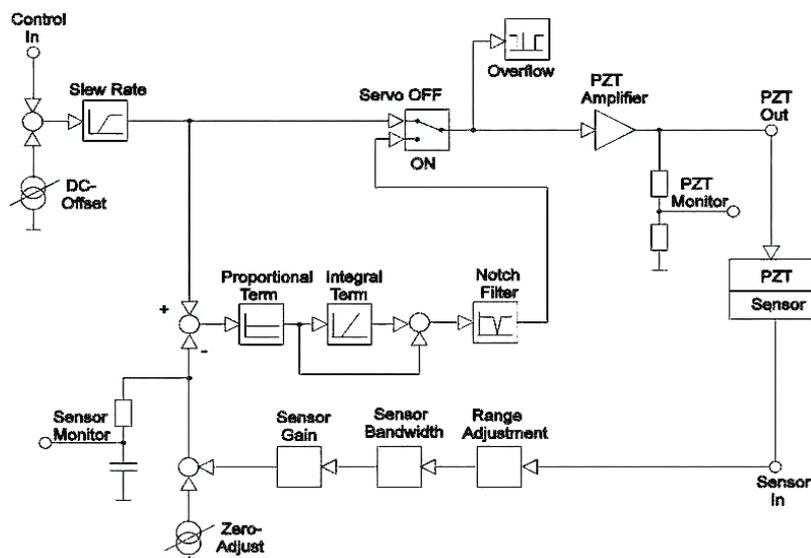


Figura 4.1: Diagramma di un tipico sistema di posizionamento in catena chiusa. Le migliori prestazioni si hanno se il sensore è montato direttamente sul terminale [1].

un segnale periodico. Il risultato è un aumento della banda, specialmente in applicazioni come la tornitura di meccaniche od ottiche di precisione.

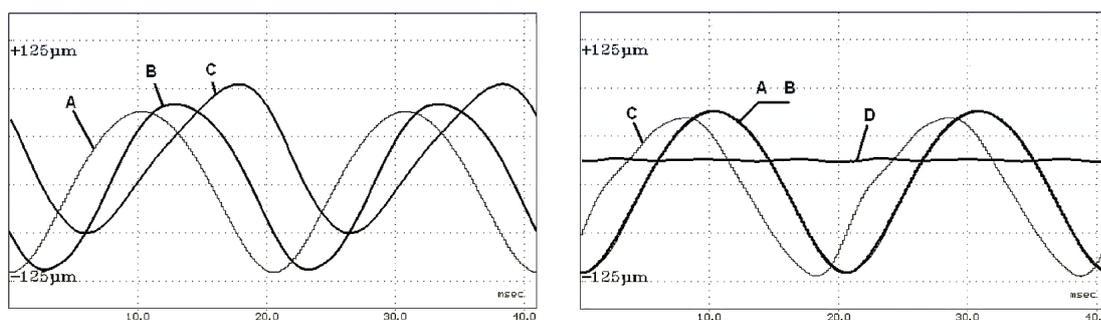


Figura 4.2: Sinistra: senza premodellazione. A: movimento voluto. B: movimento effettivo. C: errore d'inseguimento [1]. Destra: con premodellazione. A: movimento voluto. B: movimento effettivo. C: segnale d'ingresso. D: errore d'inseguimento [1].

Linearizzazione: mira a compensare l'isteresi e i fenomeni di deriva.

InputShaping: brevettata al MIT, è stata progettata per annullare qualsiasi tipo di sovraelongazione, oscillazione e risonanza sia all'interno che all'esterno di un qualsiasi sistema composto. Essa richiede di determinare tutte le frequenze di risonanza di un sistema, utilizzando un sistema apposito dotato di laser a effetto doppler (Polytec Laser Doppler Vibrometer). I dati forniti da queste misurazioni vengono processati per generare degli algoritmi di elaborazione del segnale che assicurino l'assenza di risonanza dentro e fuori dall'anello di retroazione. Tali segnali, ottimi anche per l'utilizzo in catena aperta, permettono al sistema di avere risposte al gradino pari al periodo di risonanza più grande del sistema [12].

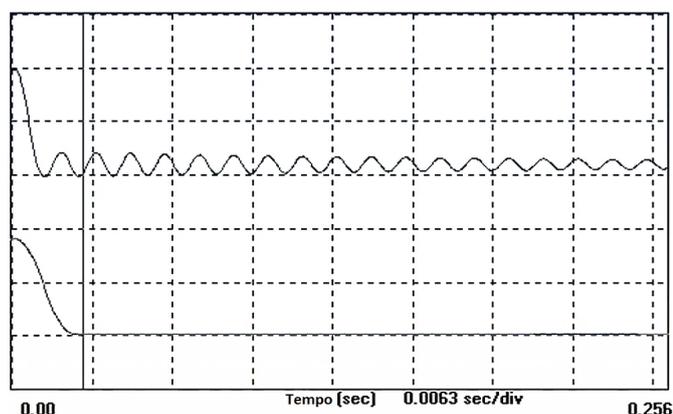


Figura 4.3: L'InputShaping elimina le risonanze indotte nei carichi e nelle componenti vicine causate dai contraccolpi dei movimenti. Sopra: il Polytec Laser Vibrometer rivela il comportamento risonante alla risposta al gradino non smorzata. Sotto: il movimento viene ripetuto con InputShaping [12].

Linearizzazione dinamica digitale (DDL): ha prestazioni simili all'InputShaping, ma è più semplice da usare. Inoltre può ottimizzare movimenti multiasse come la scansione raster o il tracciamento di un'ellisse. Questo metodo non necessita di misure esterne né di elaborazione del segnale bensì usa l'informazione sulla posizione data dai sensori capacitivi integrati nella piezomeccanica (necessita di metrologia diretta) per calcolare il segnale di controllo. Come nella premodellazione, il risultato è un miglioramento nella linearità e nell'accuratezza dell'inseguimento fino a tre ordini di grandezza.

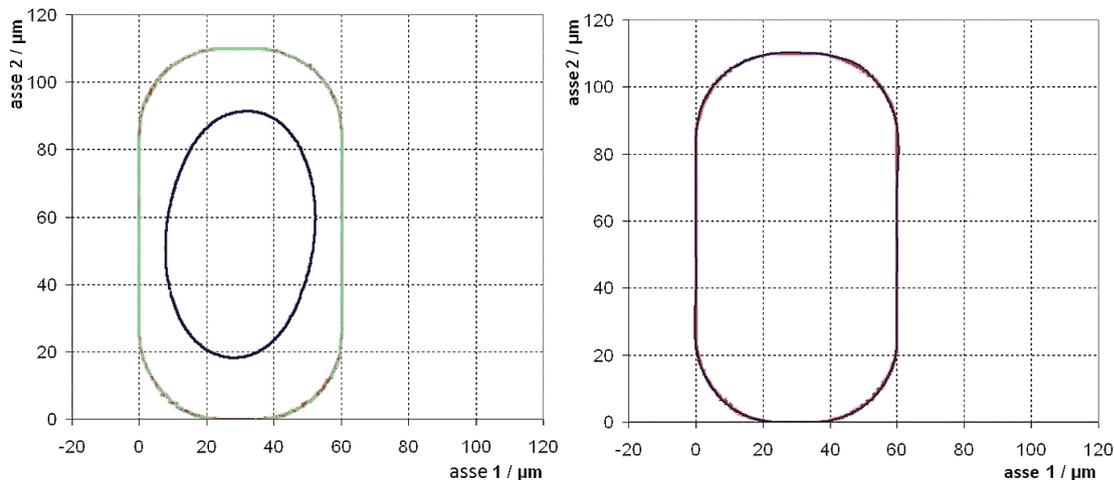


Figura 4.4: Sinistra: Scansione ellittica nella microtrapanazione laser, con uno stadio di scansione XY, usando un PID convenzionale. L'ellisse esterna descrive il bersaglio, quella interna l'effettivo movimento avvenuto. Destra: stessa scansione usando un controllore DDL. Le ellissi coincidono dal momento che l'errore è di pochi nanometri [1].

