

Esami di Stato per l'abilitazione alla professione di Ingegnere
 Sessione I-2004
 Ingegneria Informatica - Tema n. 3

CONTROLLO DIGITALE DI POSIZIONE DI UN BRACCIO MECCANICO

Si consideri lo schema di Figura 1, che descrive un braccio meccanico (comprensivo di utensile) di momento d'inerzia J_2 e posizione angolare θ , mosso da un motore elettrico a corrente continua tramite un riduttore ad ingranaggi di rapporto di riduzione t , la cui rigidità torsionale media sia indicata con K_r . I coefficienti di attrito viscoso siano indicati con b_i , $i = 1,2$. Il motore sia alimentato da un alimentatore in grado di fornire al motore una corrente $I(t)$ proporzionale alla tensione di comando $V(t)$ a meno di un rumore di corrente $AI(i)$. Il guadagno dell'alimentatore sia indicato con A . Sul braccio agisca una coppia resistente C_2 e sull'albero motore una coppia di attrito redente A_1 . Il rapporto di riduzione t sia definito come $r = W_m/W_r$, $\langle f \rangle$ indichi il flusso motore o costante di coppia del motore a corrente continua e q_m la posizione angolare dell'albero motore. Il braccio ruoti in un piano verticale i cui riferimenti siano definiti come in Figura 2. Si assuma che in assenza di utensile ($M = 0$), l'asse di rotazione Z (ortogonale a X e Y) sia baricentrico. Si assuma un campo di rotazione di q pari a $\pm p$.

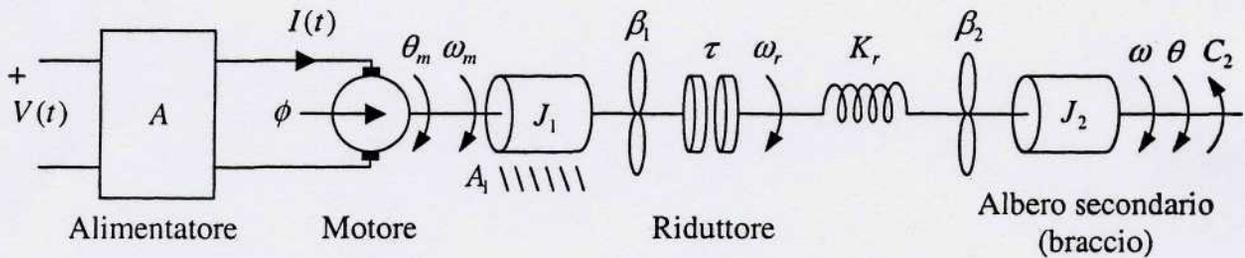


Figura 1 – Schema elettromeccanico

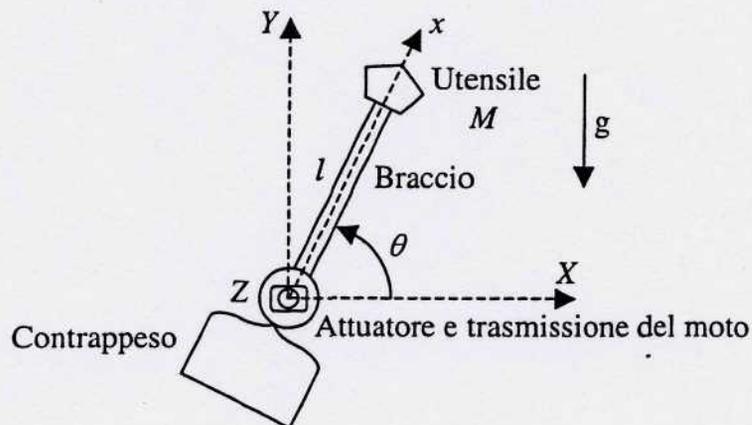


Figura 2 – Schema geometrico

TEMI DA SVOLGERE

Parte I: Analisi dinamica temporale (2 punti)

1. Si scrivano, a partire dagli schemi di Figura 1 e Figura 2 e dai dati di Tabella 1, le equazioni di stato a tempo continuo in forma letterale e numerica, scegliendo con cura ingressi (comando e disturbi) e variabili di stato. Le variabili vengono riportate in una tabella apposita. Le equazioni di stato vengano scritte nel modo più chiaro e ordinato possibile.
2. Si calcolino, trascurando attrito radente e coppia di gravità, gli autovalori dell'equazione di stato in forma approssimata, assumendo che gli autovalori siano separabili in due autovalori di bassa frequenza e in due autovalori di alta frequenza. Ad esempio, per calcolare gli autovalori di alta frequenza, si approssimi l'equazione degli autovalori nell'ipotesi che due radici siano di modulo elevato (lontane dall'origine). Si riporti per ciascun autovalore la formula approssimata ed il valore numerico in un'apposita tabella. Si calcolino anche frequenza naturale, smorzamento e costanti di tempo se del caso.

