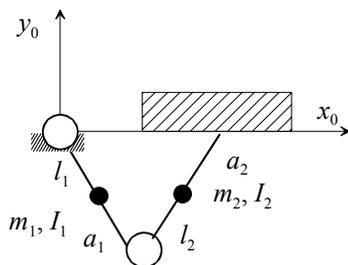


Controllo dei robot

Prof. Paolo Rocco

Controllo in posizione e forza di un robot con giunti elastici



Si consideri il manipolatore planare a due gradi di mobilità studiato nelle esercitazioni precedenti. Si assumano i seguenti valori per i parametri geometrici e fisici dei bracci:

- lunghezze: $a_1 = a_2 = 1$ m
- distanze dei baricentri dagli assi dei giunti: $l_1 = l_2 = 0.5$ m
- masse: $m_1 = m_2 = 50$ kg
- momenti di inerzia baricentrali intorno all'asse z_0 : $I_1 = I_2 = 10$ kg m²

- momenti di inerzia dei motori intorno ai propri assi: $J_{m1} = 5 \cdot 10^{-3}$ kg m², $J_{m2} = 2 \cdot 10^{-3}$ kg m²
- rapporti di trasmissione: $n_1 = n_2 = 100$
- costanti elastiche delle trasmissioni: $K_{el1} = K_{el2} = 70$ Nm/rad
- coefficiente di attrito viscoso trasmissioni $D_{el1} = D_{el2} = 0.05$ Nms/rad

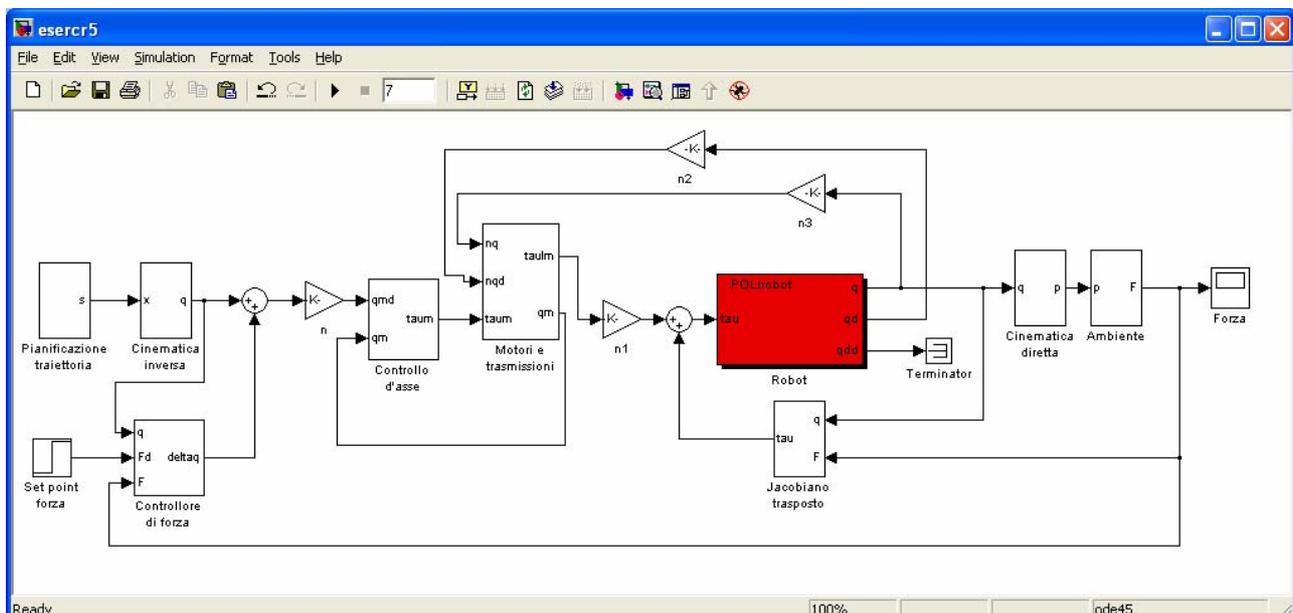
Si consideri il robot inizialmente all'equilibrio, con l'organo terminale nominalmente nel punto (0.2, 0), nella postura a gomito basso. Si supponga inoltre che il manipolatore interagisca con l'ambiente, costituito da un piano parallelo all'asse x_0 e situato alla coordinata sull'asse y_0 pari a $y_e = -3.3 \cdot 10^{-5}$. L'ambiente è ritenuto perfettamente liscio e sostanzialmente rigido: ai fini della simulazione, si ponga la costante elastica dell'ambiente pari a $K_e = 10^7$ N/m.

Utilizzando il sistema di controllo indipendente ai giunti progettato nella precedente esercitazione, si vuole progettare un controllore della forza di contatto, chiuso esternamente agli anelli di controllo di posizione. Il controllore di forza dovrà intervenire opportunamente sui riferimenti di posizione nello spazio dei giunti.

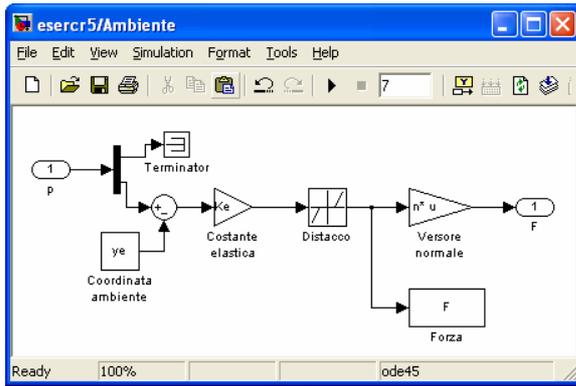
Il comportamento del controllore di forza andrà testato sia per mezzo di una prova di variazione a scalino del riferimento di forza con robot fermo a contatto sia con una prova a set point di forza costante e moto dell'organo terminale lungo l'asse x_0 , per un tratto di 3 cm in 5 s, con una velocità massima di 1 cm/s.