Benché la ripetibilità sia migliore nei sistemi servo-controllati, la risoluzione è migliore nei sistemi open-loop in quanto limitati solo dal rumore dell'elettronica e non dagli attriti meccanici. Ecco perché una buona elettronica è di fondamentale importanza se si vuole una risoluzione subnanometrica nei sistemi a catena chiusa, ed è per questo motivo che i sensori più utilizzati in queste applicazioni sono quelli capacitivi.

4.2 Sensori

4.2.1 Metrologie

Vi sono principalmente due metodi per determinare la posizione di un sistema: metrologia indiretta e metrologia diretta.

La metrologia **indiretta** consiste nel dedurre la posizione del terminale dalla misura della deformazione dell'attuatore o di un'altra componente del treno di comando, ma non può tener conto delle imprecisioni che sorgono tra il controllo e il terminale.

Nella metrologia **diretta** la misura viene fatta nel punto di interesse, ad esempio con un interferometro o un sensore capacitivo; essa è più accurata e quindi più adatta a quelle applicazioni in cui sia necessaria una precisione assoluta sulla misura del posizionamento o dove non possano essere tollerati ritardi di fase tra la posizione del terminale e quella misurata.

Nei sistemi di posizionamento multiasse, è necessario fare un ulteriore distinguo tra metrologia seriale e in parallelo.

Nella metrologia **parallela** tutti i sensori misurano lo stesso terminale in movimento con lo stesso riferimento, che viene assunto fermo: ciò significa che ogni movimento rimane nel suo anello di retroazione, indipendentemente dall'attuatore che l'ha causato. Può essere quindi facilmente integrata con un calcolo della cinematica in parallelo.

In quella **seriale** il riferimento di un sensore è mosso da uno o più attuatori, e dal momento che il movimento fuori asse di un qualsiasi riferimento non viene mai misurato, non può essere compensato.

4.2.2 Sensori ad alta risoluzione

Sensori a calibro di tensione

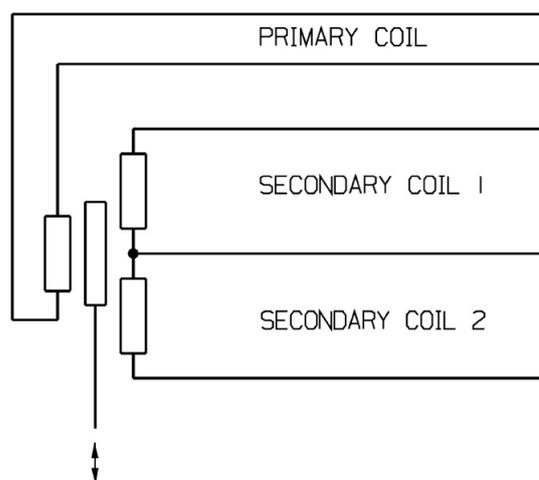
Un esempio di metrologia indiretta è data dai sensori a calibro di tensione (Strain Gauge Sensors), tipicamente scelti per applicazioni economiche. Il sensore SGS consiste in una pellicola resistiva, applicata alla barra dell'attuatore o ad un elemento guida, la cui resistenza varia quando avviene un allungamento. Solitamente vengono utilizzate quattro pellicole per formare un ponte di Wheatstone alimentato da una tensione continua (dai 5 ai 10 V), in modo che, quando avviene una variazione nella resistenza del ponte, l'elettronica del sensore traduca la corrispondente variazione nella tensione in un segnale proporzionale allo spostamento.

Un particolare tipo di SGS sono i sensori piezoresistivi, che godono di un'alta sensibilità, ma anche di scarsa linearità e bassa stabilità termica. Le principali caratteristiche degli SGS sono quindi una risoluzione sotto il nanometro (per piccole corse, fino a 15 μm) e una larghezza di banda elevata, fino a 5 kHz. Per la loro struttura hanno inoltre il vantaggio di avere un'alta resistenza al vuoto, oltre ad un'elevata compattezza.

Trasformatori lineari a variabile differenziale

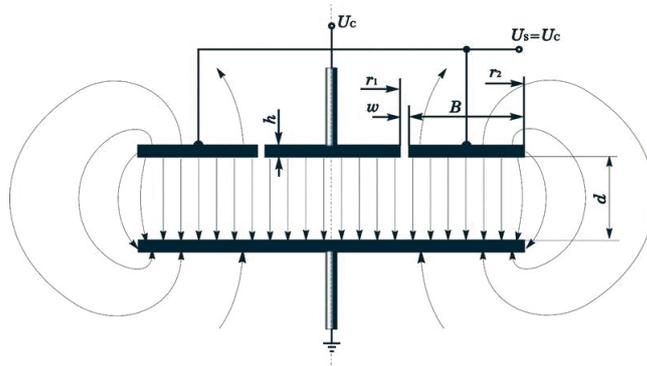
Un esempio di metrologia diretta è dato dai trasformatori lineari a variabile differenziale (Linear Variable Differential Transformers). Essi sono costituiti da un nucleo magnetico, vincolato alla parte in movimento, che determina la quantità di energia indotta dalla serpentina principale nelle due serpentine differenziali secondarie.

La frequenza della portante si aggira tipicamente 10 kHz. Le principali caratteristiche sono: una risoluzione fino a 5 nm, una larghezza di banda fino a 1 kHz e una ripetibilità fino a 5 nm [1]. Questi sensori offrono il vantaggio di controllare la posizione della parte in movimento anziché della posizione della piezo-pila. Inoltre sono economici, durevoli, hanno un'ottima stabilità termica e non hanno contatti. D'altra parte generano un campo magnetico il che li rende impronibili in certe applicazioni, per non parlare del degassamento dei materiali isolanti che limita il loro impiego in situazioni di forte vuoto.



