



گروه رباتیک ارس

آموزش رباتیک برای مهندسان:

چالش ها و چشم انداز آینده



بخش دوم: جزئیات برنامه آموزشی

در این بخش جایگاه درس رباتیک مقدماتی در برنامه پیشنهادی آموزش رباتیک برای مهندسان معرفی می شود. در ابتدا زنجیره های درسی پیشنهادی در این برنامه معرفی شده و جایگاه مهم درس رباتیک مقدماتی عنوان می شود. سپس محتوای آموزشی این درس با ارائه گزیده ای از مطالب اصلی در آن برای ارائه در دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد به تفکیک بیان خواهد شد. در نهایت نیز محتوای درس کنترل در رباتیک یا رباتیک پیشرفته با بیان گزیده ای از محتوای آموزش آن، ارائه خواهد شد.



به کارگاه تخصصی آموزش رباتیک برای مهندسان خوش آمدید

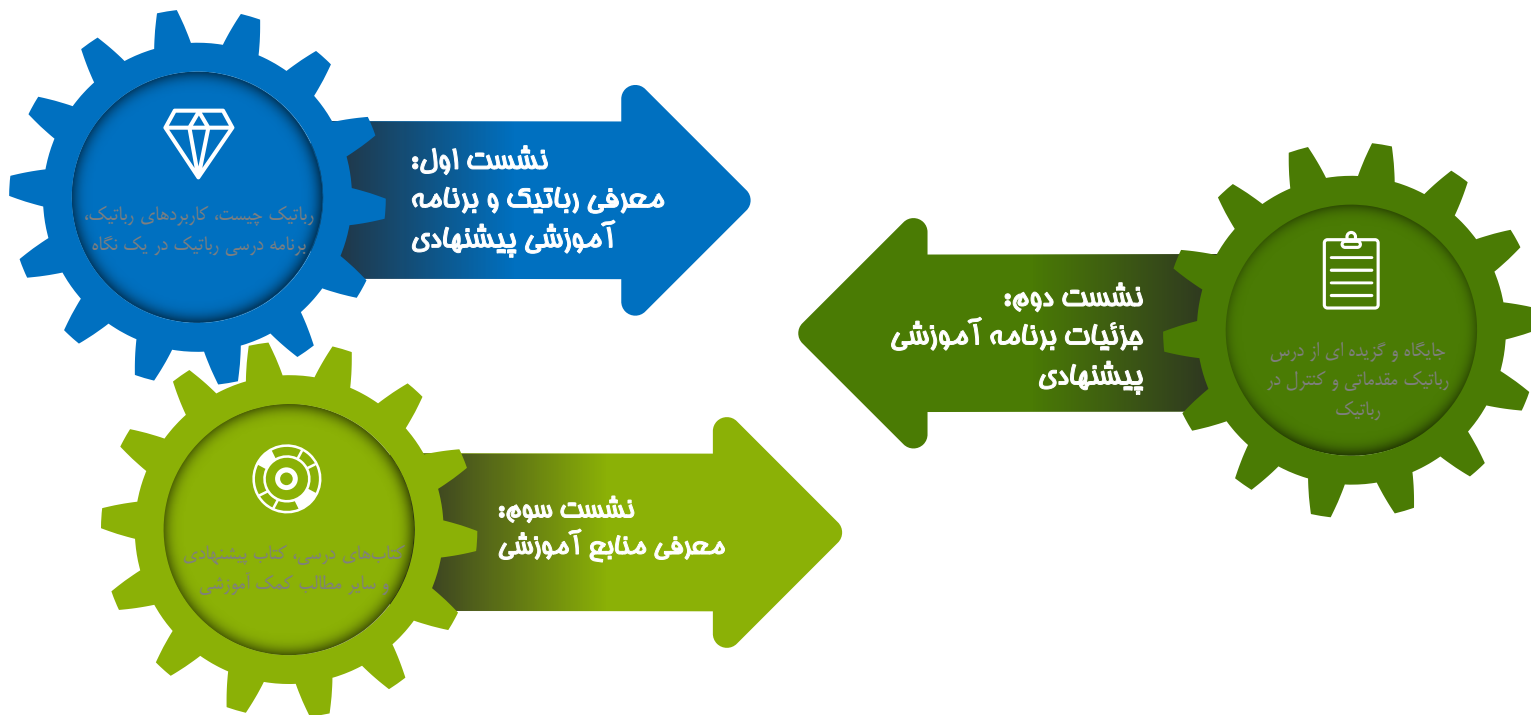




در باره گروه رباتیک ارس

گروه رباتیک ارس از ۱۳۷۶ و با بیش از ۲۶ سال تجربه، خدمات خود را در گسترش آموزش مهندسی و پژوهش در لبه‌های دانش را در زمینه تحلیل و طراحی سیستم‌های دینامیکی در کاربرد رباتیک ارائه می‌دهد. گروه رباتیک ارس به خوبی توسط کارشناسان صنعتی، پژوهشگران و شخصیت‌های علمی دانش آموخته خود و همچنین با سوابق فراوان موفق پروژه‌های تحقیق و توسعه خود در سراسر کشور و در جوامع علمی بین‌المللی شناخته می‌شود. مهمترین پشته‌های این گروه ظرفیت نیروی انسانی وسیع گروه است که تمام سعی و اهتمام خود را به گسترش دانش و فناوری معطوف نموده‌اند. یکی از مهمترین اهداف گروه استفاده از این پتانسیل‌ها به منظور گسترش ارتباطات آکادمیک و صنعتی در سطح ملی و بین‌المللی است. ماموریت گروه رباتیک ارس توسعه پهنه دانش و تعمیق کیفیت آموزش و پژوهش در یک محیط پویا و شاداب است.

