

Giovanni Legnani, Irene Fassi

# Robotica Industriale

Edizione Città Studi - isbn 978-88-251-7428-1 - Aprile 2019

<http://robotics.unibs.it>inviare commenti e suggerimenti a  
[giovanni.legnani@unibs.it](mailto:giovanni.legnani@unibs.it), [irene.fassi@cnr.it](mailto:irene.fassi@cnr.it)

## Errata Corrige ed Ampliamenti 12 marzo 2025 16:42

riga n: n-esima riga da inizio pagina

riga -n: n-esima riga dal fondo

pagina	riferimento	errata	corrige
3	riga 7	1090	1890
34	riga 19	$r \dots R$	$ l_2 - l_1  \leq r \leq R \leq l_2 + l_1$
48	tab. 2.1	$F_s = -JF_q$	$F_s = -J^{-T}F_q$
48	2 righe sotto (2.4.1)	differenziazione	differenziazione
53	sopra (2.8.5)	nella seguenti	nelle seguenti
55	fig. 2.5	$G_{(Q \dots)}$	$G_{1(Q \dots)}$
58	fig. 2.8	$v_n$	$v_n = 0$
59	riga -7	alcuni termini di $J$	alcuni termini di $J^{-1}$
59	riga -2	cinetostatiche	cinetostatiche
60	riga -4	allineati ai due	allineati, i due
62	sopra $\mathcal{M} = \text{diag}(\dots)$	la rispettive	le rispettive
65	sopra (2.11.2)	dalla relazioni	dalle relazioni
70	riga -7	rappresentazioni	rappresentazione
71	riga -12	ellissi di ripetibilità	metterle in grassetto "ellissi di ripetibilità" e rimandare a figura 17.3 (pag 633) cui va aggiunta l'ellissi
72	riga 4	dell i-esimo	dell'iesimo

pagina	riferimento	errata	corrige
72	3 righe sotto (2.13.3)	il suo centro trasla	il loro centro trasla
74	riga 4	forze ad	forze e
74	riga -15	del'ellisse	dell'ellisse
74	eq. 2.13.5	$k_s$	$K_s$
79	riga -9	direzione $u_2$	direzione $u_1$
79	riga -8	direzione $u_1$	direzione $u_2$
82	eq. (2.15.4)	$\text{atan2}(u, v)$	$\text{atan2}(v, u)$
84	titolo 2.17	3GDLGDL	3GDL
85	riga -9	$(\gamma = \pm\pi \dots$	$(\gamma = \pm\pi/2 \dots$
91	riga -14	$(1 - t^2)(1 + t^2)$	$(1 - t^2)/(1 + t^2)$
92	riga 8	$[dx/dy]$	$[dy/dx]$
94	eq. 2.23.1	$F_{qm} = -T^T F_q; \dot{Q}_m^T F_{qm} + \dot{Q}^T F_q = 0$	$F_{qm} = -T^T(-F_q); \dot{Q}_m^T F_{qm} + \dot{Q}^T(-F_q) = 0$
95	fig. 2.44	aggiornare segni di $F_q$ e direzioni frecce, vedi figura più avanti.	
97	seconda eq.	$\gamma = \alpha - \beta$	$\gamma = 90^\circ - \beta$
98	riga -4	un soluzione	una soluzione
106	riga 3	analogamente le colonne.	analogamente le righe.
108	riga -12	succssivi	successivi
111	riga 3	$90^\circ$	$180^\circ$
120	eq.riquadro	$R_{10}^T$	$R_{01}^T$ (correggere 2 volte)
170	fig. 6.3	la terna (4) del TCP è erroneamente sinistra. Scambiare $x_4$ con $y_4$ .	
170	riga -4	coincidente	coincidente (o contrario)
188	riga 4	$(d + \dots)$	$(d + \dots)^2$
193	riga -8	$s_6 = +c_5 \dots$	$c_6 = +c_5 \dots$
193	riga -7	$c_6 = -s_{234} \dots$	$s_6 = -s_{234} \dots$
221	riga 7	passi	assi
229	2° eq.	$\left[ \begin{array}{ccc c} \dots & \ddot{\alpha} + \ddot{\beta} & \dots & \dots \\ \dots & & & \\ \dots & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{ccc c} \dots & -\ddot{\alpha} - \ddot{\beta} & \dots & \dots \\ \dots & & & \\ \dots & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$
239	riga 6 riquadro iniziale	potra	potrà
239	riga 8 riquadro iniziale	dei questi concetti	di questi concetti
256	riga 3	$\Phi_i^\wedge$	$\Phi_i$
256	prima eq	$H_{ok} J_k$	$H_{0i} J_i$