Sensori capacitivi

I sensori capacitivi (Capacitive Position Sensors) sono i più utilizzati nelle applicazioni più esigenti. Un ponte capacitivo è costituito da due piatti eccitati a radiofrequenze: uno fisso, l'altro vincolato all'oggetto in movimento. La distanza tra i due piatti è inversamente proporzionale alla capacità e da ciò si deduce l'entità dello spostamento. Nelle piccole distanze questi sensori possono raggiungere una risoluzione dell'ordine dei picometri. Le caratteristiche sono: una risoluzione sotto lo 0.1 nm; una larghezza di banda fino a 10 kHz; una ripetibilità sotto lo 0.1 nm. Essi perciò forniscono la più alta risoluzione disponibile



in commercio. Inoltre non hanno contatti, hanno un'eccellente stabilità termica, un'ottima risposta in frequenza, non generano campi magnetici e hanno un'elevata linearità.

Capitolo 5

Sistemi di posizionamento piezoelettrici

Nel mondo dei piezoelettrici è d'uso fare una distinzione tra attuatore e motore: per attuatore si intende un sistema in cui la ceramica sia solidale al terminale; per motore si intende specificatamente un sistema in cui la ceramica movimenta un elemento intermedio, scorrevole o rotante, che a sua volta è solidale al terminale. Attualmente c'è un'ampia varietà di sistemi di posizionamento basati sull'effetto piezo inverso. Molti di questi, in particolare i motori ultrasonici, raggiungono elevate velocità e forze mantenendo allo stesso tempo l'accuratezza tipica dei motori piezoelettrici.

5.1 Piezoattuatori

5.1.1 A pila

L'elemento attivo nel posizionamento è costituito da una pila di dischi di ceramica separati da sottili elettrodi metallici. Lo spessore degli strati può essere dell'ordine dei 0.4 mm-1 mm per gli attuatori ad alta tensione, mentre sui 25 μm -100 μm per quelli a bassa tensione [13]. L'architettura a bassa tensione è quella che permette le maggiori pressioni e rigidità, e i modelli standard sviluppano fino a 100 kN. Lo spostamento è dato da:

$$\Delta L \simeq d_{33} \cdot n \cdot V \quad (5.1)$$

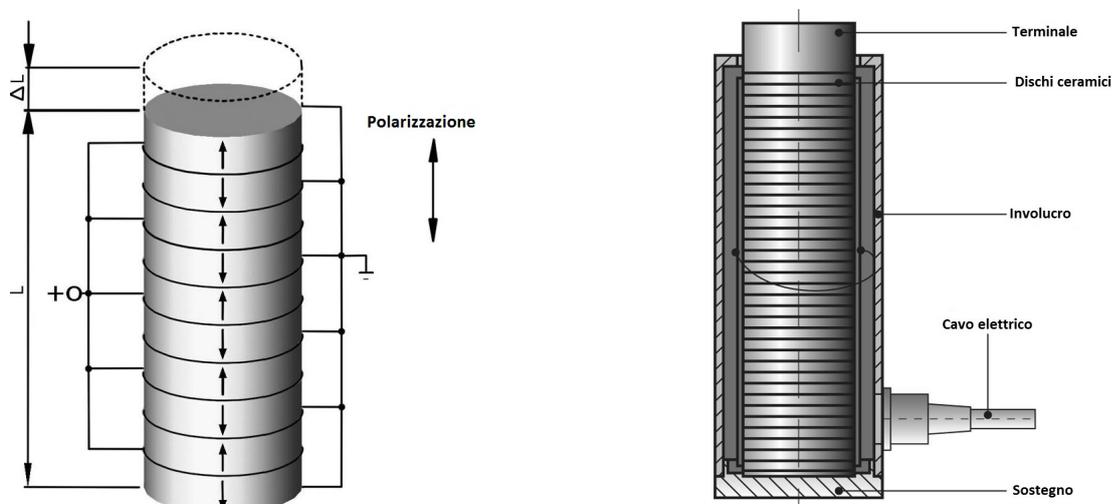


Figura 5.1: Schema elettrico (sinistra) e meccanico (destra) di un attuttore a pila [1].

dove n è il numero di strati.

5.1.2 Laminari

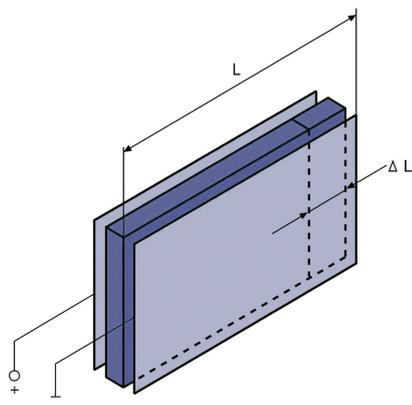


Figura 5.2: Schema di un attuttore laminare [1].

L'elemento attivo è un insieme di strisce laminari sottili di ceramica, e sfrutta la contrazione che avviene nella direzione perpendicolare alla polarizzazione: all'aumentare del voltaggio le strisce si allungano e, di conseguenza, si assottigliano. La lunghezza delle strisce determina la corsa massima, mentre il numero

determina la rigidità e la forza sviluppata:

$$\Delta L \simeq \cdot L \cdot \frac{V}{d} \quad (5.2)$$

dove d è lo spessore di una striscia e L la sua lunghezza, mentre d_{31} è negativo e in valore assoluto circa metà del d_{33} .

5.1.3 Tubolari

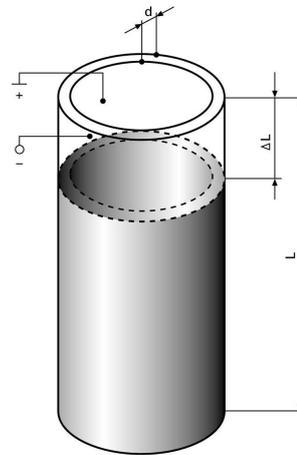


Figura 5.3: Schema di un attuatore tubolare [1].

Un altro tipo è dato dalla struttura a tubo monolitico, argentato sia dentro che fuori, che sfrutta un effetto piezo trasversale. Quando viene applicata una tensione inversa tra il diametro interno e quello esterno di un tubo dalle pareti sottili, tale tubo si contrae assialmente e radialmente. La contrazione assiale è stimata da:

$$\Delta L \simeq d_{31} \cdot L \cdot \frac{V}{d} \quad (5.3)$$

dove L è la lunghezza del tubo, e d lo spessore della parete; l'espansione radiale è data dall'aumento dello spessore della parete e dalla contrazione tangenziale:

$$\frac{\delta r}{r} \simeq d_{31} \frac{U}{d} \quad (5.4)$$

con r il raggio del tubo, e

$$\Delta d \simeq d_{33} V \quad (5.5)$$

Se l'elettrodo esterno viene separato in quattro elementi posti a 90°C , applicando una differenza di potenziale ai capi di due elettrodi opposti si otterrà una deformazione in una sola direzione. Questa caratteristica viene sfruttata nella scansione a tunnel per la capacità di deformarsi nelle direzioni x e y , dove il raggio di scansione è dato da:

$$\Delta x \simeq \frac{2\sqrt{2} \cdot d_{31} L^2 \cdot U}{\pi \cdot D_i \cdot d} \quad (5.6)$$

dove D_i è il diametro interno. Questi attuatori non possono sviluppare grandi forze, e vengono generalmente usati per microdosaggio, pompaggio nanolitrico, microscopia a scansione, stampa a getto d'inchiostro.