Tabella 1 - Dati numerici dei parametri.

Nome	Simbolo	Unità di misura	Valore
Rigidità torsionale riduttore	K_r	Nm	100000
Rapporto di riduzione	τ		160
Massa utensile	M	kg	≤ 2
Lunghezza braccio	l	m	1
Momento di inerzia complessivo braccio e contrappeso	J_2	Kgm ²	10
Flusso motore	ϕ	Vs	0.2
Attrito viscoso albero primario	β_1	Nms	0.001
Attrito viscoso albero secondario	β_2	Nms	0
Guadagno dell'alimentatore	A	A/V	1

Parte II:
Dimensionamento di massima di unità digitale di controllo (UDC)

Requisiti dell'UDC

1. Il braccio ruoti nel piano verticale; dati geometri in Tabella 2.
2. Il movimento sia del tipo punto-punto e soddisfi i vincoli cinematici di Tabella 2 che limitano le traiettorie di riferimento.
3. Tolleranza sull'errore di posizione rispetto al riferimento come da Tabella 2.
4. Requisiti dinamici: tempo di assestamento dell'errore da movimento e presa punto come da Tabella 2.
5. Misura: trasduttore digitale di posizione montato sull'albero secondario (solidale al braccio).

Tabella 2 – Requisiti.

Nome	Simbolo	Unità di misura	Valore
Geometria			
Massa utensile	M	kg	≤ 2
Lunghezza braccio	l	m	0.8
Momento di inerzia complessivo braccio e contrappeso	J_2	Kgm ²	10
Cinematica			
Velocità angolare max	ω_{max}	rad/s	1.5
Accelerazione angolare max	a_{max}	rad/s ²	2
Campo di movimento	$\theta_{min}, \theta_{max}$	rad	$-\pi, \pi$
Tolleranze			
In presa punto (riferimento fermo)	ϵ	mrad	≤ 1
In movimento	ϵ_m	mrad	≤ 5
Dinamica			
Tempo di assestamento	σ	s	≤ 0.5
Alimentatore			
Valore max rumore ΔI (distribuzione uniforme)	ΔI_{max}	%	5 (della corrente max)

Dimensionamento dell'UDC (8 punti)

Si dimensiona un'unità digitale di controllo che soddisfi i requisiti del punto precedente. Ogni scelta deve essere chiaramente giustificata con una disequazione o formula.

1. Motoriduttore

- Si scelga da catalogo (allegato) il motoriduttore e se ne riportino i parametri necessari per costruire il modello fine da meccanizzare come simulatore numerico, in apposita tabella.
- Si stabilisca, da catalogo, la coppia limite del riduttore da rispettarsi dall'UDC

- Si stabiliscano, da catalogo, i limiti minimo e massimo del coefficiente di attrito viscoso e della coppia di attrito radente
- Si scelga un gioco del riduttore compatibile con le tolleranze di posizione richieste.
- Il rapporto di riduzione deve essere scelto in modo che l'inerzia del gruppo motore+riduttore sia tra il 50% e il 70% dell'inerzia massima del braccio.

2. Motore elettrico

- Si scelga da catalogo (allegato) il motore elettrico e se ne riportino i parametri necessari per costruire il modello fine da meccanizzare come simulatore numerico, in apposita tabella.
- Si stabilisca la corrente massima del motore in movimento e in posizione.

