

Controllo di un Motore Elettrico in Corrente Continua

Corrado Santoro

ARSLAB - Autonomous and Robotic Systems Laboratory

Dipartimento di Matematica e Informatica - Università di Catania, Italy

santoro@dmf.unict.it



Programmazione Sistemi Robotici

Motore Elettrico

- Un **motore elettrico** è una macchina che trasforma **energia elettrica** in **energia meccanica**
- Ciò è ottenuto sfruttando le proprietà del campo magnetico
- Esistono differenti tipologie di motori elettrici
 - Motori in Corrente Continua (DC) o **brushed**
 - Motori in Corrente Alternata (AC) o **brushless**
 - Motori Brushless Speciali (**stepper**)

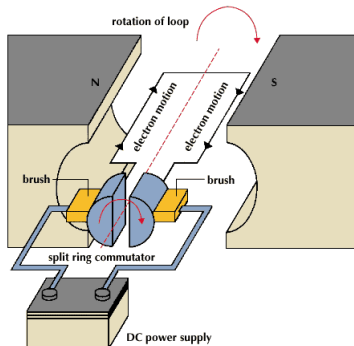


Motore Elettrico

- Qualunque motore elettrico è composto da due parti:
 - **Statore**, parte statica
 - **Rotore**, parte che viene posta in rotazione generando l'energia meccanica
- Una delle due parti è composta da **magneti permanenti**
- L'altra parte è composta da **bobine (avvolgimenti) di filo di rame** le quali generano campo magnetico al passaggio di una corrente elettrica
- Il moto viene generato dalla **contrapposizione** dei campi magnetici generati da statore e rotore
- Affinchè il moto sia assicurato, il campo magnetico sugli avvolgimenti **deve variare continuamente**
- La **velocità angolare** risultante del motore è proporzionale all'**intensità del campo magnetico**
- L' intensità del campo magnetico è a sua volta proporzionale alla **tensione/corrente** applicata alle bobine

Motore Elettrico in Corrente Continua (o Brushed)

- Un motore elettrico in *corrente continua* (DC motor):
 - lo statore è la **cassa esterna**, composta da magneti permanenti
 - il rotore è un **insieme di avvolgimenti**
- Un sistema di “**spazzole**” (contatti striscianti) permette di variare continuamente la **polarità** della tensione applicata alle bobine, comportando l'**inversione continua del campo magnetico**



Motore Elettrico in Corrente Continua

- Un motore elettrico in corrente continua è in grado di generare una **coppia di forze** T_m proporzionale alla tensione applicata V . La proporzionalità è basata sui parametri costruttivi del motore **resistenza elettrica** R_a e **impedenza** L_a dell'avvolgimento:

$$T_m = f_1(V, R_a, L_a)$$

- La **velocità angolare** ω di rotazione del motore è invece funzione della coppia generata dal motore T_m e della **coppia resistente** T_r cioè la **coppia risultante, sull'asse del motore, da tutti i carichi che il motore stesso deve "spostare"**:

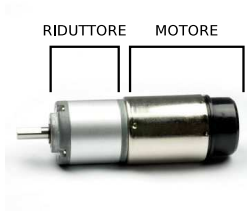
$$\omega = f_2(T_m, T_r)$$

(Alcuni) Dati Tipici di un Motore Elettrico in Corrente Continua

- V , tensione di lavoro (tipicamente 6V, 12V, 24V, 48V, etc.)
- R_a , resistenza elettrica dell'avvolgimento di rame
- L_a , impedenza elettrica dell'avvolgimento di rame
- K_m , rapporto coppia erogata/corrente assorbita
- T_s , coppia massima di stallo

Riduttori (Gearbox)