5.1.4 Flessibili a struttura bimorfa e multimorfa

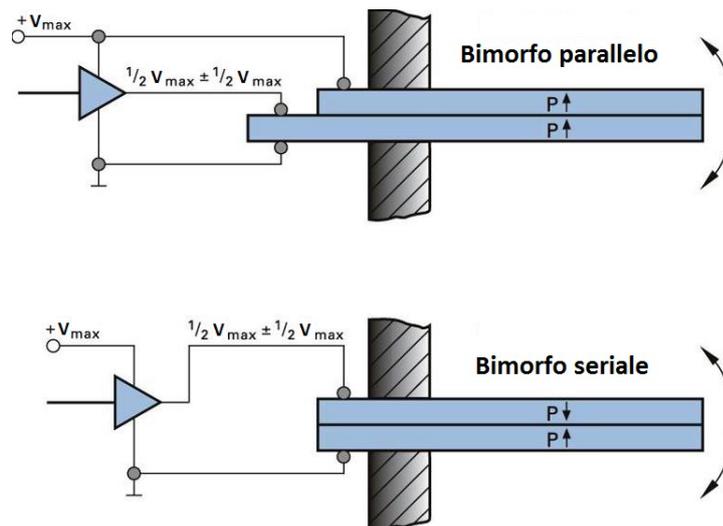


Figura 5.4: Schema di attuatori flessibili nelle due tipologie: seriale e parallelo [1].

Un attuatore flessibile bimorfo consiste in uno strato di metallo passivo, cui viene incollata una striscia di piezoceramica. La striscia risultante reagisce alle variazioni di tensione elettrica come un termostato reagisce alla temperatura. Questo tipo di soluzione è disponibile anche in forma di disco bimorfo, che reagisce alla tensione applicata inarcandosi.

Esistono due versioni in cui entrambi gli strati sono ceramici, che vengono fatti

funzionare in modo opposto (quando uno si espande, l'altro si contrae), quella seriale e quella parallela. In quella parallela le placche sono isolate e sono tutte polarizzate allo stesso modo, di conseguenza ognuna dev'essere attivata coi propri elettrodi. Nella versione seriale le placche vengono polarizzate in senso opposto e vengono attivate con due soli elettrodi, che però implica tensioni maggiori.

5.1.5 A taglio

Gli attuatori a taglio possono generare grandi forze e ampi spostamenti. Inoltre per loro natura sono perfetti per un funzionamento bipolare, con posizione intermedia corrispondente a una tensione di 0 V. Il campo elettrico, contrariamente agli altri attuatori, viene applicato perpendicolarmente alla polarizzazione, e il corrispondente coefficiente d_{15} ha valori fino a 1100 pm/V, fornendo uno spostamento doppio rispetto ad attuatori lineari delle stesse dimensioni.

5.2 Leve amplificatrici di movimento

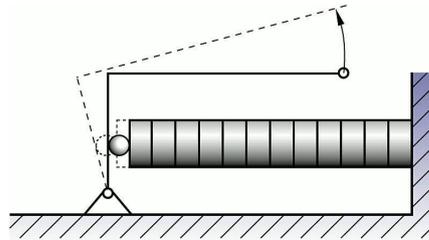


Figura 5.5: Una semplice leva amplificatrice di movimento [1].

Nei sistemi possono essere integrate leve amplificatrici di movimento, capaci di aumentare la corsa pur mantenendo una precisione subnanometrica. Queste leve devono essere estremamente rigide e prive di attriti o giochi, perciò le ideali sono le leve flessibili. Queste infatti sono molto compatte e non aumentano visibilmente la capacità dell'attuatore (e quindi la corrente di controllo), però aumentano l'elasticità del sistema abbassando la prima frequenza di risonanza. Le seguenti relazioni descrivono le caratteristiche di un sistema amplificato a leva:

La costante elastica

$$k_{sis} = \frac{k_0}{r^2} \quad (5.7)$$

Lo spostamento

$$\Delta L_{sis} = \Delta L_0 \cdot r \quad (5.8)$$

La frequenza di risonanza del sistema amplificato

$$f_{ris-sis} = \frac{f_{ris-0}}{r} \quad (5.9)$$

dove r è il rapporto di trasmissione, mentre ΔL_0 , k_0 e f_{ris-0} sono rispettivamente lo spostamento, la costante elastica e la frequenza di risonanza del sistema non amplificato, costituito dal piezoelettrico più le giunzioni.

5.3 Motori piezoelettrici

Nonostante vengano usate leve amplificatrici di movimento, la corsa massima in un semplice attuatore rimane molto piccola, limitata dalla massima deformazione possibile della ceramica. Per risolvere il problema sono stati ideati i motori stepper e gli ultrasonici, che trasformano lo spostamento limitato dell'elemento piezoceramico nel movimento illimitato, rotatorio o lineare, di un rotore o di un elemento scorrevole attraverso accoppiamenti ad attrito intermittente.

I motori piezoelettrici stepper, detti anche quasi-statici in quanto operano ben al di sotto delle loro frequenze di risonanza, si basano su due principi di funzionamento: inerziale e a bloccaggio.

In un motore ultrasonico la ceramica viene messa in risonanza e fatta oscillare per indurre il movimento nella parte mobile. L'amplificazione dovuta alla risonanza permette in questo tipo di motori di abbassare la tensione di controllo, rendendo il moto più efficiente. Le frequenze operative vanno dai 20 kHz ai 10MHz, mentre le ampiezze delle oscillazioni dai 20 ai 200 nm. Vi sono due sottogruppi principali: ad onda stazionaria e ad onda dinamica.

5.3.1 Motori stepper a bloccaggio

Nei motori a bloccaggio, il rotore o lo scorrevole vengono passati "di mano in mano" tra due elementi bloccanti. In un istante temporale generico, un elemento

si sta muovendo nella direzione del moto trascinando l'elemento mobile, mentre l'altro è sbloccato e si muove nella direzione opposta, preparandosi ad agganciare nuovamente lo statore o scorrevole che sia. I primi modelli di questo tipo erano gli Inchworm della Burleigh Instruments [14], proposti nel 1974. In figura 5.6 vediamo il principio di funzionamento di un Inchworm. Il moto viene prodotto attraverso l'attivazione in sequenza di tre attuatori: i due esterni servono a bloccare lo scorrevole, mentre quello centrale cambia la distanza tra di essi, imprimendo di fatto il movimento. La figura 5.7 mostra un altro motore che

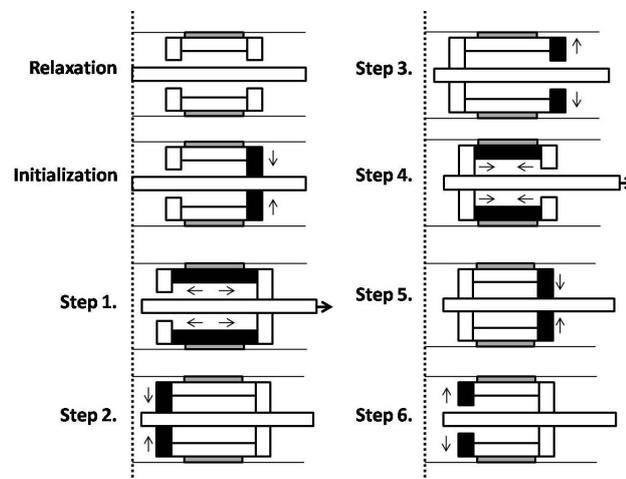


Figura 5.6: Schema di funzionamento di un Inchworm, in sei passi [14].