pagina	riferimento	errata	corrigere
256	prima eq	$H_g J$	$H_g J_i$
256	ultima eq	$\Phi_i^\wedge$	$\Phi_j^\wedge$
257	riga 3	La prima modo consiste	la prima consiste
266	(14)	$-\Phi_{i(0)}^* + L_{i(0)}$	$-\Phi_{i(0)}^* \odot L_{i(0)}$
275	eq. (8.8.2)	$-J_q$	$+J_q$
275	eq. (8.8.5)	$-J_q$	$+J_q$
284	eq. (8.14.2)	$\dots + (x - x_b)^2$	$\dots + (y - y_b)^2$
284	eq. (8.14.3)	$\dots \sqrt{\dots + (x - x_b)^2}$	$\dots \sqrt{\dots + (y - y_b)^2}$
285	sopra (8.14.6)	(fig. 8.11)	(fig. 8.9, 8.11)
285	eq. (8.14.6)	$\dots + (x - x_b)^2$	$\dots + (y - y_b)^2$
287	riga 17	arcontangente	arcotangente
286	sopra (8.14.7)	(fig. 8.12)	(fig. 8.9, 8.12)
286	eq. (8.14.7)	$\dots + (x_1 - x_a)^2$	$\dots + (y_1 - y_a)^2$
286	eq. (8.14.8)	$\dots + (x - (y_2 \dots$	$\dots + (y - (y_2 \dots$
287	eq. (8.14.9)	$x - (y_2 \dots$	$y - (y_2 \dots$
287	eq. (8.14.9)	$\begin{array}{ c c } \hline \dots & \dots \\ \hline \dots & x - x_b \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{ c c } \hline \dots & \dots \\ \hline \dots & y - y_b \\ \hline \end{array}$
287	eq. (8.14.11)	$\dots)l_a$	$\dots)l_1$ (2 volte)
287	eq. (8.14.11)	$(x - x_a)$	$(x - x_1)$
287	eq. (8.14.11)	$(x - x_b)$	$(x - x_2)$
287	eq. (8.14.11)	$(y - y_a)$	$(y - y_1)$
287	eq. (8.14.11)	$(x - y_2 \dots)l_b$	$(y - y_2 \dots)l_2$
287	eq. (8.14.11)	$(x - y_b) \dots)l_b$	$(y - y_2) \dots)l_2$
288	riga 22 e seguenti	raggio minore $r_1 = l_1 + l_a$ , e raggio maggiore $R_1 =  l_1 - l_a  \dots$ raggio minore $r_2 = l_2 + l_a$ , e raggio maggiore $R_2 =  l_2 - l_a $	raggio maggiore $R_1 = l_1 + l_a$ , e raggio minore $r_1 =  l_1 - l_a  \dots$ raggio maggiore $R_2 = l_2 + l_a$ , e raggio minore $r_2 =  l_2 - l_a $
296	riga -15	spostare $H = \dot{W} + W^2$ 2 righe sotto	
304	g)	elettrico)	elettrici)
309	formule cicloidale	$p_{max} = \dots \sqrt{3}m \dots$	$p_{max} = \dots \sqrt{3} \dots$
309	sopra did. fig 9.5	$V/(t_0 - t_1)$	$V/(t_1 - t_0)$
310	riga -1	$0 \geq \lambda_2$	$0 \leq \lambda_2$
315	-7	eseguita	eseguiti
315	ultima formula	$\frac{d^n}{dt^n} s_2(t) = \frac{d^n}{dt^n} s_1(t/\lambda) \frac{1}{\lambda^n}$	$\frac{d^n}{d\tau^n} s_2(\tau) \Big _{\tau=t} = \frac{1}{\lambda^n} \frac{d^n}{d\tau^n} s_1(\tau) \Big _{\tau=t/\lambda}$ $\forall$ istante di tempo $t$
317	riga 5	$v_m$	$V$
324	eq 9.8.1	$T_j \leq t \leq T_{j+1}$	$T_j + t_j/2 \leq t \leq T_{j+1} - t_{j+1}/2$
325	ultime 2 equazioni	$\ddot{\vartheta}_n$	$-\ddot{\vartheta}_n$
326	fig. 9.21	fittizzi	fittizi