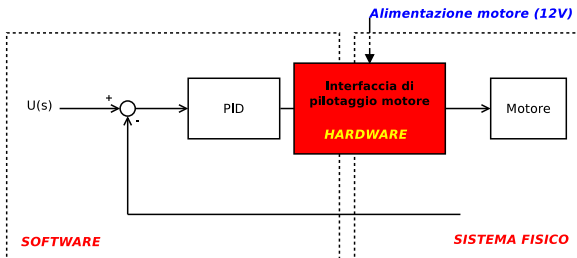
- I motori DC hanno tipicamente coppie molto basse e velocità di rotazione molto elevate (nell'ordine di 20-30000 giri/minuto)
- Per aumentare la coppia si usa collegare (meccanicamente) all'asse del motore un **riduttore di giri (gearbox)**
- I riduttori sono formati da ingranaggi (ruote dentate) che, in funzione del rapporto dei diametri, consentono:
 - una **riduzione di velocità angolare**
 - un **incremento della coppia generata**
- In un riduttore $n : 1$ si ha:
 - **velocità angolare risultante** = $\frac{\omega}{n}$
 - **coppia risultante** = nT_m



Pilotaggio di un motore DC

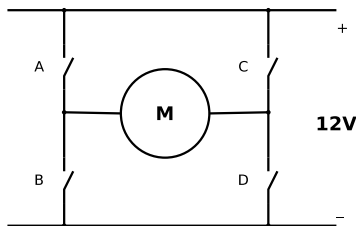
Pilotaggio di un motore DC

- In un sistema robotico, i motori sono utilizzati per movimentare le parti mobili, siano essi ruote di locomozione, o giunti di bracci meccanici
- Essi sono pilotati dal **software che implementa gli algoritmi di controllo**
- Occorre pertanto una opportuna **interfaccia (hardware)** che possa trasformare il **dato in uscita dall'algoritmo del PID** in una **tensione** opportuna da applicare ai capi del motore



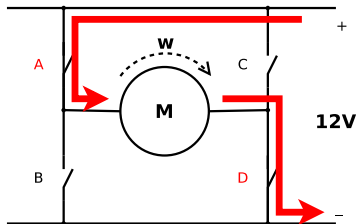
Pilotaggio di un motore DC - H Bridge

- Lo schema di pilotaggio di un motore DC è costituito da **quattro interruttori elettronici (transistor MOSFET)** A, B, C, D connessi come in figura
- I quattro interruttori sono pilotati dall'hardware dell'interfaccia
- La configurazione in figura è detta **ponte-H** o **H-bridge**, in quanto ha proprio la forma della lettera "H"

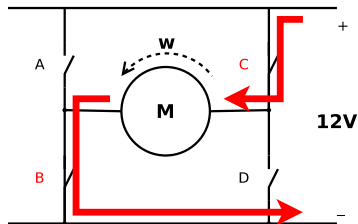


Rotazione CW & CCW

- Se “attiviamo” solo gli switch **A** e **D**, la corrente scorrerà nel verso indicato nella figura a sinistra → **il motore ruota in senso orario**
- Se “attiviamo” solo gli switch **B** e **C**, la corrente scorrerà nel verso opposto al caso precedente) → **il motore ruota in senso anti-orario**



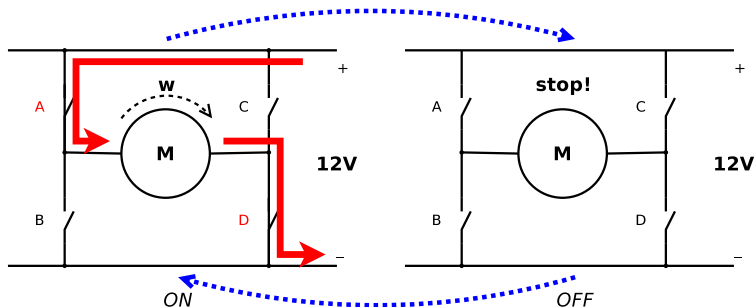
Rotazione CW (Clockwise)



Rotazione CCW (Counter-Clockwise)