Figura 5.7: Schema di camminata di un PiezoWalk.

usa lo stesso principio, il Piezo Walk Drive. Questo motore consiste in un certo numero di elementi bimorfi premuti contro lo scorrevole, le cui piastre (isolate e controllate in modo indipendente) vengono eccitate con onde sinusoidali sfasate di 90° producendo negli estremi dei bimorfi un movimento ellittico che muove lo scorrevole. La direzione del moto dipende dal segno dello sfasamento.

5.3.2 Motori stepper inerziali

Nei motori inerziali viene sfruttata l'inerzia e la differenza tra i coefficienti d'attrito statico e dinamico. Quando l'attuatore si muove solidale allo scorrevole lo fa lentamente e non vi è slittamento. Nella fase successiva l'attuatore torna indietro ad una velocità tale che lo scorrevole, a causa della propria inerzia, non riesce a seguirlo e vi è slittamento. Il motore di Konica Minolta [15] di figura 5.8 sfrutta il principio inerziale: un'asta metallica sottile viene attaccata all'attuatore, e la parte mobile è bloccata dall'attrito con l'asta. Quando l'attuatore si espande o si contrae a basse accelerazioni la parte mobile la segue, sospinta dall'attrito; quando lo fa con elevate accelerazioni la parte mobile scivola sull'asta.

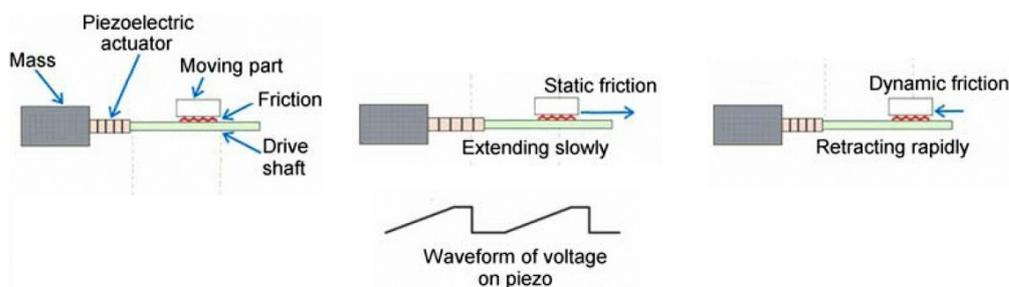


Figura 5.8: Schema di funzionamento di un motore inerziale Konica Minolta. In figura si vede anche la forma d'onda in ingresso al piezoattuatore, dove la parte a pendenza lieve è quella che imprime il movimento, mentre il gradino non imprime movimento [15].

5.3.3 Motori ultrasonici ad onda dinamica

Nei motori ad onda dinamica tale onda è il risultato della sovrapposizione di più onde stazionarie, che portano i punti sulla superficie di contatto tra statore e rotore a percorrere traiettorie ellittiche. L'esistenza di tali onde necessita di un continuo spaziale per traslarsi indefinitamente, perciò gli statori sono sempre a simmetria circolare, che siano dischi, cilindri cavi o anelli. Un esempio è l'USR30 Shinsei [16], o l'equivalente RPA della Cedrat Technologies [17]. In questi motori le traiettorie ellittiche dei punti di contatto sulla superficie d'attrito vengono prodotte da un'onda dinamica che percorre la superficie dello statore, che a

sua volta si comporta come un anello elastico. La parte superiore dello statore non è liscia, bensì costellata di “dentini”, che aumentano l’attrito e amplificano il movimento. Il risultato è una relazione tra coppia e velocità simile a quella dei motori a corrente continua, con grandi coppie di stallo e coppia nulla alla velocità massima. I piezoelettrici però manifestano con una coppia fino a dieci volte superiore rispetto a motori dello stesso volume, con pochissima inerzia e alta controllabilità. Possono arrivare a pesare anche solo 6-8 g, con rapporti potenza erogata peso di 225 W/kg e coppia-massa di 70 Nm/kg [18].

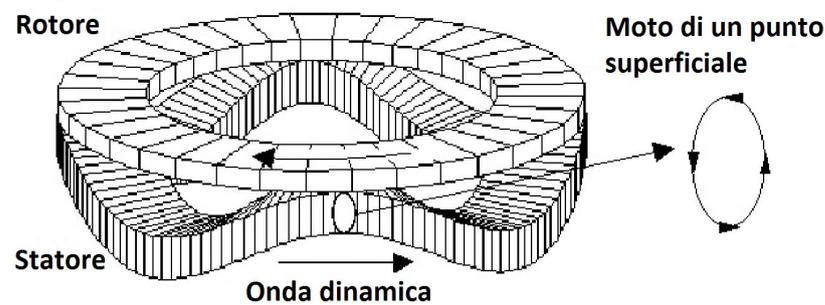
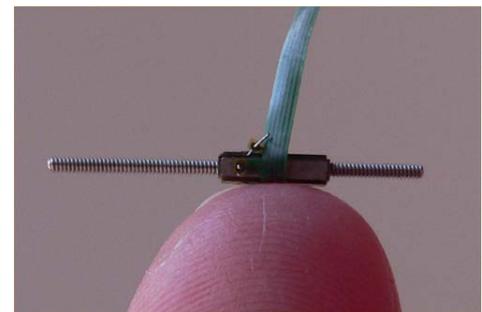


Figura 5.9: Principio di funzionamento di un motore rotativo ad onda dinamica trasversale [19].

5.3.4 Motori ultrasonici ad onda stazionaria

I motori ad onda stazionaria invece si basano su microimpulsi, che vengono diretti ad una certa angolazione rispetto alla superficie del rotore. Un esempio di motore è lo SQUIGGLE, in figura 5.10. Le piastre di ceramica sono incollate alle superfici esterne della madre vite metallica, a 90° tra loro.



Piastre opposte vengono polarizzate in sensi d_{31} radialmente opposti, in modo da poterle controllare tutte e quattro con due sole onde. La tensione meccanica flette la madre vite che viene fatta oscillare alla sua prima frequenza risonante, che trasmette il moto grazie all’attrito tra metalli. Il moto è paragonabile a quello dell’hula hoop, ottenuto facendo vibrare

le piastre con uno sfasamento di 90° . Le frequenze sono dell'ordine dei 40-200 kHz, le tensioni in ingresso dell'ordine dei 20-200 V a seconda dei modelli e delle dimensioni.