نشست‌های علمی کارگاه در یک نگاه



جایگاه درس رباتیک مقدماتی

معرفی زنجیره های درسی پیشنهادی در برنامه آموزشی رباتیک و جایگاه درس رباتیک مقدماتی

گزیده ای از درس رباتیک مقدماتی

۳ سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

گزیده ای از درس رباتیک مقدماتی

۲ سال پایانی دوره کارشناسی (مهندسی برق، مکانیک یا کامپیوتر)

گزیده ای از درس کنترل در رباتیک

۴ سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

در این بخش جایگاه درس رباتیک مقدماتی در برنامه پیشنهادی آموزش رباتیک برای مهندسان معرفی می شود. در ابتدا زنجیره های درسی پیشنهادی در این برنامه معرفی شده و جایگاه مهم درس رباتیک مقدماتی عنوان می شود. سپس محتوای آموزشی این درس با ارائه گزیده ای از مطالب اصلی در آن برای ارائه در دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد به تفکیک بیان خواهد شد. در نهایت نیز محتوای درس کنترل در رباتیک یا رباتیک پیشرفته با بیان گزیده ای از محتوای آموزش آن، ارائه خواهد شد.

• جایگاه آموزش رباتیک مقدماتی

✓ سال پایانی دوره کارشناسی (مهندسی برق، مکانیک یا کامپیوتر)

✓ سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

✓ پایه اصلی در زنجیره‌های آموزشی زیر

□ زنجیره آموزشی : رباتیک مقدماتی - کنترل در رباتیک

□ زنجیره آموزشی : رباتیک مقدماتی - ربات‌های موازی

✓ پیش نیاز در زنجیره آموزشی

□ زنجیره درسی : بینایی ماشین در رباتیک - هوش مصنوعی در رباتیک

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: کلیات

زنجیره غیر مستقیم

هوش مصنوعی
در رباتیک

گزینه چهارم | ۴

زنجیره غیر مستقیم

بینایی ماشین
در رباتیک

گزینه سوم | ۳

زنجیره مستقیم

ربات‌های
موازی

گزینه دوم | ۲

زنجیره مستقیم

کنترل در
رباتیک

گزینه اول | ۱

جایگاه آموزش رباتیک مقدماتی

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: کلیات

• ساختار درس رباتیک مقدماتی (سال پایانی دوره کارشناسی (مهندسی برق، مکانیک یا کامپیوتر)



برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: کلیات

• ساختار درس رباتیک مقدماتی (سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکترونیک یا کامپیوتر)

فصل چهارم

ماتریس ژاکوبی: روش بستار ملقه سرعت، روش
جامع تعیین ماتریس ژاکوبی، روش مبتنی بر
پیچ، ارائه چندین مثال، وضعیت تکن و ویژگی
های پایای ماتریس ژاکوبی

فصل پنجم

روش لاگرانژ در تحلیل دینامیکی، شبیه سازی
مرکت ربات، دینامیک عملگر به همراه
معبه دنده، مدل قطی یک مفصل ربات.

فصل ششم

کنترل مرکت ربات: روش های کنترل قطی، رفع
اغتشاش و فضای ماندگار، طراحی کنترل PD و
PID، طراحی کنترلگر قطی با پیشفهر، معرفی
روش کنترل دینامیک وارون.

فصل سوم

تلیل سینماتیکی: روش بستار ملقه، روش
دناویت هارتنبرگ، روش مبتنی بر پیچ، تلیل
سینماتیک مستقیم، ارائه چندین مثال، مختصری
در فصوص مل مساله سینماتیک وارون

فصل دوم

توصیف مرکت: مکان و جهت گیری، ماتریس
دوران، زاویه های اوپلر، پیچ و چهارگان، قانون
طلایی در تعیین سرعت و شتاب، رابطه سرعت
زاویه ای با نرخ ماتریس دوران، نرخ زوایای اوپلر
و نرخ چهارگان

فصل اول

رباتیک چیست، کاربردهای رباتیک، زمینه
های تمقیقاتی در رباتیک



برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: کلیات

• ساختار درس کنترل در رباتیک



مروری بر سینماتیک
مستقیم و ماتریس ژاکوبی

کنترل نیرو: روش های کنترل
سفتی، کنترل مستقیم نیرو،
کنترل ترکیبی و کنترل امپدانس

کنترل حرکت چند متغیره و غیر قطبی
ربات: روش دینامیک وارون، روش های
مقاوم و تطبیقی

تملیل دینامیکی ربات با استفاده از روش لاگرانژ:
معرفی روش، روش مستقیم، روش بازگشتی، ویژگی
های معادلات دینامیکی، ماتریس کریستوفل،
دینامیک عملگر، معادلات دینامیکی موثر ربات

طراحی مسیر حرکت ربات: روش های چند
جمله ای، قطبی سهمی، زمان بهینه، شبیه
سازی حرکت ربات، نرم افزارهای شبیه سازی
دینامیکی، روش های کالیبراسیون ربات.