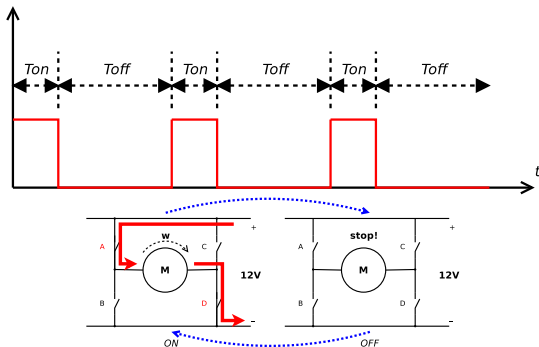
Modulazione della velocità di rotazione

- La variazione della velocità di rotazione è causata dalla variazione della **tensione applicata del motore**
- Questo potrebbe essere effettuato **variando la tensione di alimentazione**, tuttavia questa tecnica è alquanto complessa (dal punto di vista circuitale)
- La tecnica realmente utilizzata prevede invece l'uso di una **sequenza continua e temporizzata** di **accensione** e **spegnimento** del motore

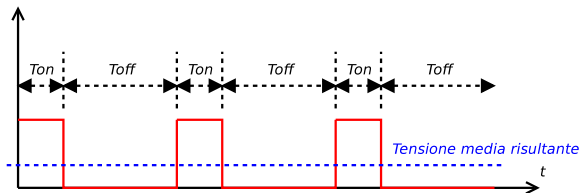


Modulazione della velocità di rotazione

- Gli interruttori A, D (o B, C) vengono **accesi** per un tempo T_{on} e **spenti** per un tempo T_{off}
- La sequenza ON/OFF si ripete velocemente nel tempo (a frequenze dell'ordine dei KHz)
- Il **segnale di pilotaggio** degli interruttori risulta avere un andamento (nel tempo) di questo tipo:



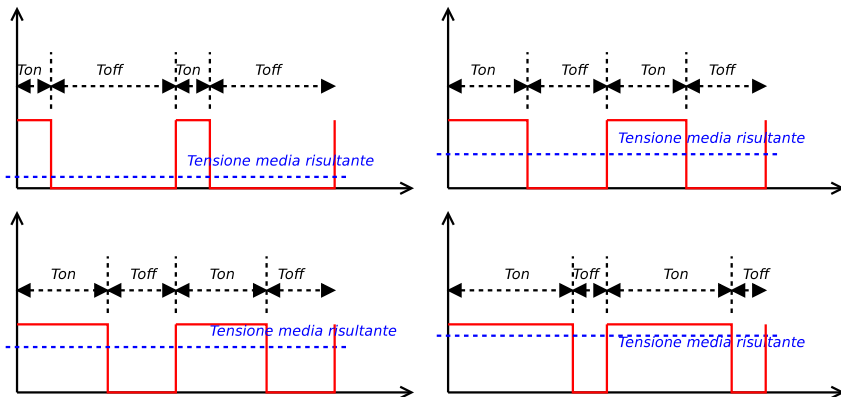
Modulazione della velocità di rotazione



- Se la **frequenza è elevata** gli **effetti induttivi** del motore fanno sì che la *tensione risultante* ai capi del motore sia la **tensione media (nel tempo)**
- Pertanto opportunamente **modulando il rapporto** tra T_{on} e T_{off} è possibile variare la tensione media risultante e conseguentemente la **velocità** del motore

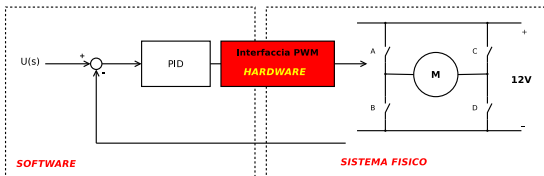
Modulazione della velocità e segnale PWM

- Più ampio è il T_{on} (rispetto a T_{off}) più alta sarà la tensione media risultante, e più alta la velocità di rotazione
- Questa tecnica di modulazione (nel tempo) di un segnale è detta **PWM** - **Pulse Width Modulation** (Modulazione della larghezza dell'impulso)



Output PID e segnale PWM

- L'interfaccia di pilotaggio del motore è dunque un circuito **generatore di PWM** che è connesso agli interruttori elettronici del **ponte-H**
- Il software (l'algoritmo del PID) produce, in output, un **valore numerico intero** che istruisce il circuito PWM a modulare opportunamente T_{on} (rispetto a T_{off})
- L'intervallo di tale valore numerico dipende dalla **risoluzione in bit** del circuito generatore di PWM
- Il **segno** del valore numerico indica il senso di rotazione (CW o CCW)