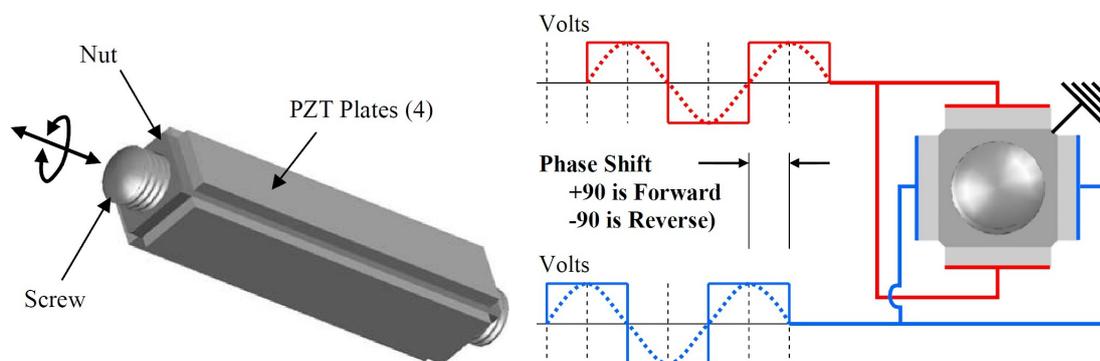


Figura 5.10: Squiggle schematizzato (sinistra); forme d'onda di controllo (destra).

Ciò che sorprende è la miniaturizzazione di tale tipo di motori, che non può essere uguagliata da nessuno stepper ne motore elettromagnetico convenzionale. Perfino confrontato con altri motori piezoelettrici, risulta che nella metà dello spazio sviluppa forze dieci volte superiori a una risoluzione comunque superiore. Tali caratteristiche lo rendono il motore perfetto per molte applicazioni quali gli zoom e gli autofocus nei telefonini, o nei dispositivi medicali impiantabili [20]. Un datasheet dettagliato è dato in Appendice C.

5.4 Confronto col motore elettrico

In questa sezione verranno effettuati alcuni confronti tra motori elettrici e piezoelettrici usando come riferimento la coppia o la forza erogata, prese come riferimento.

5.4.1 Rotativi

Confrontiamo un motore brushless in corrente continua della Portescap con un PiezoLegs rotativo: sebbene i due motori presi in considerazione forniscano una coppia massima simile, il motore piezoelettrico, anche se molto più lento (ma anche molto più preciso e quindi non necessita di motoriduttori che aumentino



Figura 5.11: PiezoMotor LEGS-R01S-12 (sinistra) [21]; Portescap B1118-050 (destra) [22].

Specifiche	LEGS-R01S-12	B1118-050	Unità
Casa	PiezoMotor	Portescap	
Vel max	20	24272	rpm
Coppia di picco	80	103	mNm
Coppia max cont	80	13.4	mNm
Dimensioni	32x23	70x28	mm
Volt max	42	50	VDC

la risoluzione), è un quarto di quello standard, e fornisce otto volte più coppia continua.

Confrontiamo un ultrasonico della PiezoMotor con un motore a spazzole della Portescap. L'ultrasonico può operare anche in modalità stepper, con passi di 5

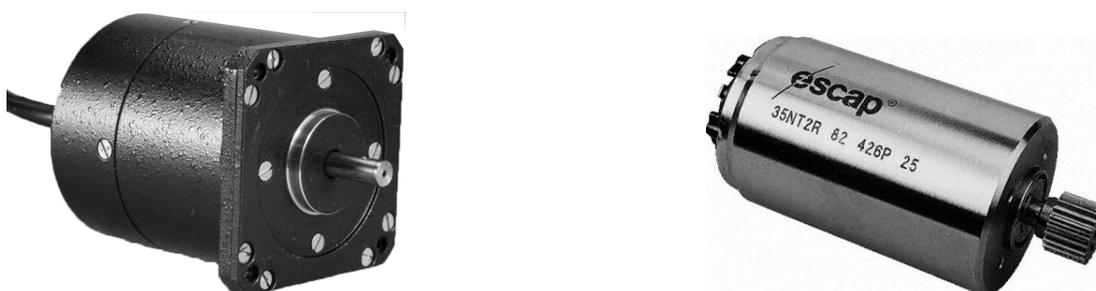


Figura 5.12: PiezoMotor PM-20R (sinistra) [21]; Portescap 35NT2R82-426P (destra) [22].

μrad , opera fino a 4 kHz assorbendo una corrente inferiore ai 400 mA. L'elettrico

Specifiche	PM-20R	-426P	Unità
Casa	PiezoMotor	Portescap	
Vel max	60	6700	rpm
Coppia di picco	100	538	mNm
Coppia max cont	100	90	mNm
Peso	100	310	g
Dimensioni	38x45	57x35	mm
Volt max	12	18	VDC

ha a suo vantaggio una velocità infinitamente maggiore e una coppia di stallo cinque volte superiore, ma non può competere con l'efficienza dell'ultrasonico.

5.4.2 Lineari

Prendiamo in considerazione due motori lineari: un Nexline della Physik Instrumente (con funzionamento di tipo PiezoWalk) e un Servotube della Copley Controls.



Figura 5.13: PI N-111 (sinistra) [1]; Copley Controls STB2504S (destra) [23].

La risoluzione è fornita in catena aperta per il Nexline, mentre è data da un sensore di posizione esterno al sistema per il Servotube. Anche qui si nota come la stessa forza massima continua si possa ottenere con un motore piezoelettrico più piccolo, più efficiente e più preciso, a scapito di sacrificare corsa e velocità.

Specifiche	N-111	STB2504S	Unità
Casa	PI	Copley Controls	
Vel max	1	8700	mm/s
Forza di picco	50	312	N
Forza max cont	50	42.5	N
Dimensioni	48x28x50	68x54x160	mm
Volt max	250	350	VDC
Risoluzione	0.025	12000	nm
Corsa	10	1200	mm
Massa	245	1400	g

5.5 Applicazioni

Ecco alcuni esempi di applicazioni dei motori e degli attuatori piezoelettrici:

- Industria dei semiconduttori, dove si richiede alta risoluzione, corse di alcuni millimetri, stabilità, durezza, rigidità e lavoro in presenza di vuoto, elio o campi magnetici.
- Ottica, dove la risposta rapida e la risoluzione sono necessarie per creare immagini ad alta qualità. In microscopia i motori vengono usati per posizionare le lenti, mentre in telescopia la risoluzione è limitata dalla turbolenza atmosferica e dalle vibrazioni, eliminabili grazie a sistemi di stabilizzazione basati su specchi secondari guidati da motori piezoelettrici, che permettono di allineare l'immagine in tempo reale. Per gli stessi motivi e per la loro compattezza vengono usati negli autofocus della maggior parte dei telefonini e nei dispositivi portatili in generale.
- Biotecnologie e Medicina, dove vengono usati per maneggiare e ordinare cellule nei laboratori o in micropompe in grado di emettere singoli nanolitri; l'elevato rendimento, la durabilità e soprattutto le dimensioni contenute li rendono indicati per la realizzazione di protesi e impianti.

