

Dimensionamento e scelta di motori brushless e c.c.

Ing. Giulio Ripaccioli

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Obiettivo

Scelta di motori, riduttori e encoder necessari per la costruzione della parte meccanica di un robot autonomo "casalingo".

Fasi operative:

1. Definizione delle specifiche;
2. Determinazione dei parametri utili alla scelta dei singoli pezzi;
3. Utilizzo di data-sheets Faulhaber per la scelta di motori, riduttori ed encoder;
4. Conclusioni e commenti.

<http://www.faulhaber.com>

<http://rswww.com>

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dimensionamento

Definizione delle specifiche dinamiche:

$$v_{max} = 0.5 \text{ m/s}$$

$$a_{max} = 0.5 \text{ m/s}^2 (\sim 1/20 \text{ g})$$

$$m = 4 \text{ kg}$$

Per questioni costruttive si scelgono ruote con raggio 1 cm.

Si vuole che il robot abbia una larghezza max di 16 cm.

Il robot funzionerà a batteria. Si assume una tensione di 12 V.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dimensionamento

$$F = ma_{max} = 4 \cdot 0.5 = 2 \text{ N}$$

Potenza meccanica richiesta:

$$P_m = F \cdot v_{max} = 2 \cdot 0.5 = 1 \text{ W}$$

Coppia motrice richiesta:

$$C_{tot} = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_m}{\frac{v_{max}}{R}} = \frac{P_m R}{v_{max}}$$

R = raggio ruota

ω = vel. angolare
della ruota

$$C_{tot} = 1 \cdot 0.01 \cdot 2 = 0.02 \text{ Nm} = 20 \text{ mNm}$$

Coppia generata su ciascuna ruota:

$$C_{asse} = \frac{C_t}{2} = 0.020 \text{ Nm} = 10 \text{ mNm}$$

$$\text{Velocità angolare: } \omega = \frac{v}{R} = \frac{0.5}{0.01} = 50 \text{ rad/s}$$

Da cui la velocità richiesta n : giri/asse \simeq 480 rpm

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore brushless

Si considera inizialmente la soluzione con motori brushless (Perchè ?).

Regole da seguire:

1. Si inizia a guardare i data-sheet a partire dalla potenza resa e la tensione di alimentazione disponibile.
2. Si sceglie il motore che produce da 10 a 15 volte la potenza calcolata. Dobbiamo essere molto conservativi al fine di poter compensare anche gli attriti del sistema.

Attenzione alle dimensioni fisiche e alle unità di misura !

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Scelta del motore brushless

Dai data-sheet Faulhaber. Si fa riferimento alla serie 2036012B.

Servomotori C.C. brushless

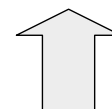
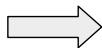
20 W_a

