

Progetto di Co-Design: Analisi delle Forze di Contatto tra Grinder e Superficie

Tommaso Andina

Università di Trento
Dipartimento di Ingegneria Industriale

16 settembre 2024

Relatore: Prof. Andrea Del Prete

Obiettivo del Progetto

- Progetto di co-design: valutare effetto del grinder sull'end-effector.
- Obiettivo: analizzare vibrazioni, stabilità e processo di levigatura.

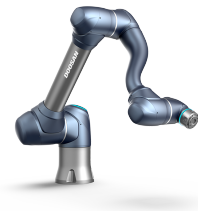


Figura: Robot Doosan H2515

- sommatoria di sinusoidi, con una frequenza compresa nel range $[10, 200]$ Hz

$$F(t) = A \sin(2\pi f \cdot t + \phi)$$

- Equazione della dinamica diretta:

$$\ddot{q} = M(q)^{-1} \cdot (\tau + J^T \cdot F - h(q, \dot{q}))$$

- M matrice di massa,
- τ coppia fornita ai giunti,
- h bias force,
- $J^T \cdot F$, vettore delle forze applicate all'end-effector.

Integrazione Numerica: RK4 vs Eulero

- Dopo aver ottenuto l'accelerazione dei giunti \ddot{q} , si integra per ottenere velocità e posizione.
- **Metodo di Eulero:**

$$x_{n+1} = x_n + h \cdot f(x_n, t_n)$$

- Dopo aver ottenuto l'accelerazione dei giunti \ddot{q} , si integra per ottenere velocità e posizione.
- **Metodo di Eulero:**

$$x_{n+1} = x_n + h \cdot f(x_n, t_n)$$

- **Metodo RK4:**

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

- Maggiore accuratezza.

- Controllore PD per minimizzare l'errore tra posizione desiderata e attuale.
- Equazione del controllore:

$$\tau = K_p (q_{des} - q) + K_d (\dot{q}_{des} - \dot{q})$$

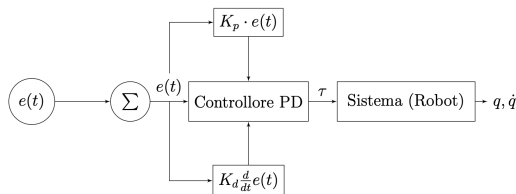


Figura: Diagramma a blocchi del controllore PD

Controllo PD - scelta parametri

- Processo trial to error

$$\|e(t)\|_{\infty} = \max |e_i(t)|$$

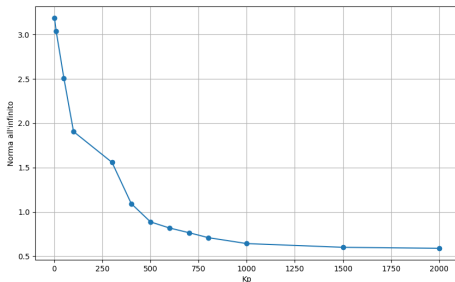


Figura: norma all'infinito rispetto al K_p

Simulazione nel Joint Space

- Simulazione effettuata con un $K_p = 1000$

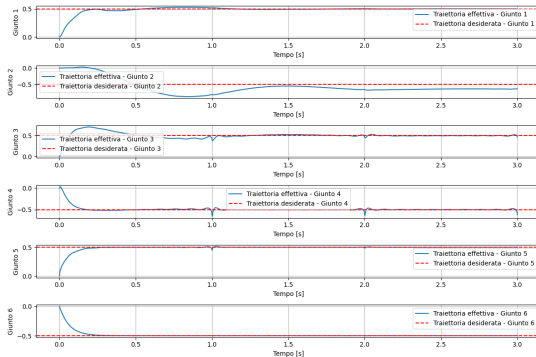


Figura: Traiettoria desiderata q_{des} rispetto a q

- Sistema massa-molla-smorzatore.

$$\Lambda \ddot{e} + B \dot{e} + K e = f_{ext}$$

- $e = x_{ref} - x$: errore di tracciamento,
- Λ, B, K : Matrice di Inerzia, di Smorzamento e di Rigidità,
- f_{ext} : forze esterne

Algorithm 1 Schema del ciclo di simulazione per (IC)

Require: N_{control} : Numero di passi di controllo, t : tempo iniziale, x_0 : stato iniziale, dt_{control} : time step controllore,