- Tecnologie di immagazzinamento dati, dove le elevate precisioni e velocità vengono sfruttate in stampa, assemblaggio e fabbricazione, nonché nel testing e misurazione dei sistemi di immagazzinamento dati ad alta densità.
- Tecnologie aerospaziali, dove vengono usati per la loro capacità di funzionare in ambienti particolari di vuoto, basse temperature o elevate radiazioni e per la poca potenza richiesta nelle applicazioni quasi statiche, come le ottiche dei satelliti.
- Lavorazioni di precisione, dove vengono usati per il posizionamento del pezzo o dello strumento nella produzione di ottiche, cuscinetti, cilindri e pistoni e nelle delicate lavorazioni del diamante.
- Telecomunicazioni, dove vengono usati per l'allineamento automatico delle fibre ottiche.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi ci si è concentrati sull'attuatore piezoelettrico, considerato sia come sistema autonomo che integrato in un sistema di posizionamento. Si è visto che uno dei principali svantaggi nel suo utilizzo derivi dall'alta non-linearità nel comportamento ingresso uscita, che si manifesta attraverso un fenomeno di isteresi. Altresì è stato dimostrato come tale non-linearità scompaia se viene utilizzato un controllo in carica, certamente meno usuale e più costoso, del quale è stato dato il modello completo e una possibile realizzazione. Sono stati descritti i principali motori in commercio, è stato fatto un confronto col motore elettrico e sono stati dati esempi di applicazioni attuali.

Osservando le attuali applicazioni si nota che i campi sono quelli all'avanguardia della tecnologia. Ma sempre più spesso i motori trovano utilizzo in campi più tradizionali dell'automazione industriale, dove si attende ancora un abbassamento dei prezzi e deve ancora svilupparsi una migliore familiarità col prodotto. Gli attuatori piezoelettrici offrono ottime soluzioni per operazioni di posizionamento che richiedano massima precisione e risoluzione con minimo tempo di risposta, ma sono carenti per quel che riguarda le velocità massime e, in alcuni casi, le corse.

L'implacabile spinta per maggiore accuratezza e rapidità, che sia per la miniaturizzazione della microelettronica, per la produzione di ottiche di precisione o di memorie più performanti, per il posizionamento di fibre ottiche per le telecomunicazioni o nella costruzione di micromeccanismi, sta portando sempre più avanti lo sviluppo delle piezotecnologie, perciò non è un azzardo supporre che i motori piezoelettrici in futuro in parte rimpiazzeranno, in parte completeranno le tecnologie di movimentazione convenzionali. Essi amplieranno il regno del

possibile, e saranno il motore dello sviluppo in aree come le nanotecnologie, che sarebbero impensabili con le tecnologie convenzionali.

Appendice A

Glossario

A.1 Glossario di riferimento

- **ACCURATEZZA** - *accuracy*
Massima differenza tra la posizione comandata, ideale, e quella effettivamente raggiunta.
- **ATTUATORE** - *actuator*
Dispositivo in grado di attuare spostamenti o sviluppare forze.
- **CERAMICA** - *ceramic*
Materiale inorganico policristallino.
- **CINEMATICA IN PARALLELO** - *parallel kinematics*
Tutti gli attuatori agiscono sulla stessa piattaforma.
- **CINEMATICA IN SERIE** - *serial kinematics*
Ogni attuatore agisce sulla propria piattaforma, con una netta separazione degli assi di movimento.
- **CONTROLLO DELLA TRAIETTORIA** - *trajectory control*
Insieme di provvedimenti atti a prevenire la deviazione da una traiettoria specifica.
- **DERIVA** - *creep/drift*
Variazione indesiderata della posizione nel tempo.

- **DOMINIO DI WEISS** - *Weiss domain*
Regione nella quale i dipoli elettrici (o magnetici) sono orientati nella stessa direzione.
- **FORZA DI STALLO** - *blocked force*
Massima forza sviluppabile da un attuatore se bloccato da un vincolo infinitamente rigido.
- **FUNZIONAMENTO IN CATENA APERTA** - *open-loop operation*
Funzionamento nel quale non vengono usati sensori di posizione, dove lo spostamento dipende in larga parte dalla tensione applicata ma viene influenzato da fenomeni non lineari.
- **FUNZIONAMENTO IN CATENA CHIUSA** - *closed-loop operation*
Funzionamento nel quale il movimento dell'attuatore viene corretto tramite un anello di retroazione.
- **GIOCO NELL'ACCOPPIAMENTO** - *backlash*
Errore di posizionamento che appare nelle inversioni di direzione, causato da imperfezioni e attriti nelle giunzioni.
- **ISTERESI** - *hysteresis*
Errore di posizionamento che appare nelle inversioni di direzione, causato dall'attrito nel rilassamento delle forze elastiche del treno di controllo.
- **LVPZT** - *lvpzt*
Acronimo per attuatore a bassa tensione (low-voltage PZT).
- **MATERIALE PIEZOELETTRICO** - *piezoelectric material*
Materiale che cambia dimensioni quando ci viene applicato un campo elettrico e viceversa produce carica quando posto sotto pressione.
- **METROLOGIA IN PARALLELO** - *parallel metrology*
Tutti i sensori misurano la posizione della stessa piattaforma, ognuno nel proprio grado di libertà.

- **METROLOGIA IN SERIE** - *serial metrology*
Ogni sensore è inserito nell'anello di retroazione riferito ad un grado di libertà diverso.
- **MODULO DI YOUNG** - *elasticity modulus*
Coefficiente che descrive l'elasticità di un materiale in proporzione alle sue proprietà geometriche.
- **POLARIZZAZIONE** - *poling*
Procedura con la quale si allineano le celle della struttura cristallina di una piezoceramica.
- **PZT**
Acronimo per lo zirconato-titanato di piombo, la piezoceramica più diffusa; per estensione è riferito spesso anche agli attuatori.
- **RIGIDITÀ** - *stiffness*
Costante elastica.
- **RIPETIBILITÀ** - *repeatability*
Precisione nel tornare a una data posizione.
- **RISOLUZIONE** - *minimum incremental motion*
Minimo spostamento che può essere eseguito ripetutamente per un dato ingresso.
- **ROLL-OFF**
Nel diagramma di Bode, ripida pendenza nel grafico dell'ampiezza.
- **TEMPERATURA DI CURIE** - *Curie temperature*
Temperatura alla quale la struttura cristallina cambia la sua simmetria da piezoelettrica a non piezoelettrica.
- **TRASDUZIONE** - *transduction*
Fenomeno di trasformazione da un tipo di energia ad un altro.
- **TRASLATORE** - *translator*
Attuatore lineare.

A.2 Chiavi di ricerca

Inglese	Italiano
piezo-effect	effetto piezo
piezoactuator	attuatore piezoelettrico
nanopositioning	nanoposizionamento
micropositioning	microposizionamento
PZT	piezoceramica
piezoelectricity	piezoelettricità

Appendice B

Ceramiche PMN

Gli attuatori elettrostrittivi non usano le ceramiche PZT convenzionali, bensì un materiale ceramico non polarizzato: il niobato di piombo e magnesio (PMN). Questo tipo di ceramica ai piccoli segnali si espande proporzionalmente al quadrato della tensione applicata, infatti benché le celle della struttura cristallina siano a simmetria centrale, in presenza di un campo elettrico gli ioni positivi e quelli negativi si separano, risultando in una deformazione del materiale. Ciò le rende più resistenti alle forze di trazione di quanto non lo siano le PZT, e in un limitato intervallo di temperature hanno anche molta meno isteresi. È vero però che hanno anche meno stabilità alle variazioni di temperatura e capacità elettrica molto maggiore, per non parlare della non-linearità intrinseca, in netto contrasto con la linearità delle PZT.