Segnale PWM, esempio numerico

- Consideriamo un circuito PWM con **12 bit** di risoluzione e un motore elettrico alimentato a **12 V**
- 12 bit (+ segno) implica un valore numerico nell'intervallo **$[-4095, 4095]$** ($2^{12} - 1 = 4095$)
- Pertanto:

Valore Numerico	Tensione Risultante	Direzione	Velocità
4095	12 V	CW	MAX
2048	6 V	CW	Media
0	0 V	-	Stop
-3500	10.25 V	CCW	Alta
-4095	12 V	CCW	MAX
...	...	...	...

Lettura della posizione e della velocità

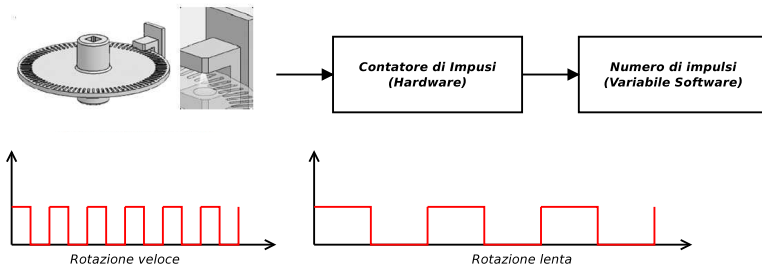
Encoder

- I motori elettrici possono aver collegato (calettato) all'asse un **sensore di posizione** denominato **encoder**
- Un encoder traduce la **posizione angolare** dell'asse in un valore numerico (opportunamente scalato)
- Gli encoder possono essere:
 - Resistivi
 - Ottici
 - Magnetici

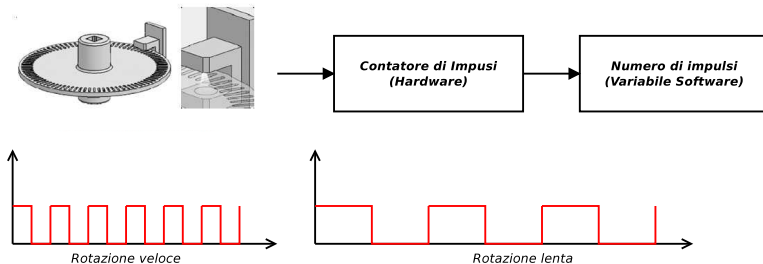


Encoder Ottici

- Un **encoder ottico** è costituito da un disco con un insieme di fori (es. 500, 1000, 2000, etc.) che ruota insieme all'asse del motore
- Nella zona dei fori è presente una coppia **LED/fotodiodo** che rivela il passaggio (o non-passaggio) di luce dai fori
- La rotazione del disco fa sì che il fotodiodo produca un **treno di impulsi** la cui frequenza è tanto più alta quanto più elevata è la velocità di rotazione
- Il segnale letto dal fotodiodo è collegato ad un interfaccia hardware che effettua il **conteggio** degli impulsi generati, offrendone il valore al software in una opportuna **variabile**



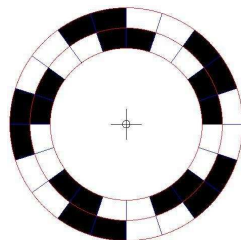
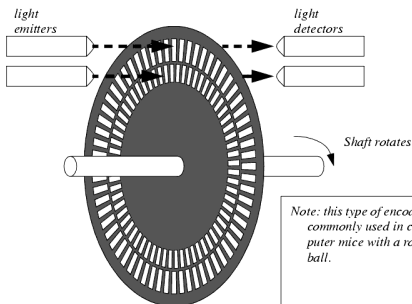
Encoder e grandezze misurate