3. Campionamento, trasduttore di posizione

- Si scelga la frequenza di campionamento f_s e in base ad essa la banda passante limite p_a dell'alimentatore; nella scelta di f_s si tenga presente che la vibrazione fondamentale del gruppo motore-riduttore-braccio è incerta al 10% e accompagnata da armoniche (fino alla quarta) e l'ampiezza delle armoniche si riduce 100 volte per decade (-40dB/dec).
- Si scelga la risoluzione r [rad] del trasduttore di posizione angolare ed il suo numero m di cifre binarie. Si scelga di conseguenza l'encoder ottico dalla tabella allegata.
- Data la corrente massima del motore, si stabilisca la risoluzione r_u [A] del comando ed il suo numero n di cifre binarie.

4. Modello di progetto e dinamica errore relativa

- Si impostino le equazioni di stato tempo-discrete con cui progettare il controllo; si ponga cura nella descrizione dei disturbi (incogniti, noti e a modello noto). Se ne tracci con cura lo schema a blocchi con i valori numerici dei guadagni.
- Si valuti la dinamica errore relativa imposta dalla vibrazione fondamentale calcolandone la F_dT e la sua sovraelongazione e la frequenza corrispondente. Se ne tracci il modulo della risposta armonica sul foglio di carta millimetrata (un punto per ottava a partire da una frequenza minima a scelta) entro la ω_{max} del controllo.

5. Osservatore degli stati

- Si progetti l'*osservatore degli stati*; si descrivano le equazioni di stato relative e se ne tracci lo schema a blocchi, indicandone chiaramente ingressi e uscite.
- Si operi una scelta numerica degli autovalori, tenendo presente l'incertezza sul valore della vibrazione fondamentale.
- Sulla base della scelta precedente si calcolino i guadagni dell'osservatore e si verifichi se il tempo di assestamento è rispettato (transitorio dall'errore max in movimento all'errore max in presa-punto).
- Si calcoli e tracci la risposta armonica (modulo) dell'osservatore tra misura e stima con comando nullo (se necessario si impieghi l'approssimazione t-continua). Si abbia cura di sovrapporre il tracciato alla risposta armonica della dinamica errore relativa (un punto per ottava).

6. Generatore dei riferimenti

- Si progetti il *generatore dei riferimenti* come un controllo ottimo ad anello chiuso non lineare (*bang-bang*): le sue uscite siano le traiettorie desiderate della posizione e della velocità del braccio e la corrente ad anello aperto del motore.
- Se ne tracci lo schema a blocchi tempo-discreto e il diagramma dell'automa a stati finiti (o le tavole di verità) della logica di controllo a commutazione ('bang-bang'). L'automa a stati finiti abbia 4 stati: presa-punto, accelerazione, folle e frenata.

- Si tracci su carta millimetrata l'andamento a tempo continuo delle uscite del generatore per un movimento punto punto da $q(0) = 0$ a $q = p$.
- 7. Compensazione automatica (asservimento) e dei disturbi**
- Si progetti la legge di comando (asservimento e compensazione dei disturbi) e se ne tracci lo schema a blocchi, ponendo in evidenza i suoi ingressi e le sue uscite.
 - Si operi una scelta numerica dei suoi guadagni e si spieghino gli effetti di una loro diminuzione o aumento.
- 8. Valutazione dell'errore di asservimento in presa punto**
- Si elenchino le sorgenti d'errore presenti nell'alimentatore e nel trasduttore e si dia una valutazione analitica e numerica dei loro effetti sull'errore di asservimento, da confrontarsi con la tolleranza in presa punto.

Allegati

1. N. 4 fogli di carta millimetrata
2. Catalogo di riduttori armonici (in forma tabellare)
3. Catalogo di motori elettrici a corrente continua (in forma tabellare)
4. Catalogo di sensori (in forma tabellare)



Allegati - cataloghi

Motori elettrici

Parametro	Unità di misura	Taglia				
		921	922	941	942	943
Corrente nominale	[A]	11	8	6.4	6.4	6.5
Stallo	[A]	11	7.9	6.7	6.7	6.75
Tensione nominale	[V]	14	20	22	26	35
Resistenza	[Ohm]	0.43	0.85	1.1	1.1	1.1
Flusso	[Vs]	0.0296	0.044	0.0296	0.0592	0.088
Coefficiente viscoso	[Ncm/kgiri/min]	0.7	0.6	0.5	0.8	0.85
Momento d'inerzia	[gcm ²]	290	100	350	350	340
Autoinduzione	[mH]	0.025	0.025	0.1	0.1	0.1
Attrito radente	[Nm]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Velocità Nominale	[rad/s]	314	314	502	314	314