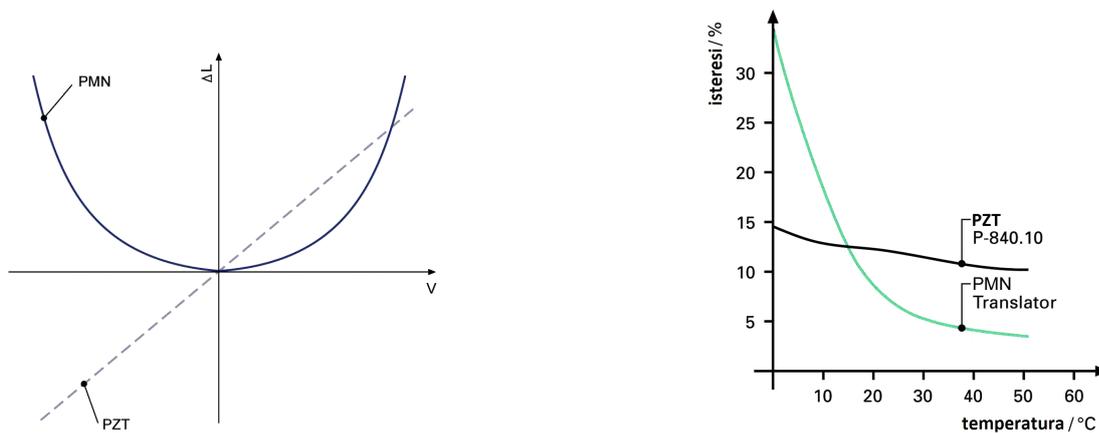


Figura B.1: PMN e PZT a confronto: spostamento in funzione del campo elettrico (sinistra) e isteresi in funzione della temperatura (destra) [1].

Appendice C

SQL-RV-1.8 and Controls Minimum Specifications	
Travel Range	6 mm (call for custom)
Housing Dimensions	2.8 x 2.8 x 6 mm
Stator Dimensions	1.8 x 1.8 x 6 mm
Stall Force (4.5V input)	50 gram force // 0.5 N (55 gram force // 0.55N typical)
Speed (at 15 gram load)	> 7 mm/s (10 mm/sec typical)
Resolution	0.5 μ m
Input Power (stopped)	OFF POWER HOLD (0 mW)
Input Power to motor driver (moving) *	< 340 mW (direct drive)
Input Power to controller components (moving)*	< 1 mW (MC-33DB-RV) ~330 mW (MC-33MB controller)
Lifetime **	>1 Million cycles
Operating Temperature	-30 to +80° C
Storage Temperature	-40 to +85° C
Shock Resistance ***	2500 Gs
Operating Frequency	~ 171 KHz
Motor Controller	MC-3300-RV (Controller for 2 Motors) ↳ MC-33DB-RV (one per) ↳ NSD-2101 Driver IC (qty 2)
Weight	0.16 grams

* Power depends on input voltage, speed & load. Shown at 15g load. Measured at 2.8V, 7mm/sec

** Continuous operation at full speed, room temperature, 15 gram force load.

*** Motor Only - zero mass load.

Figura C.1: Datasheet di Squiggle SQL-RV-1.8. Notare gli 0.5 N sviluppati in 3 mm di diametro.

Bibliografia

- [1] PI, *Piezo Nano Positioning*, 1 2009.
- [2] “Piezo life time test report for international linear collider superconducting cavities,” Physik Instrumente, Karlsruhe, Report, 2005.
- [3] P. Pertsch, S. Richter, D. Kopsch, N. Kramer, J. Pogodzik, and E. Hennig, “Reliability of piezoelectric multilayer actuators,” in *10th International Conference on New Actuators*, Bremen, Germany, 2006.
- [4] H. J. M. T. A. Adriaens, W. L. de Koning, and R. Banning, “Modeling piezoelectric actuators,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 5, no. 4, pp. 331–341, 2000.
- [5] R. H. Comstock, “Charge control of piezoelectric actuators to reduce hysteresis effects,” *US Patent*, no. 4263527, 1981.
- [6] M. Goldfarb and N. Celanovic, “Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 17, pp. 69–79, 1994.
- [7] R. Banning, W. L. de Koning, J. M. T. A. Adriaens, and K. R. Koops, “State-space analysis and identification for a class of hysteretic systems.”
- [8] D. Croft, D. McAllister, and S. Devasia, “High-speed scanning of piezo-probes for nano-fabrication,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 120, pp. 617–622, 1998.

-
- [9] W. L. de Koning, J. M. T. A. Adriaens, and R. Banning, "Physical modeling of piezoelectric actuators for control purposes," in *IFAC Motion Control Workshop*, 1998, pp. 37–42.
- [10] C. V. Newcomb and I. Flinn, "Improving the linearity of piezoelectric ceramic actuators," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 18, pp. 442–444, 1982.
- [11] K. Takata, M. Okumura, S. Fukuhara, T. Morimura, S. Hosaka, and S. Hosoki, "Piezoelectric actuator control apparatus," *US Patent*, no. 4841191, 1989.
- [12] <http://www.convolve.com>.
- [13] A. Heinzmann, E. Hennig, B. Kolle, D. Kopsch, S. Richter, H. Schwotzer, and E. Wehrsdorfer, "Properties of pzt multilayer actuators," in *8th International Conference on New Actuators*, Bremen, Germany, 2002.
- [14] W. G. May, "Piezoelectric electromechanical translation apparatus," *U.S. Patent*, no. 3902084, 1975.
- [15] <http://konicaminolta.com/research>.
- [16] T. Sashida, *U.S. Patent*, no. 4562374, 1984.
- [17] <http://www.cedrat.com/en/technologies/actuators/piezo-motors/electronics.html>.
- [18] C. Hasser, *Force-Reflecting Anthropomorphic Hand Masters Armstrong Laboratory Technical Report*. Ohio: Wright-Patterson AFB, 1995.
- [19] K. Spanner, "Survey of the various operating principles of ultrasonic piezomotors," in *10th International Conference on New Actuators*, Bremen, Germany, 2006.
- [20] P. Allen, N. Patronik, M. Zenati, and C. N. Riviere, "A mobile robot driven by miniature onboard motors for cardiac intervention," in *34th Annual Northeast Bioengineering Conference*, Providence, Rhode Island, 2008, pp. 9–10.

[21] <http://www.piezomotor.se>.

[22] <http://www.portescap.com>.

[23] <http://www.copleycontrols.com>.

Ringraziamenti

Ringrazio di cuore la mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto in tutte le mie scelte. Ringrazio i miei amici e il CZ Team, fondamentali per mantenere l'equilibrio mentale e spirituale nel corso di questi anni. Infine un sentito ringraziamento al Professor Giulio Rosati per l'aiuto nella redazione della tesina, nonché per il corso di Controllo dei Sistemi Meccanici, che ha fatto nascere in me l'interesse per l'automazione industriale.