$dt_{\text{simulazione}}$: time step simulazione

```
1: for  $i = 0$  to  $N_{\text{control}} - 1$  do
2:    $t_{\text{start}} \leftarrow$  tempo corrente
3:    $x_{\text{ref}}, dx_{\text{ref}}, ddx_{\text{ref}} \leftarrow \text{generate\_sin\_trajectory}(t, x_0)$   $\triangleright$  Generazione della traiettoria di riferimento
4:    $M, h, J_{\text{full}}$   $\triangleright$  Calcolo delle dinamiche del sistema
5:    $ddx_{\text{fb}} \leftarrow K_p(x_{\text{ref}} - x) + K_d(dx_{\text{ref}} - dx)$   $\triangleright$  Calcolo del feedback di impedenza (PD)
6:    $\tau \leftarrow J_{\text{full}}^T \cdot f + N_J \cdot (\tau_0 + h)$ 
7:   for  $j = 1$  to  $\frac{dt_{\text{control}}}{dt_{\text{simulazione}}}$  do  $\triangleright$  Inizializza simulazione con time step ridotto
8:      $\text{simu.simulate}(\tau, dt_{\text{simulazione}})$ 
9:     Controlla  $ddx$  e verifica stabilità
10:  end for
11:   $t \leftarrow t + dt_{\text{control}}$   $\triangleright$  Aggiorna il tempo per il controllore
12: end for
```

Determinazione del parametro $k_{attrito}$

- Valutazione della forza normale e della superficie

$$F_n = K \cdot (\Delta z) + C \cdot v_z$$

- Introduzione della forza di attrito

$$F_{attrito} = -k_{attr} \cdot F_n \cdot \frac{v_t}{\|v_t\|}$$

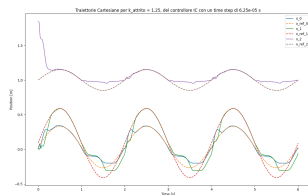
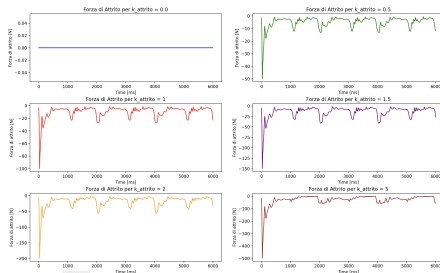
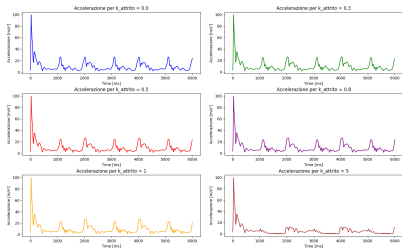


Figura: simulazione con $k_{attrito} = 0$

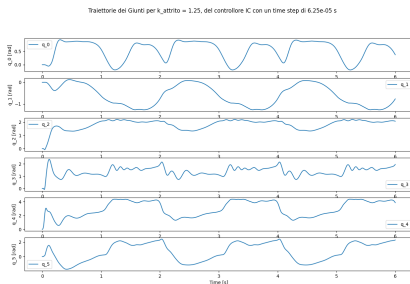
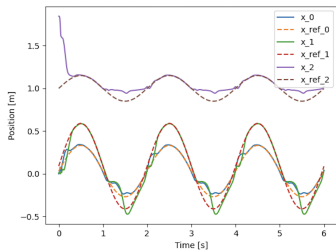
Determinazione del parametro $k_{attrito}$

- Traiettoria sinusoidale dell'end-effector,
- Superficie messa ad un metro di altezza.



Determinazione del parametro $k_{attrito}$

- Simulazione su una superficie rigida e si è scelto un $k_{attrito} = 1.25$.



Accuratezza della Simulazione

- Metrica di riferimento norma

$$e(t) = \|x_{ref}(t) - x(t)\|_{\infty}$$

- Time step di riferimento $\delta = 1/64$ ms

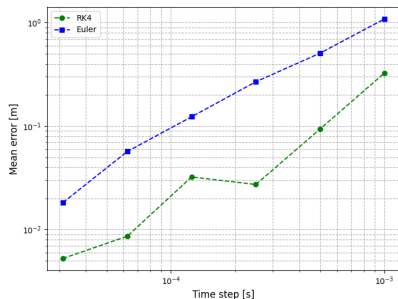


Figura: Confronto dell'accuratezza tra RK4 e Eulero

Grazie per l'attenzione!