Commutazione elettronica

Combinabil
Riduttori:
20/1
Encoders:
IE2, 10/09B,
Elettroniche
vedasi „Tabe

Serie 2036 ... B

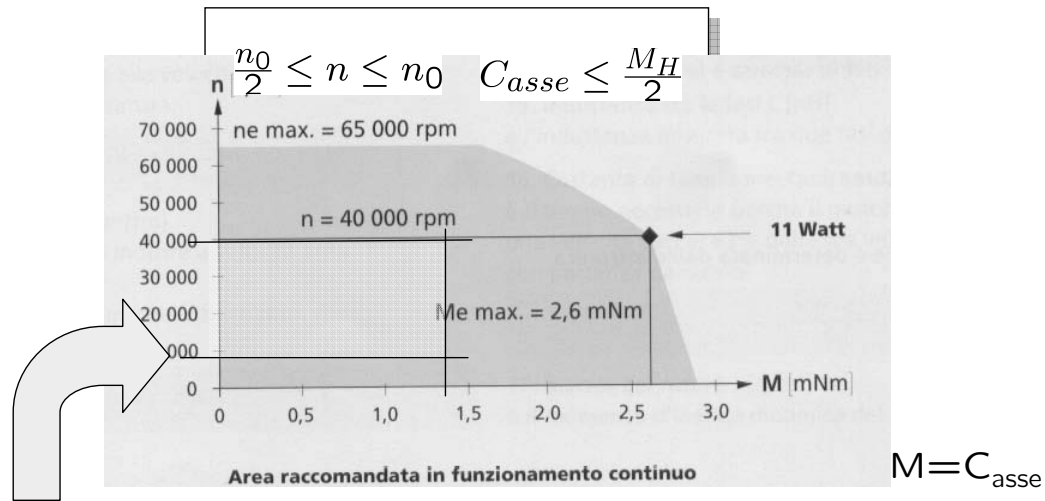
	2036 U	012 B	024 B
1 Tensione nominale	U_N	12	24
2 Resistenza tra le fasi	R	3,4	14,0
3 Potenza resa ¹⁾	$P_2 \text{ max.}$	20	19
4 Rendimento	$\eta \text{ max.}$	70	69
5 Velocità a vuoto	n_0	17 600	18 000
6 Corrente a vuoto (con albero ø 2,0 mm)	I_0	0,102	0,053
7 Coppia d'arresto	M_H	22	21
8 Coppia d'attrito statico	C_0	0,27	0,27
9 Coefficiente d'attrito dinamico	C_v	$2,14 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$
10 Costante di velocità	k_N	1 506	773
11 Costante FEM	k_E	0,664	1,294
12 Costante di coppia	k_M	6,34	12,36
13 Costante di corrente	k_I	0.158	0.081



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Ottimizzare il funzionamento

Per ottimizzare il funzionamento e la durata di vita del motore, la velocità richiesta n deve essere maggiore alla metà della velocità a vuoto n_0 alla tensione nominale, mentre la coppia richiesta C_{asse} deve essere minore alla metà della coppia d'arresto M_H .



Regione di
funzionamento

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Ottimizzazione funzionamento

Nel ns. caso: $n=480 \text{ rpm}$ \Rightarrow $n \ll \frac{n_0}{2}$ $n_0=17600$
 $C_{asse}=20 \text{ mNm}$ \Rightarrow $C_{asse} \leq \frac{M_H}{2}$ $M_H=22$

Cosa bisogna fare se:

1. $n \geq \frac{n_0}{2}$ $C_{asse} \leq \frac{M_H}{2}$ \Rightarrow Motore ok
2. $n \leq \frac{n_0}{2}$ $C_{asse} \leq \frac{M_H}{2}$ \Rightarrow Mettere un riduttore
3. $C_{asse} \geq \frac{M_H}{2}$ \Rightarrow Mettere un riduttore oppure scegliere un motore con tensione di alimentazione diversa.

Siamo nel 2° caso !

Bisogna scegliere un riduttore secondo quanto indicato dal costruttore.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Riduttore

Si seleziona dal catalogo un riduttore con una coppia d'uscita superiore a quella necessaria nell'applicazione.