کنترل حرکت ربات: روش های کنترل قطبی،
رفع اغتشاش و قطبی ماندگار، طراحی
کنترل PD و PID

جایگاه درس رباتیک مقدماتی

معرفی زنجیره های درسی پیشنهادی در برنامه آموزشی رباتیک و جایگاه درس رباتیک مقدماتی

گزیده ای از درس رباتیک مقدماتی

۳ سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

گزیده ای از درس رباتیک مقدماتی

۲ سال پایانی دوره کارشناسی (مهندسی برق، مکانیک یا کامپیوتر)

گزیده ای از درس کنترل در رباتیک

۴ سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

در این بخش جایگاه درس رباتیک مقدماتی در برنامه پیشنهادی آموزش رباتیک برای مهندسان معرفی می شود. در ابتدا زنجیره های درسی پیشنهادی در این برنامه معرفی شده و جایگاه مهم درس رباتیک مقدماتی عنوان می شود. سپس محتوای آموزشی این درس با ارائه گزیده ای از مطالب اصلی در آن برای ارائه در دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد به تفکیک بیان خواهد شد. در نهایت نیز محتوای درس کنترل در رباتیک یا رباتیک پیشرفته با بیان گزیده ای از محتوای آموزش آن، ارائه خواهد شد.

• گزیده‌ای از مباحث درس رباتیک مقدماتی:

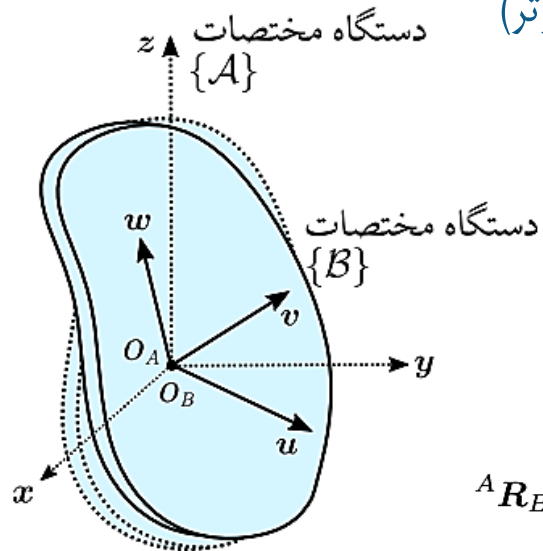
✓ سال پایانی دوره کارشناسی (مهندسی برق، مکانیک یا کامپیوتر)

□ تعریف ماتریس دوران

$${}^A R_B := \left[\begin{array}{c|c|c} {}^A \hat{x}_B & {}^A \hat{y}_B & {}^A \hat{z}_B \end{array} \right] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

□ استفاده از ضرب برداری

$${}^A R_B = \left[\begin{array}{c|c|c} {}^A \hat{x}_B & {}^A \hat{y}_B & {}^A \hat{z}_B \end{array} \right] = \begin{bmatrix} \hat{x}_B \cdot \hat{x}_A & \hat{y}_B \cdot \hat{x}_A & \hat{z}_B \cdot \hat{x}_A \\ \hat{x}_B \cdot \hat{y}_A & \hat{y}_B \cdot \hat{y}_A & \hat{z}_B \cdot \hat{y}_A \\ \hat{x}_B \cdot \hat{z}_A & \hat{y}_B \cdot \hat{z}_A & \hat{z}_B \cdot \hat{z}_A \end{bmatrix}$$



• ویژگی های ماتریس دوران

✓ دترمینان ماتریس دوران برابر واحد است

$$\det({}^A R_B) = 1$$

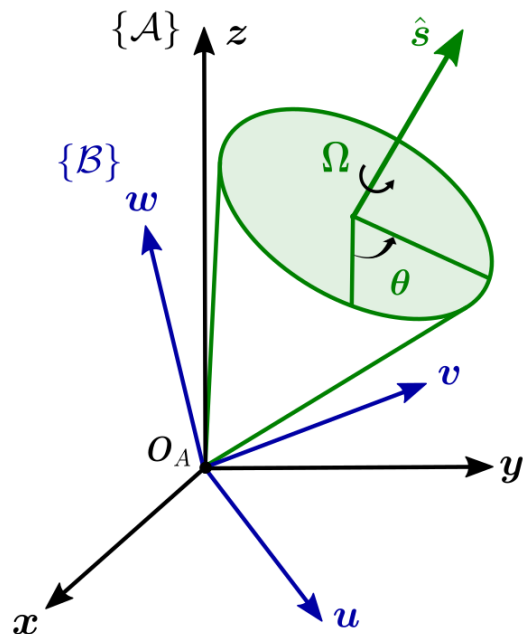
✓ مقادیر ویژه ماتریس دوران برابر است با

$$1, e^{i\theta} \text{ و } e^{-i\theta}$$

✓ زاویه و محور آنی دوران

□ زاویه آنی دوران برابر θ است.