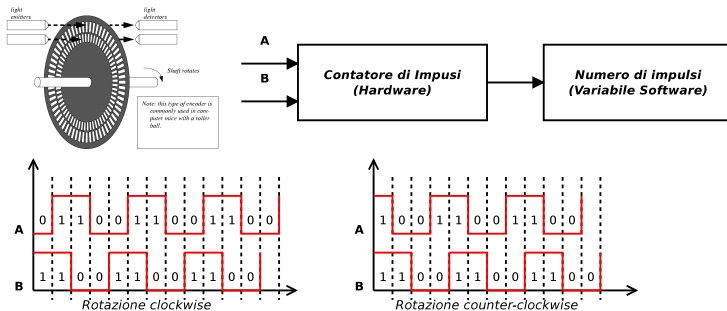
- Questo tipo di encoder ottico permette di determinare:
 - La **posizione**, contando i "tick"
 - La **velocità**, calcolando la differenza tra i tick in due istanti successivi, e dividendola per l'intervallo temporale tra i due istanti
- Tuttavia **non consente** di determinare il **verso di rotazione** del motore

Encoder in Quadratura

- Un **encoder ottico in quadratura** è costituito da un disco con **due serie concentriche di fori**
- Nella zona dei fori sono presenti **due coppie LED/fotodiodo**, denominati canali "A" e "B"
- I fori sono **sfasati di "mezzo tick"** (vedi figura)

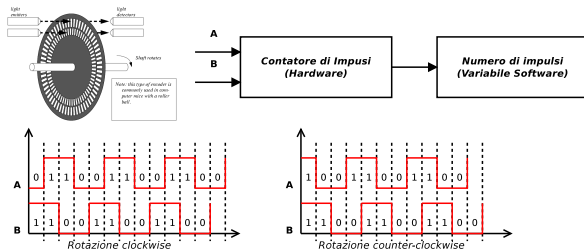


Encoder in Quadratura



- Lo sfasamento di “mezzo tick” comporta che le sequenze generate sui canali A e B siano differenti a seconda della direzione CW o CCW
- Le sequenze di segnali generati sui canali A e B sono:
 - CW: $AB = 01 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 00 \rightarrow 01 \rightarrow 11 \rightarrow \dots$
 - CCW: $AB = 01 \rightarrow 00 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow 01 \rightarrow 00 \rightarrow \dots$

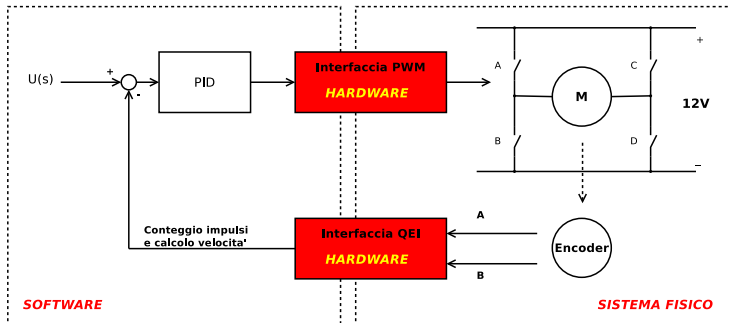
Encoder in Quadratura



- Le interfacce hardware per questo tipo encoder sono dette **QEI - Quadrature Encoder Interface**
- Tali interfacce identificano le differenti sequenze:
 - CW: $AB = 01 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 00 \rightarrow 01 \rightarrow 11 \rightarrow \dots$
 - CCW: $AB = 01 \rightarrow 00 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow 01 \rightarrow 00 \rightarrow \dots$
- Il valore del contatore di impulso viene
 - **incrementato se CW**
 - **decrementato se CCW**

Sistema Finale

- Il sistema complessivo è pertanto il seguente, ed include
 - L'algoritmo del PID (software)
 - L'interfaccia PWM più il ponte-H (hardware)
 - Il sistema motore + encoder (sistema fisico)
 - L'interfaccia QEI (hardware)



Controllo di un Motore Elettrico in Corrente Continua

Corrado Santoro

ARSLAB - Autonomous and Robotic Systems Laboratory

Dipartimento di Matematica e Informatica - Università di Catania, Italy

santoro@dmf.unict.it



Programmazione Sistemi Robotici