Serie 20/1		2251 ... 5										
Carcassa		20/1										
Materiale ingranaggi		acciaio										
Materiale metallo		metallo										
Velocità massima raccomandata all'entrata:		5000 rpm										
- per servizio permanente		≤ 1°										
Gioco angolare tipico, senza carico		cuscinetti a sfere, precaricati										
Cuscinetto dell'albero d'uscita												
Carico massimo sull'albero:		≤ 75 N										
- radiale (a 8,5 mm dalla flangia di fissaggio)		≤ 20 N										
- assiale		≤ 35 N										
Pressione massima sull'albero		≤ 0,02 mm										
Gioco dell'albero (misurato in uscita):		= 0 mm										
- radiale		- 30 ... + 100 °C										
- assiale												
Gamma di temperatura												
Specifiche dati												
Rapporto di riduzione (nominale)	Peso senza motore	Lunghezza senza motore		Lunghezza con motore					Coppia d'esercizio		Senso di rotazione (reversibile)	Rendimento
		L2	L1	1727 U	2036 U	2224 U	2230 U	2233 U	Servizio permanente	Servizio intermittente		
	g	mm	mm	L1	L1	L1	L1	L1	M max. mNm	M max. mNm		%
3,71 :1	28	18,35	45,55	54,35	42,55	48,35	50,95	500	700	=	88	
9,7 :1	38	23,45	50,65	59,45	47,65	53,45	56,05	500	700	=	80	
14 :1	38	23,45	50,65	59,45	47,65	53,45	56,05	500	700	=	80	
23 :1	38	23,45	50,65	59,45	47,65	53,45	56,05	500	700	=	80	
43 :1	48	28,55	55,75	64,55	52,75	58,55	61,15	500	700	=	70	
66 :1	48	28,55	55,75	64,55	52,75	58,55	61,15	500	700	=	70	
86 :1	48	28,55	55,75	64,55	52,75	58,55	61,15	500	700	=	70	
134 :1	58	33,65	60,85	69,65	57,85	63,65	66,25	500	700	=	60	
159 :1	58	33,65	60,85	69,65	57,85	63,65	66,25	500	700	=	60	
246 :1	58	33,65	60,85	69,65	57,85	63,65	66,25	500	700	=	60	
415 :1	68	38,75	65,95	74,75	62,95	68,75	71,35	500	700	=	55	
592 :1	68	38,75	65,95	74,75	62,95	68,75	71,35	500	700	=	55	
989 :1	68	38,75	65,95	74,75	62,95	68,75	71,35	500	700	=	55	
1 526 :1	68	38,75	65,95	74,75	62,95	68,75	71,35	500	700	=	55	

La lunghezza totale, compreso il motore, non deve superare la specifica imposta (cioè 8 cm).

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Introduzione del riduttore

L'introduzione del riduttore modifica rispettivamente sia la velocità a vuoto prodotta e la coppia generata secondo le seguenti relazioni:

Velocità

$$n'_0 = \frac{n_0}{\alpha}$$

n'_0 : velocità a vuoto con riduttore;

n_0 : velocità a vuoto senza riduttore;

α : rapporto di riduzione

Coppia

$$C'_{asse} = \alpha C_{asse}$$

C'_{asse} : coppia richiesta con riduttore

C_{asse} : coppia richiesta senza riduttore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

È buona regola calettare sull'albero motore anche un encoder.

Con i motori della serie 2036012B sono accoppiabili vari tipi di encoder.

Encoders
Encoders magnetici

Caratteristiche:
64 fino a 512 impulsi per giro
2 canali
Uscita digitale

Serie IE2 - 512

		IE2 - 64	IE2 - 128	IE2 - 256	IE2 - 512	
Numero d'impulsi per giro	N	64	128	256	512	
Segnale d'uscita, onda quadra		2				canal
Tensione di funzionamento	V _{DD}	4,5 ... 5,5				V DC
Assorbimento di corrente, media (V _{CC} = 5 V DC)	I _{DD}	typ. 6, max. 12				mA
Corrente d'uscita, max. permessa ¹⁾	I _{OUT}	5				mA
Durata degli impulsi	P	180 ± 45				°e
Sfasamento elettrico tra i canali A e B	Φ	90 ± 45				°e
Tempi medi di salita/caduta del segnale, max.(C _{LOAD} = 50 pF)	tr/tf	0,1 / 0,1				µs
Frequenza di conteggio ²⁾ , fino a	f	20	40	80	160	kHz
Inerzia del disco	J	0,09				gcm ²
Temperature di funzionamento		- 25 ... + 85				°C

¹⁾ V_{DD} = 5 V_{CC}: livello logico basso <0,5 V, livello logico alto > 4,5 V: compatibile CMOS e TTL
²⁾ Velocità (rpm) = f (Hz) x 60/N

Lunghezza totale motore-riduttore-encoder: 70,25 mm

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Scelta dell'encoder

L'encoder viene scelto rispetto alle specifiche sul massimo errore.

Supponiamo di volere al massimo un'errore di velocità di 5 rpm.