□ محور آنی دوران همان بردار ویژه حقیقی ماتریس دوران است



برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• تحلیل سینماتیکی:

✓ سینماتیک مستقیم و وارون

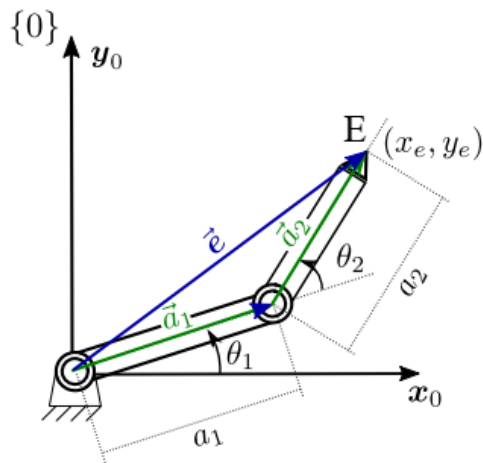
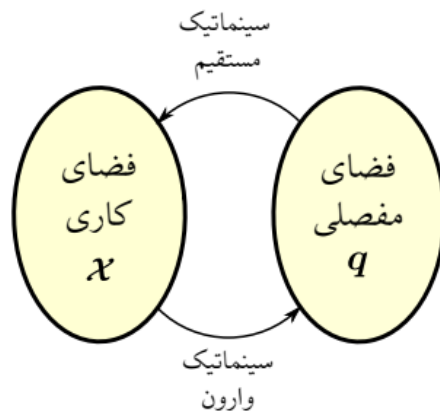
✓ روش بستار حلقه

$$\vec{a}_1 + \vec{a}_2 = \vec{e}$$

✓ بازنویسی بر اساس مولفه ها در مختصات دکارتی

$$a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) = x_e$$

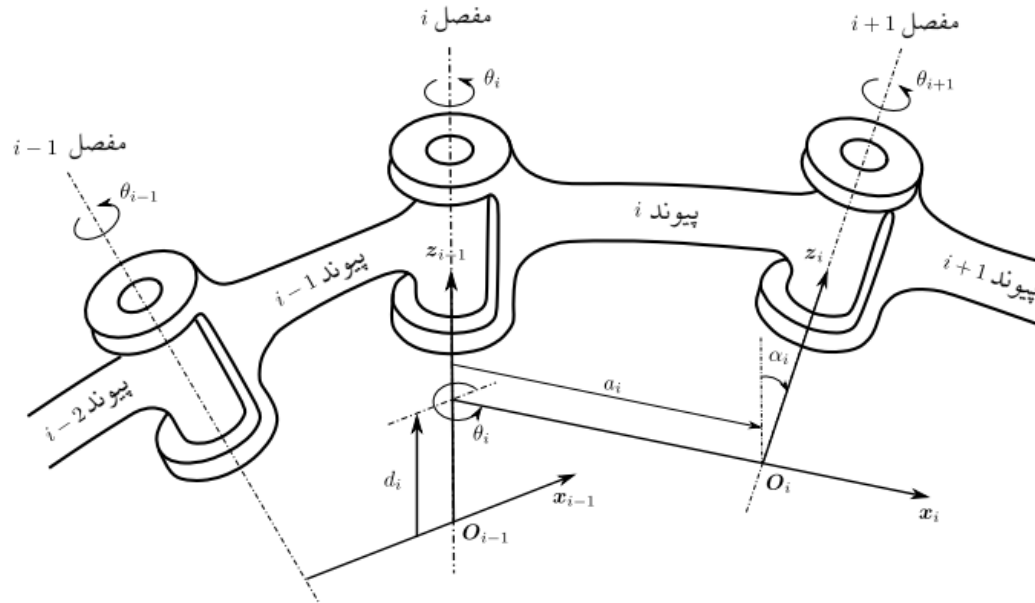
$$a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) = y_e$$



برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• تحلیل سینماتیک مستقیم:

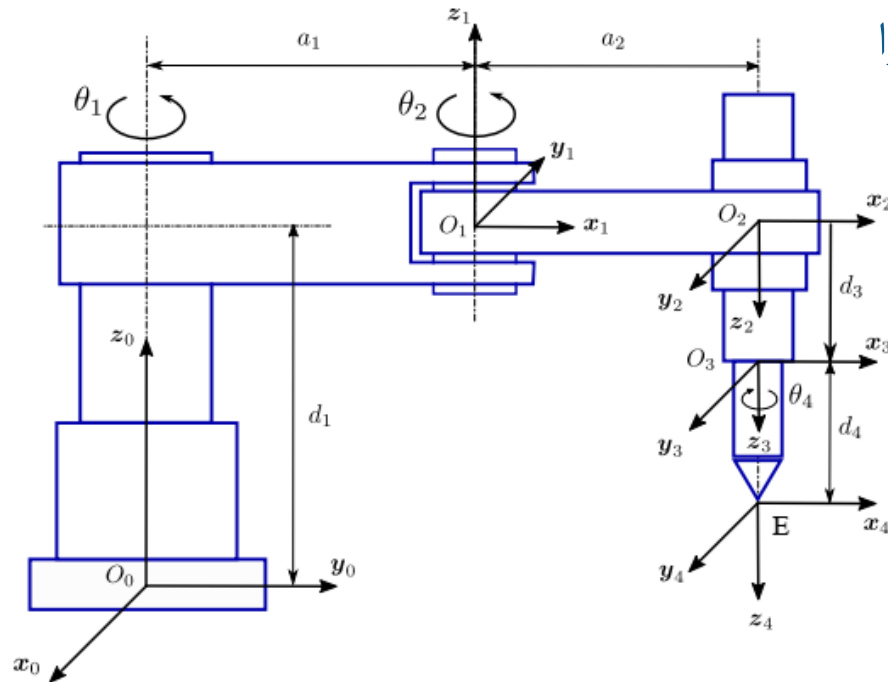
✓ روش دناویت هارتنبرگ



برنامه آموزشی ربایک مقدماتی: جزئیات

• تحلیل سینماتیک مستقیم:

✓ مثال: ربات اسکارا

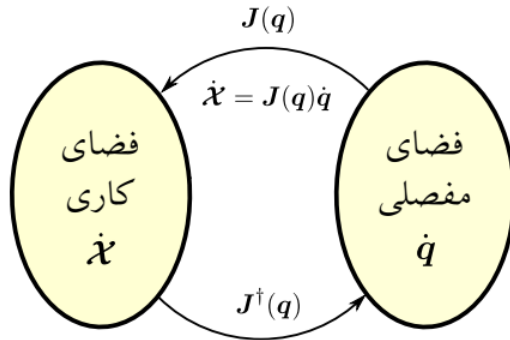


برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• ماتریس ژاکوبی:

✓ نگاشت ماتریس ژاکوبی

✓ روش بستار حلقه سرعت



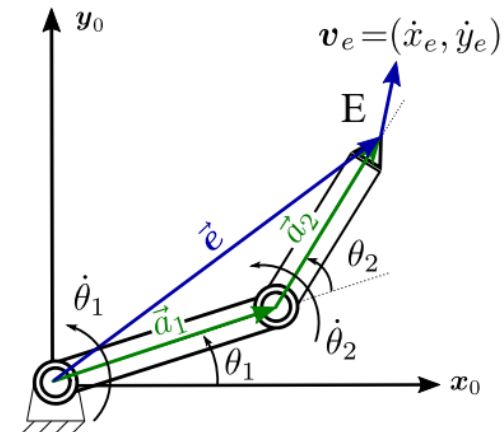
$$x_e = a_1 c_1 + a_2 c_{12}$$

$$y_e = a_1 s_1 + a_2 s_{12}$$

$$\dot{x}_e = -a_1 s_1 \dot{\theta}_1 - a_2 s_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$\dot{y}_e = a_1 c_1 \dot{\theta}_1 + a_2 c_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$J(q) = \begin{bmatrix} -(a_1 s_1 + a_2 s_{12}) & -a_2 s_{12} \\ a_1 c_1 + a_2 c_{12} & a_2 c_{12} \end{bmatrix}$$



برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• ماتریس ژاکوبی:

✓ روش جامع تعیین ماتریس ژاکوبی،

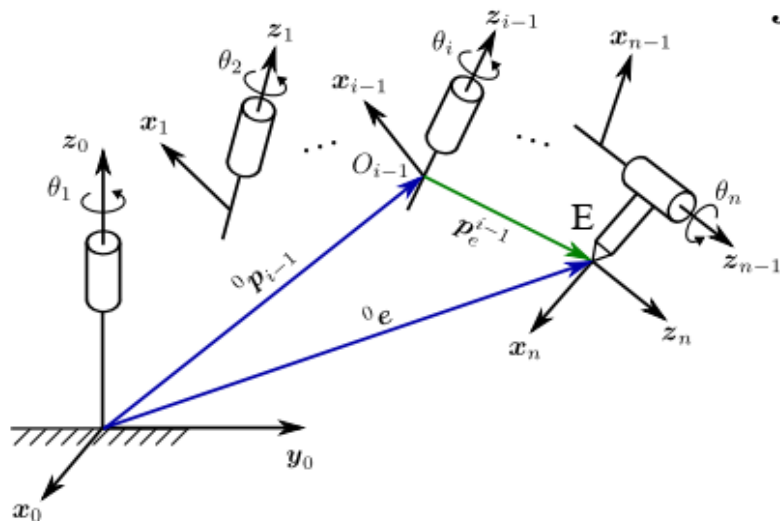
$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} = [J_1 \mid J_2 \mid \cdots \mid J_n]_{6 \times n}$$

□ در مفصل‌های لولایی

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times p_e^{i-1} \\ z_{i-1} \end{bmatrix}$$