Parametro	Unità di misura	Taglia				
		1221	1241	1242	1243	1244
Corrente nominale	[A]	11.7	8	7.7	7.2	6
Stallo	[A]	11.7	8.3	8.2	8.2	6.6
Tensione nominale	[V]	24	37	43	61	63
Resistenza	[Ohm]	0.47	0.93	0.93	0.93	1.4
Flusso	[Vs]	0.0573	0.059	0.1146	0.172	0.172
Coefficiente viscoso	[Ncm/kgiri/min]	1.6	0.7	2.7	3.3	2.5
Momento d'inerzia	[gcm ²]	1050	1500	1500	1600	670
Autoinduzione	[mH]	0.025	0.1	0.1	0.1	0.1
Attrito radente	[Nm]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Velocità Nominale	[rad/s]	314	502	314	314	314

Parametro	Unità di misura	Taglia				
		131	151	171	172	173
Corrente nominale	[A]	8	8.25	10	10	7.3
Stallo	[A]	6.5	8	8.8	9.22	7.14
Tensione nominale	[V]	65	88	100	116	105
Resistenza	[Ohm]	1.5	1.25	1	1	1.8
Flusso	[Vs]	0.167	0.248	0.286	0.336	0.286
Coefficiente viscoso	[Ncm/kgiri/min]	1.5	2.7	3	3.8	4
Momento d'inerzia	[gcm ²]	2350	4230	8150	8150	7900
Autoinduzione	[mH]	0.08	0.08	0.1	0.1	0.2
Attrito radente	[Nm]	0.026	0.06	0.06	0.06	0.09
Velocità Nominale	[rad/s]	314	314	314	314	314



Motoriduttori armonici

Parametro		Unità di misura	Taglia		
			25	32	40
Rigidità media		[Nm/rad]	37350	81870	142000
Tolleranza elasticità			0.1	0.1	0.1
Inerzia (primario)		[kgm ²]	0.0000608	0.000194	0.00053
Coppia max (% coppia nominale)		%	200	200	200
Gioco					
	standard	[minuti]	9.0	9.0	9.0
	BL3	[minuti]	3.0	3.0	3.0
	BL1	[minuti]	1.0	1.0	1.0
Coppia limite del gioco		[Nm]	2.25	4.5	9
Coppia spunto					
	min	[nm]	0.016	0.02	0.04
	max	[nm]	0.05	0.09	0.18
Coppia dinamica a vuoto (1500giri/min)					
	min	[nm]	0.07	0.1	0.17
	max	[nm]	0.18	0.25	0.45

Taglia 25		
Rapporto	Coppia nominale uscita [Nm]	Vel. nominale ingresso [giri/min]
128	53	3500
128	56	2850
128	71	1750
160	55	3500
160	58	2850
160	72	1750
200	56	3500
200	70	2850
200	72	1750

Taglia 32		
Rapporto	Coppia nominale uscita [Nm]	Vel. nominale ingresso [giri/min]
131	114	3500
131	119	2850
131	144	1750
157	114	3500
157	125	2850
157	144	1750
200	114	3500
200	125	2850
200	144	1750
260	114	3500
260	125	2850
260	144	1750



Taglia 40		
Rapporto	Coppia nominale uscita [Nm]	Vel. nominale ingresso [giri/min]
128	241	3500
128	254	2850
128	301	1750
160	241	3500
160	254	2850
160	301	1750
200	241	3500
200	254	2850
200	301	1750
258	241	3500
258	254	2850
258	301	1750

Encoder ottici (numero di righe elettriche = 4 volte il numero delle righe ottiche)

Tipo	Numero righe ottiche	Eccentricità [μm]	Raggio [mm]	Errore max [arcsec]	Vel. max [rad/s]	Frequenza max [kHz]
125	2000	2	80	30	314	300
125	2048	2	80	29.3	314	300
125	2500	2	80	24	314	300
425	3000	2	60	19.8	1256	500
125	3600	2	80	16.7	314	300
125	4096	2	80	14.6	314	300
425	4500	2	60	13.3	1256	500
125	5000	2	80	12	314	300
255	6000	2	80	10	314	300
255	7854	2	80	9	314	300
255	8192	2	80	8	314	300

NOTA: $1 \text{ arcsec} \approx 4.86 \mu\text{rad}$