pagina	riferimento	errata	corrige
329	riga -2	$\bar{d}$	$\bar{d}_j$
330	riga 1	$\bar{c}$	$\bar{c}_j$
330	riga -1	ai vincoli	i vincoli
334	riga 3 di §9.9.1	indicato	indicata
334	riga -3	un,automobile	un'automobile
335	eq. 9.9.2	$\frac{\partial^2 P}{\partial \lambda^2} \dot{\lambda}$	$\frac{\partial^2 P}{\partial \lambda^2} \dot{\lambda}^2$
336	eq. 9.9.5	$P = P_1 + \dots$	$P = P_c + \dots$
336	sotto (9.9.5)	opportuna	opportuna
336	eq. 9.9.6 (ultima)	$\dot{P} =$	$\ddot{P} =$
337	eq. 9.9.7	segni in $\frac{\partial}{\partial \alpha} R \dots$	$\frac{\partial}{\partial \alpha} R = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha) & -\cos(\alpha) \\ \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \end{bmatrix}$
342	eq. 9.9.18	$L$	$L_i$
342	eq. 9.9.19	$t_a = \dots \quad t_c =$	$t_{ai} = \dots \quad t_{ci} =$
343	eq. 9.9.22	$u_i$	$u$ (correggere 2 volte)
344	riga 4	1 .2 2.5	1 0.2 2.5
345	fig. 9.37	300 mm	330 mm
352	eq. 9.11.1	$F = \dots - 6 \frac{\Delta s}{T^5}$	$F = \dots + 6 \frac{\Delta s}{T^5}$
355	riga 3	$v^2/3$	$v^2/r$
362	fig. 10.4	azion	amplificatore di potenza (azionamento)
362	fig. 10.4	$\omega_0$	$\Omega_0$
362	fig. 10.4	eomg	$e_\Omega$
362	fig. 10.4	rego	regolatore
362	fig. 10.4	amplific.	amplificatore di potenza
362	fig. 10.4	moto	motore
362	fig. 10.4	retroazio	retroazione di velocità
362	fig. 10.4	rpo	retroazione di posizione
362	riga 6	$\omega_0 = \dot{\vartheta}_0$	$\Omega_0 = \dot{\vartheta}_0$
372	punto e)	$\Omega_T$	$\omega_T$
372	punto e)	$\Omega$	pulsazione
373	Fig. 10.17	$\omega_t$	$\omega_T$
390	punto c)	la sua frequenza	la frequenza
391	fig. 10.40	$u_1 = f(\bar{q}_1, q_1), u_2 = f(\bar{q}_2, q_2)$	$u_1 = f_1(\bar{q}_1, q_1, \bar{q}_2, q_2)$ $u_2 = f_2(\bar{q}_1, q_1, \bar{q}_2, q_2)$
396	riga 12	PI	PD
399	riga 1 di §10.5.2	dotata	dotato

pagina	riferimento	errata	corrige
402	riga 9	Il blocco regolatore $R$ , in base all'errore $e_s, \dots$	$\dots R' \dots$
407	1° eq.	$\frac{X_1 - \dots}{\dots}$	$\frac{X_0 - \dots}{\dots}$
421	riga 15	posizionalento	posizionamento
425	ultima riga	parrabbaro	parrebbero
439	dopo (12.2.1)	asseconda	assecondo
440	riga -5	$\theta_1 )$	$\theta_1)$
454	riga 11	$(\omega_b = 0)$	$(\omega_p = 0)$
487	riga -3	tute	tutte
488	riga 3 del §12.9	ausiliari	ausiliari.
531	riga 5	$C_{\alpha\beta}$	$C_{\alpha\beta}$
534	dopo punto 4.	raffinazione	raffinzioni
536	riga -4	Il seconda	La seconda
545	fig. 14.6	$x_i - 1 \quad z_i - 1$	$x_{i-1} \quad z_{i-1}$
572	riga 18	<a href="http://https://">http://https://</a>	<a href="https://">https://</a>
578	riga -6 del §15.8.2	un'importante	un importante
593	6	interbolechi	interblocchi
598	riga -8 del §15.12	forze massimi	forze massime
614	riga -1	robot	robot.
619	riga 13	la frase <Anche qui le prove ...percorso 1.> va eliminata. Il concetto è affrontato nelle ultime righe del §16.4	
621	fig. 16.7	$t$ (in asse delle ordinate)	Posizione
621	riga 2	$\sigma$	$\sigma_d$
621	riga 1 del §16.8	posizionamento("	posizionamento ("
623	riga 8 del §16.11	rettilineo	rettilineo
629	riga -12	proiezioni	sezioni
630	riga 3	specificate	specificati
631	3° punto elenco del §17.4.9	(quando	quando