□ در مفصل‌های کشویی

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ . \end{bmatrix}$$





• مقدمه ای بر دینامیک و شبیه سازی ربات

✓ فرم بسته معادلات دینامیکی

$$\tau + \tau_d = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)$$

$$\tau_d = J^T(q)\mathcal{F}_e - \tau_f + \dots$$

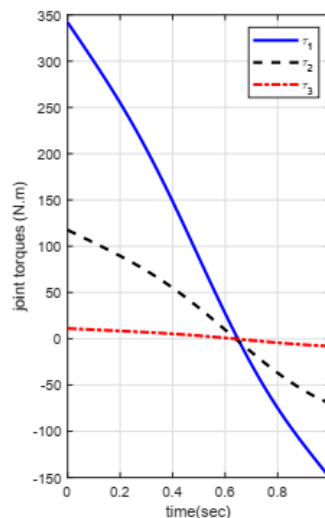
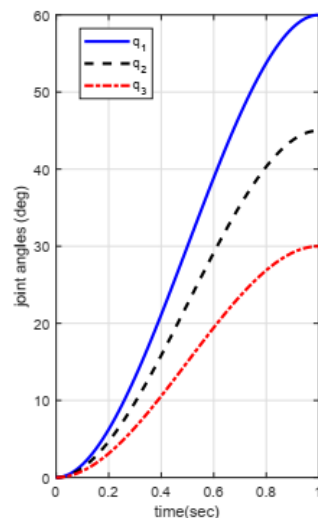
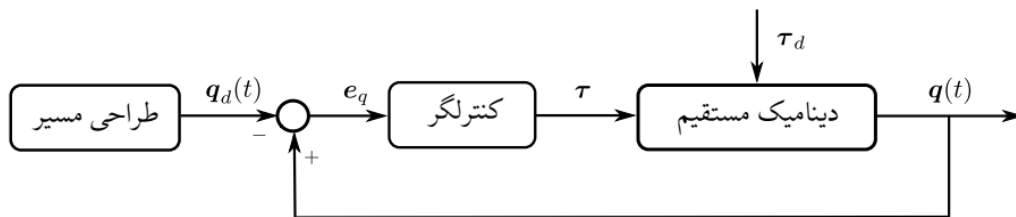
✓ شبیه سازی حرکت ربات

$$\dot{x}_1 = \dot{q} = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{q} = M^{-1}(q)(\tau + \tau_d - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q))$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• شبیه سازی حلقه بسته

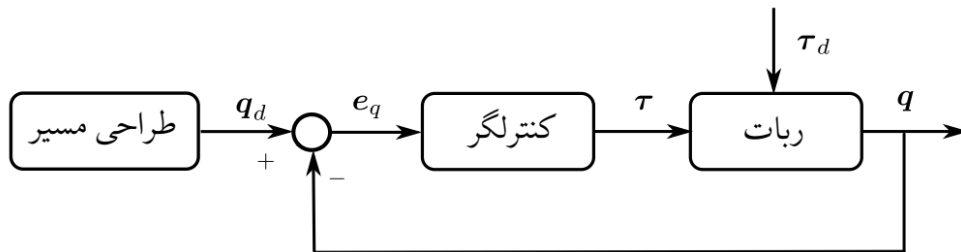


✓ استفاده از نرم افزار Matlab و Python

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• کنترل حرکت ربات: روش های کنترل خطی

✓ توپولوژی کنترل حرکت ربات



✓ اعجاز فیدبک

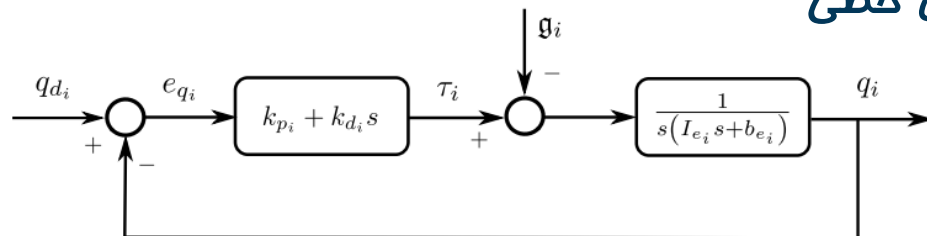


□ دستیابی همزمان به سه هدف

- ردیابی دقیق مسیر حرکتی مطلوب
- در حضور اغتشاش
- و عدم اطلاع از مدل دقیق ربات

• کنترل حرکت ربات: روش های کنترل خطی

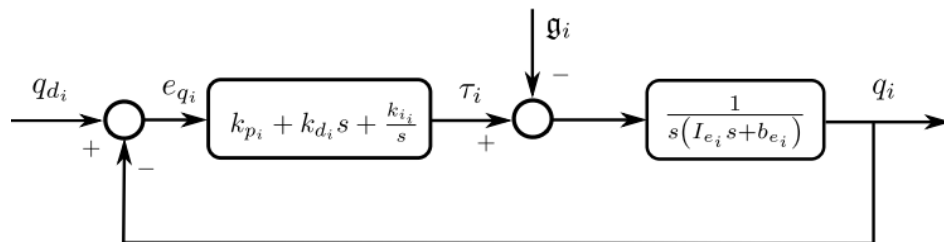
✓ طراحی کنترلر PD



$$\tau_i(t) = k_{p_i} e_{q_i}(t) + k_{d_i} \dot{e}_{q_i}(t)$$

$$C_i(s) = k_{p_i} + k_{d_i} s$$

✓ طراحی کنترلر PID



□ رفع کامل اغتشاش ناشی از نیروی گرانش

$$\tau_i(t) = k_{p_i} e_{q_i}(t) + k_{d_i} \dot{e}_{q_i}(t) + k_{i_i} \int_0^t e_{q_i}(\sigma) d\sigma$$

$$C_i(s) = k_{p_i} + k_{d_i} s + \frac{k_{i_i}}{s}$$

جایگاه درس رباتیک مقدماتی

معرفی زنجیره های درسی پیشنهادی در برنامه آموزشی رباتیک و جایگاه درس رباتیک مقدماتی