Procedimento

1. Lo schema Simulink completo che simula il sistema di controllo in posizione e forza è il seguente, in cui compaiono, rispetto allo schema utilizzato per il moto libero, un blocco Ambiente, un blocco Jacobiano trasposto ed un blocco Controllore di forza.



2. Il blocco Ambiente può essere realizzato come in figura:



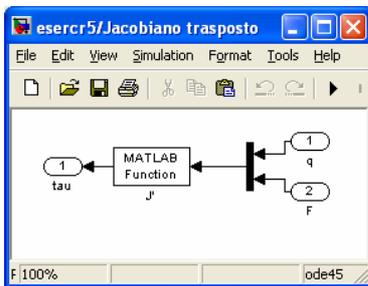
Il blocco non lineare *Distacco* ha uscita nulla quando il suo ingresso è negativo, ovvero quando la coordinata y dell'organo terminale è al di sotto di y_e (e quindi non c'è contatto).

Il vettore normale uscente dalla superficie di contatto è:

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

Il blocco *Vettore normale* determina le componenti del vettore forza sugli assi x_0 e y_0 .

3. Il blocco *Jacobiano trasposto* moltiplica la forza di contatto per la trasposta dello Jacobiano geometrico:

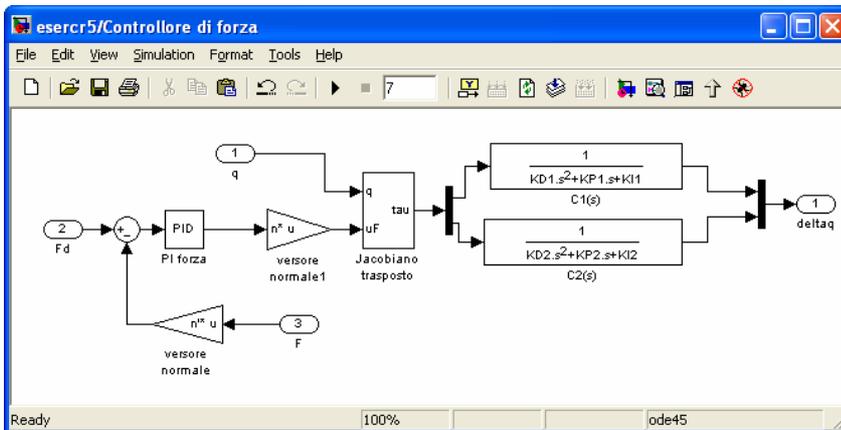


La funzione Matlab da utilizzare è la seguente:

```
jacob0 (r2, u (1:2)) ' * [u (3:4) ; zeros (4, 1) ]
```

(si ricorda che la funzione *jacob0* del Robotics Toolbox restituisce lo Jacobiano completo, con 6 righe, del quale tuttavia qui interessano solo le prime 2).

4. Il blocco *Controllore di forza* esegue la legge di controllo di forza:



L'uscita del regolatore PI di forza deve essere dapprima proiettata sul vettore normale alla superficie di contatto, quindi deve essere moltiplicata per la trasposta della matrice Jacobiana (in modo da assumere il significato di coppia equivalente di controllo). Il segnale che così si ottiene deve essere filtrato attraverso le funzioni di trasferimento che compensano la presenza degli zeri dei regolatori PID:

$$C_i(s) = \frac{1}{K_{Di}s^2 + K_{Pi}s + K_{Ii}}, \quad i = 1, 2 \text{ dove } K_{Pi}, K_{Ii}, K_{Di} \text{ si ottengono dalle formule di equivalenza dei parametri}$$

dei regolatori P/PI utilizzati con i parametri di un regolatore PID. Si osservi che i guadagni ottenuti dalle formule di equivalenza vanno moltiplicati per il quadrato del rapporto di trasmissione (in quanto si riferiscono a grandezze lato motore).

5. Tenendo conto che la funzione di trasferimento dall'uscita del regolatore di forza alla forza controllata è nominalmente $-1/s$, si progetti il regolatore PI di forza in modo da conseguire una banda di 20 rad/s.

6. Si osservi che il bilancio delle coppie da utilizzare per ricavare l'equilibrio iniziale è:

$$N\mathbf{K}_{el}(\bar{\mathbf{q}}_m - N\bar{\mathbf{q}}) + \mathbf{J}^T(\bar{\mathbf{q}})\bar{\mathbf{F}} = \mathbf{g}(\bar{\mathbf{q}})$$

dove $\bar{\mathbf{q}}_m$ sono le posizioni dei motori, pari a quelle prescritte inizialmente dal generatore di traiettoria (riportate agli assi motori). Si può ricavare $\bar{\mathbf{q}}$ in Matlab utilizzando la funzione *fsolve* per la soluzione del sistema implicito non lineare (dove F_d è il valore di riferimento di forza):

```
q0=fsolve(@ (q0) N*Kel*(qm0'-N*q0')-gravload(r2,q0)'+jacob0(r2,q0) '* [n;0;0;0;0]*Fd, qrif0);
```