pagina	riferimento	errata	corrigere
633	figura 17.3	*figura e didascalia*	*aggiungere ellisse nel parallelogramma e aggiungere rimando a ellissi di ripetibilità (pag. 71)*
654	riga -2	L1	II
663	riga 3	rettangolare	quadrata
663	eq. c.1.2	$\ x\ $	$\ x\ ^2$
664	eq. c.1.3	$\ e\ $	$\ e\ ^2$
664	riga 5	... $x^{\wedge}$ che forniscono ...	... $x$ che forniscono ...
665	eq.	$\ (D_1e)\ $	$\ (D_1e)\ ^2$
665	eq.	$\ (D_2e)\ $	$\ (D_2e)\ ^2$
670	4° eq.	... $J(q_i)^{-1}(F(Q))$ ...	$J(Q_i)^{-1}(F(Q_i))$ ...
696	G.1.8	PRORAMMA	PROGRAMMA (correggere 2 volte)

# Capitolo 1

## chiarimenti o precisazioni

### 1.1 — Pag. 338, §9.9.3 —

Al termine del §9.9.3 aggiungere:

Quindi si può fissare una terna ausiliaria ( $a$ ) con origine in  $P_c$  e orientata come definito da  $\overline{R}$  [\*\*è la terna che contiene gli assi  $\overline{x} \overline{y} \overline{z}$ \*\*]. In questa terna l'asse  $x$  punta da  $P_c$  verso  $P_0$  e quindi  $P_{0(a)} = [\rho \ 0 \ 0 \ 1]^T$ , tutti i punti giaceranno nel piano  $xy$  e quindi avranno  $z = 0$ .

Una volta determinate le coordinate  $xy$  di un punto del cerchio con procedura analoga a quella della eq. (9.9.6) (e le sue derivate) esse possono essere inserite in matrici colonna  $P_{xy} = [x \ y \ 0 \ 1]^T$ ,  $\dot{P}_{xy} = [\dot{x} \ \dot{y} \ 0 \ 0]^T$ ,  $\ddot{P}_{xy} = [\ddot{x} \ \ddot{y} \ 0 \ 0]^T$ .

Se assumiamo che il centro del cerchio sia nell'origine della terna ( $a$ ) e che l'arco parta da  $P_0$  verso  $P_1$ , allora  $P_{xy} = R(\alpha)P_{0(a)}$  e posto  $T = {}^3P_c = [x_c \ y_c \ z_c]^T$  (nel sistema  $xyz$ ) è possibile scrivere la matrice di trasformazione  $M$

$$M = \left[ \begin{array}{ccc|c} \overline{R} & & & T \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

La posizione, velocità, ed accelerazione di ogni punto sono dunque:

$$P_{xyz} = MP_{xy}; \quad \dot{P}_{xyz} = M\dot{P}_{xy}; \quad \ddot{P}_{xyz} = M\ddot{P}_{xy};$$

#### alternativa

Alternativamente, dopo avere determinato il centro del cerchio  $P_c$  e considerando un asse  $u = \overline{z}$  uscente dal centro e perpendicolare al piano di giacitura del cerchio, si può ruotare il vettore  $P_0 - P_c$  attorno ad esso (ricorda eq. 3.1.1, 4.7.6)

$${}^3P = {}^3P_c + R(\alpha)(P_0 - P_c)$$

con

$$R(\alpha) = [1] + \underline{u} \sin(\alpha) + \underline{u}^2 (1 - \cos(\alpha)) \quad \alpha = s/\rho$$

(il simbolo  ${}^3$  a sinistra di un vettore colonna indica un vettore di 3 elementi).

1.2 — aggiornamento figure e tabelle —

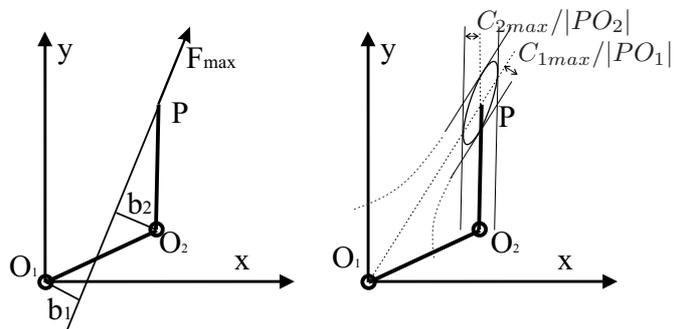


Figura 2.22 Determinazione delle forze massime esercitabili da un manipolatore SCARA.