گزیده ای از درس رباتیک مقدماتی

۳ سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

گزیده ای از درس رباتیک مقدماتی

۲ سال پایانی دوره کارشناسی (مهندسی برق، مکانیک یا کامپیوتر)

گزیده ای از درس کنترل در رباتیک

۴ سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

در این بخش جایگاه درس رباتیک مقدماتی در برنامه پیشنهادی آموزش رباتیک برای مهندسان معرفی می شود. در ابتدا زنجیره های درسی پیشنهادی در این برنامه معرفی شده و جایگاه مهم درس رباتیک مقدماتی عنوان می شود. سپس محتوای آموزشی این درس با ارائه گزیده ای از مطالب اصلی در آن برای ارائه در دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد به تفکیک بیان خواهد شد. در نهایت نیز محتوای درس کنترل در رباتیک یا رباتیک پیشرفته با بیان گزیده ای از محتوای آموزش آن، ارائه خواهد شد.

• گزیده‌ای از مباحث درس رباتیک مقدماتی:

✓ سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

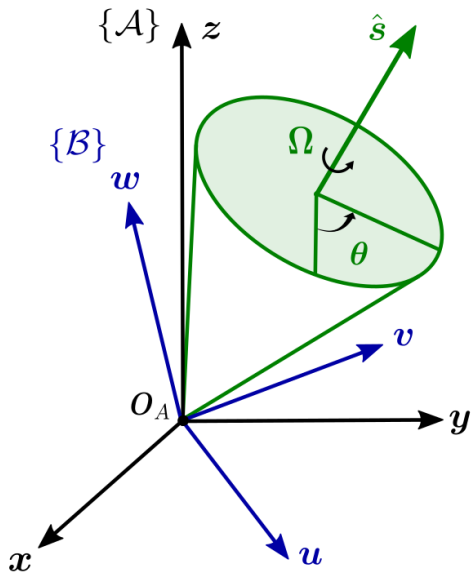
□ تعریف چهارگان

□ پارامترهای اویلر با استفاده از زاویه و محور معادل دوران

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & \epsilon_2 & \epsilon_3 & \epsilon_4 \end{bmatrix}^T$$

$$\epsilon_1 = s_x \sin(\theta/2); \quad \epsilon_2 = s_y \sin(\theta/2); \quad \epsilon_3 = s_z \sin(\theta/2); \quad \epsilon_4 = \cos(\theta/2)$$

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} 1 - 2\epsilon_2^2 - 2\epsilon_3^2 & 2(\epsilon_1\epsilon_2 - \epsilon_3\epsilon_4) & 2(\epsilon_1\epsilon_3 + \epsilon_2\epsilon_4) \\ 2(\epsilon_1\epsilon_2 + \epsilon_3\epsilon_4) & 1 - 2\epsilon_1^2 - 2\epsilon_3^2 & 2(\epsilon_2\epsilon_3 - \epsilon_1\epsilon_4) \\ 2(\epsilon_1\epsilon_3 - \epsilon_2\epsilon_4) & 2(\epsilon_2\epsilon_3 + \epsilon_1\epsilon_4) & 1 - 2\epsilon_1^2 - 2\epsilon_2^2 \end{bmatrix}$$



برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• نمایش حرکت جسم صلب توسط پیچه:

✓ قضیه موتسی-شال

$$\{\theta, \hat{s} = [s_x, s_y, s_z]^T; d, s_o = [s_{ox}, s_{oy}, s_{oz}]^T\}$$

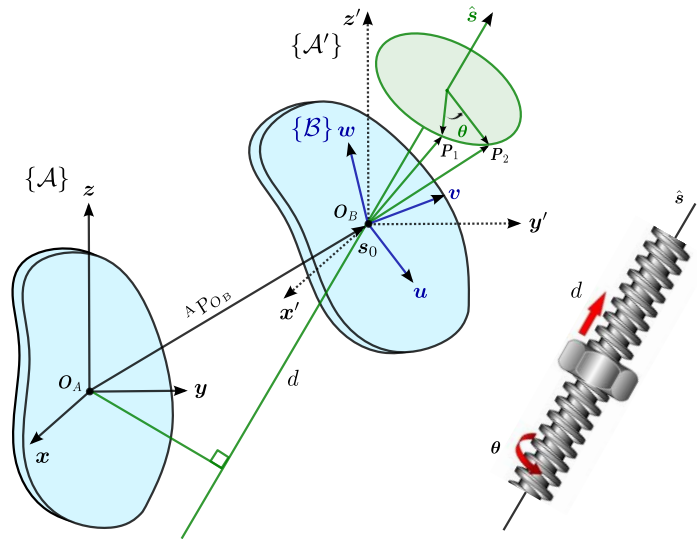
$$\hat{s}^T \hat{s} = 1; s_o^T \hat{s} = d$$

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} s_x^y v \theta + c \theta & s_x s_y v \theta - s_z s \theta & s_x s_z v \theta + s_y s \theta & p_x \\ s_y s_x v \theta + s_z s \theta & s_y^y v \theta + c \theta & s_y s_z v \theta - s_x s \theta & p_y \\ s_z s_x v \theta - s_y s \theta & s_z s_y v \theta + s_x s \theta & s_z^y v \theta + c \theta & p_z \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix}$$

$$p_x = d s_x - s_{ox} (s_x^y - 1) v \theta - s_{oy} (s_x s_y v \theta - s_z s \theta) - s_{oz} (s_x s_z v \theta + s_y s \theta)$$

$$p_y = d s_y - s_{ox} (s_y s_x v \theta + s_z s \theta) - s_{oy} (s_y^y - 1) v \theta - s_{oz} (s_y s_z v \theta - s_x s \theta)$$

$$p_z = d s_z - s_{ox} (s_z s_x v \theta - s_y s \theta) - s_{oy} (s_z s_y v \theta + s_x s \theta) - s_{oz} (s_z^y - 1) v \theta$$