L'errore compiuto da un encoder con N impulsi/giro e in cui la misura di velocità è aggiornata con periodo costante T è:

$$\epsilon_{Max} = \frac{1}{N \cdot T}$$

Sia T=0.1, allora se N=64 $\epsilon_{Max} \leq 0.15625$ giri/sec, cioè 9.375 rpm

Per soddisfare la specifica serve $N > 120.5$, quindi si sceglie IE2-128

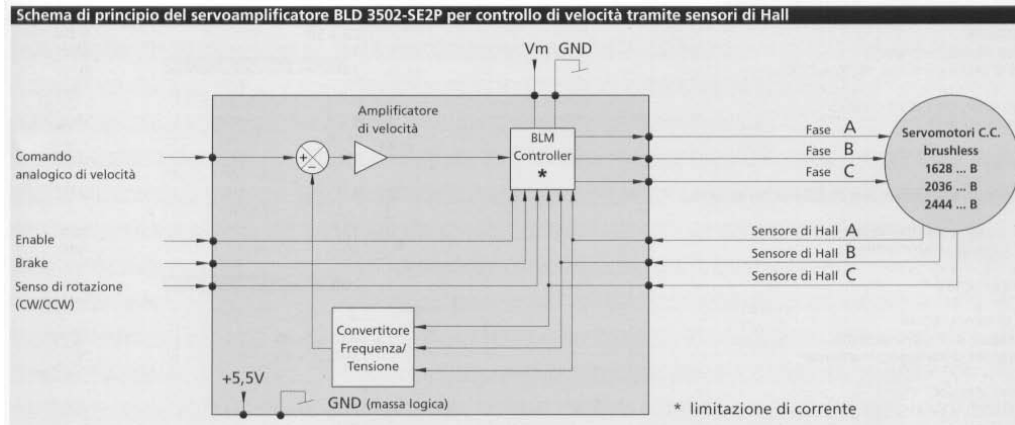
Lunghezza totale motore-riduttore-encoder: 70,25 mm

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Elettronica di controllo

Per il controllo di velocità o di posizione dei motori brushless sono disponibili dallo stesso produttore un'insieme di interfacce.

Modello BLD 3502:



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore in c.c.

Seconda soluzione: Motore in c.c.

$$n_0 = 480 \text{ rpm}$$

$$C_{asse} = 20 \text{ mNm}$$

Modello a grafite

2342012 CR

Micromotori C.C.

Commutazione grafite

12 Watt

Combinabili con:
Riduttori:
23/1, 26/1, 30/1, 38/3
Encoders:
IE2, 10/09B, 10/09BP, 5
Unità motore-dinamo
2342 ... CR

Serie 2342 ... CR

	2342 S	006 CR	012 CR	018 CR	024 CR	036 CR
1 Tensione nominale	U _N	6	12	18	24	36
2 Resistenza ai morsetti	R	0,40	1,90	4,10	7,10	15,9
3 Potenza resa	P ₂ max.	20,50	17,00	18,10	19,00	19,40
4 Rendimento	η max.	81	80	81	81	81
5 Velocità a vuoto	n ₀	9 000	8 100	8 000	8 500	8 100
6 Corrente a vuoto (con albero ø 3,0 mm)	I ₀	0,170	0,075	0,048	0,038	0,024
7 Coppia d'arresto	M _H	87,2	80,0	86,5	85,4	91,4
8 Coppia d'attrito	M _R	0,98	1,00	0,99	0,99	0,99
9 Costante di velocità	k _n	1 650	713	462	366	231
10 Costante FEM	k _E	0,604	1,400	2,160	2,730	4,340
11 Costante di coppia	k _M	5,77	13,40	20,70	26,10	41,40
12 Costante di corrente	k _i	0,173	0,075	0,048	0,038	0,024
13 Pendenza della curva n-M	Δn/ΔM	103	101	92,5	99,5	88,6
14 Induttanza ai morsetti	L	13,5	65	150	265	590
15 Costante di tempo meccanica	τ _m	6	6	6	6	6
16 Inerzia del rotore	J	5,6	5,7	6,2	5,8	6,5
17 Accelerazione angolare	α max.	160	140	140	150	140

Si sceglie un modello a grafite per il prezzo più economico rispetto a quelli con metalli preziosi.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Riduttore

Essendo nel 2° caso è necessario mettere un riduttore.