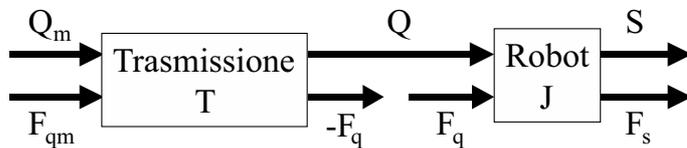


Figura 2.44 Schema della connessione trasmissione-robot.

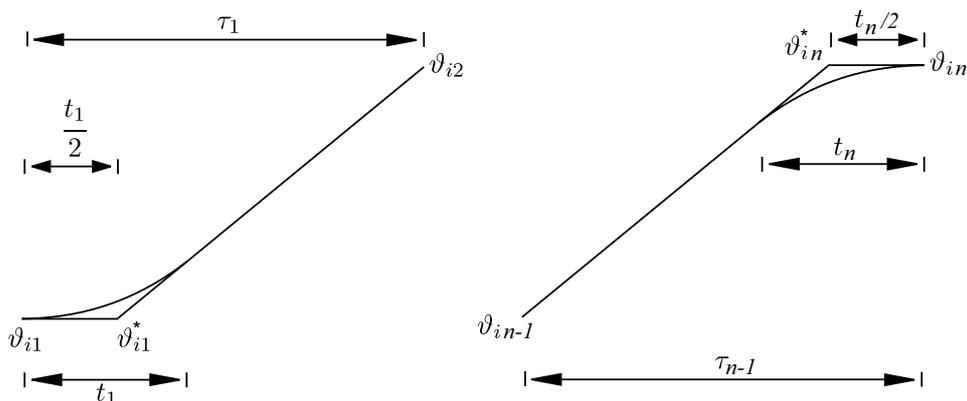


Figura 9.20 Costruzione del primo e ultimo tratto di una legge "rette-parabole" (asse  $i$ ).

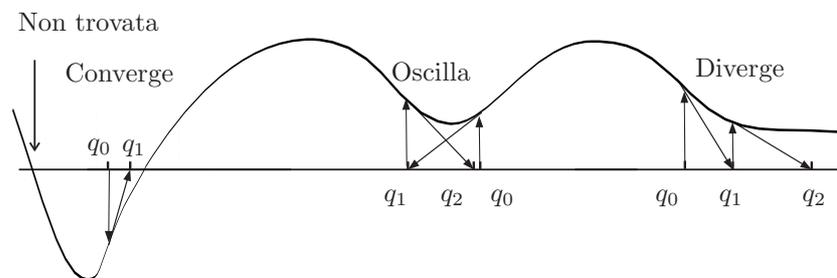


Figura D.2 Casi di soluzione non trovata, convergenza e non convergenza dell'algoritmo di N-R.

funzione diretta	funzione inversa	singolarità		risolubilità
$A = q_i^2$	$q_i = \pm\sqrt{A}$	$A = 0$	$q_i = 0$	$A \geq 0$
$Aq_i^2 + Bq_i + C = 0$	$q_i = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2A}$	$\Delta = B^2 - 4AC = 0$		$\Delta \geq 0$
$A = \cos(q_i)$	$q_i = \pm \operatorname{acos}(A)$	$A = \pm 1$	$q_i = 0, \pi$	$ A  \leq 1$
$A = \sin(q_i)$	$q_i = \begin{cases} \operatorname{asin}(A) \\ \pi - \operatorname{asin}(A) \end{cases}$	$A = \pm 1$	$q_i = \pm\pi/2$	$ A  \leq 1$
$\begin{cases} x = \lambda \cos(q_i) \\ y = \lambda \sin(q_i) \end{cases}$	$\begin{cases} q_i = \operatorname{atan2}(y, x) \text{ } (^+) \\ q_i = \operatorname{atan2}(-y, -x) \text{ } (-) \\ q_i = \operatorname{atan2}(y, x)(\pm k\pi) \text{ } (?) \end{cases}$	$x = y = \lambda = 0$	$q_i$ qualsiasi	$x^2 + y^2 > 0$

**Tabella 2.2** Casi singolari più frequenti [ultimo caso in funzione del segno di  $\lambda$ : (+) se  $\lambda > 0$ , (-) se  $\lambda < 0$ , (?) se  $\lambda$  ignoto].