Modello 38/3

Serie 38/3

Carcassa
 Materiale ingranaggi
 Velocità massima raccomandata all'entrata:
 - per servizio permanente
 Gioco angolare tipico, senza carico
 Cuscinetto dell'albero d'uscita
 Carico massimo sull'albero:
 - radiale (a 15 mm dalla flangia di fissaggio)
 - assiale
 Pressione massima sull'albero (con lamiera posteriore sostenuta)
 Gioco dell'albero (misurato in uscita):
 - radiale
 - assiale
 Gamma di temperatura

Riduzione:
 10,3:1

Specifiche dati

Rapporto di riduzione (nominale)	Peso senza motore	Lungh. senza motore		Lunghezza con motore					
		2230 U L2	2338 S L2	2230 U L1	2233 U L1	2338 S L1	2444 S L1	2342 S L1	2842 S L1
5,42:1	g	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10,3 :1	66	19,3	23,8	49,3	52,1	61,4	67,8	65,8	65,8
18,2 :1	71	19,3	23,8	49,3	52,1	61,4	67,8	65,8	65,8
34,7 :1	71	19,3	23,8	49,3	52,1	61,4	67,8	65,8	65,8
61,1 :1	79	25,3	29,8	55,3	58,1	67,4	73,8	71,8	71,8
116 :1	79	25,3	29,8	55,3	58,1	67,4	73,8	71,8	71,8
205 :1	85	25,3	29,8	55,3	58,1	67,4	73,8	71,8	71,8
391 :1	85	25,3	29,8	55,3	58,1	67,4	73,8	71,8	71,8
689 :1	92	28,4	32,9	58,4	61,2	70,5	76,9	74,9	74,9
689 :1	92	28,4	32,9	58,4	61,2	70,5	76,9	74,9	74,9

$n_0=8100$ con riduttore: $n_0 \simeq 786$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Encoder e logica di controllo

Modelli di encoder compatibili: IE2

Modello scelto IE2-128. 128 impulsi a giro

Lunghezza completa: motore-riduttore-encoder = 77.5 cm

Controllo di posizione

4-Quadranti PWM

Combinabile con:
Micromotori C.C.

Serie MCDC 2805

		MCDC 2805	
Tensione d'alimentazione	U_B	12 ... 28	V DC
Frequenza switch PWM	f_{PWM}	62,5	kHz
Rendimento	η	95	%
Corrente permanente d'uscita max.	I_{out}	5	A
Corrente di punta d'uscita max.	I_{out}	10	A
Corrente totale di riposo	I_{di}	0,06	A
Gamma di velocità		10 ... 30 000	rpm
Tensione di uscita per utilizzazione esterna	V_{CC}	5	V DC
- corrente di carico max.	I_{CC}	60	mA
Entrata Nr. 1 ^o		18	k Ω
Comando analogico di velocità		gamma di tensione segnale di comando variazione di velocità per 1V input analogico	± 10 1000 ^o
			V rpm/V
Comando di corrente digitale		Segnale PWM Gamma di frequenza pulse duty factor 50% pulse duty factor < 50%	low 0 ... 0,5 / high 4 ... 30 100 ... 2 000 0 rotazione antioraria
			V Hz rpm

Logica di controllo

Modello MCDC 2805

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Conclusioni

Abbiamo mostrato come analizzare le specifiche per la selezione dei motori e come scegliere i componenti adeguati da un catalogo per la progettazione di un sistema meccanico per robot.

L'analisi è stata molto conservativa. Sono stati considerati motori con potenze 10-15 volte maggiori rispetto a quelle richieste. Si può essere anche meno conservativi (potenze 5-10 volte maggiori).

Alcune decisioni sono legate anche al fattore prezzo.