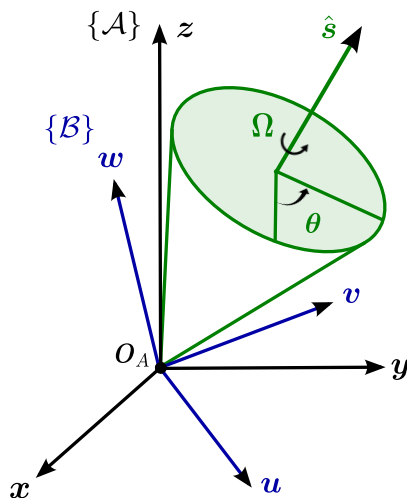


• تعریف سرعت زاویه‌ای

✓ با استفاده از تعریف پیچ: بسیار ساده

$$\Omega \triangleq \dot{\theta} \hat{s}$$

✓ با استفاده از نرخ ماتریس دوران: بسیار پیچیده



$$\Omega^{\times} \equiv {}^A \dot{R}_B {}^A R_B^{-1} = \begin{bmatrix} \cdot & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & \cdot & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & \cdot \end{bmatrix}$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• تعریف سرعت زاویه‌ای

✓ با استفاده از نرخ زاویه اولیه: بسیار پیچیده

$$\Omega = E(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}$$

$$\Omega_x = \dot{r}_{31}r_{21} + \dot{r}_{32}r_{22} + \dot{r}_{33}r_{23}$$

$$\Omega_y = \dot{r}_{11}r_{31} + \dot{r}_{12}r_{32} + \dot{r}_{13}r_{33}$$

$$\Omega_z = \dot{r}_{21}r_{11} + \dot{r}_{22}r_{12} + \dot{r}_{23}r_{13}$$

✓ با استفاده از نرخ چهارگان: پیچیده

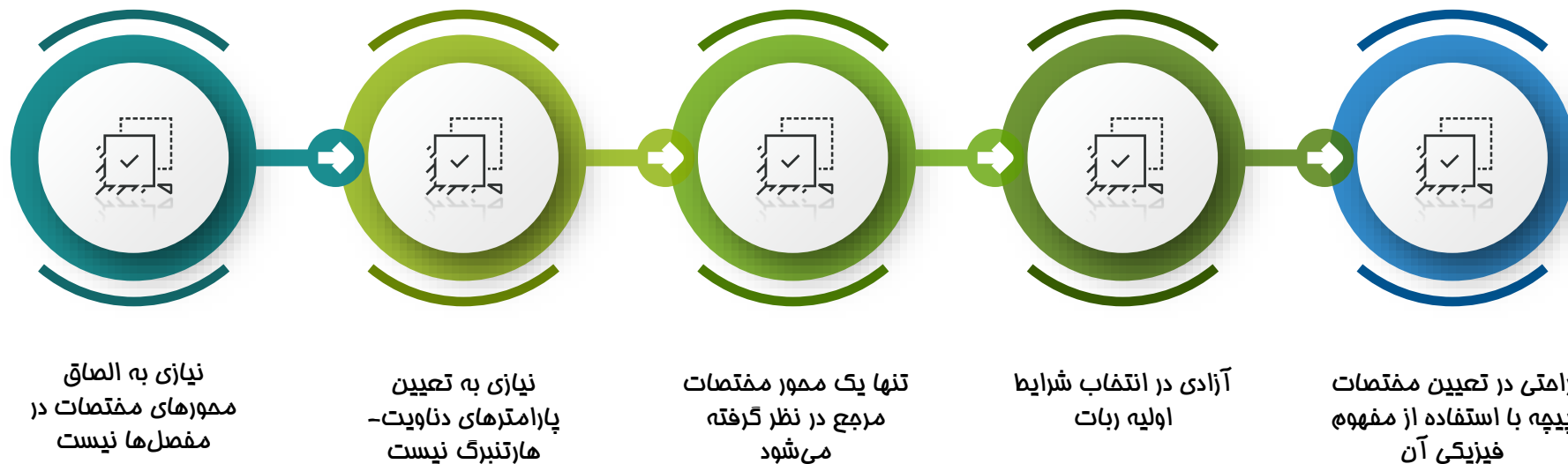
$$\Omega = \Upsilon \epsilon^\dagger \odot \dot{\epsilon}$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} = \Upsilon \begin{bmatrix} \epsilon_4 & \epsilon_3 & -\epsilon_2 & -\epsilon_1 \\ -\epsilon_3 & \epsilon_4 & \epsilon_1 & -\epsilon_2 \\ \epsilon_2 & -\epsilon_1 & \epsilon_4 & -\epsilon_3 \end{bmatrix} \dot{\epsilon}$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• سینماتیک مستقیم

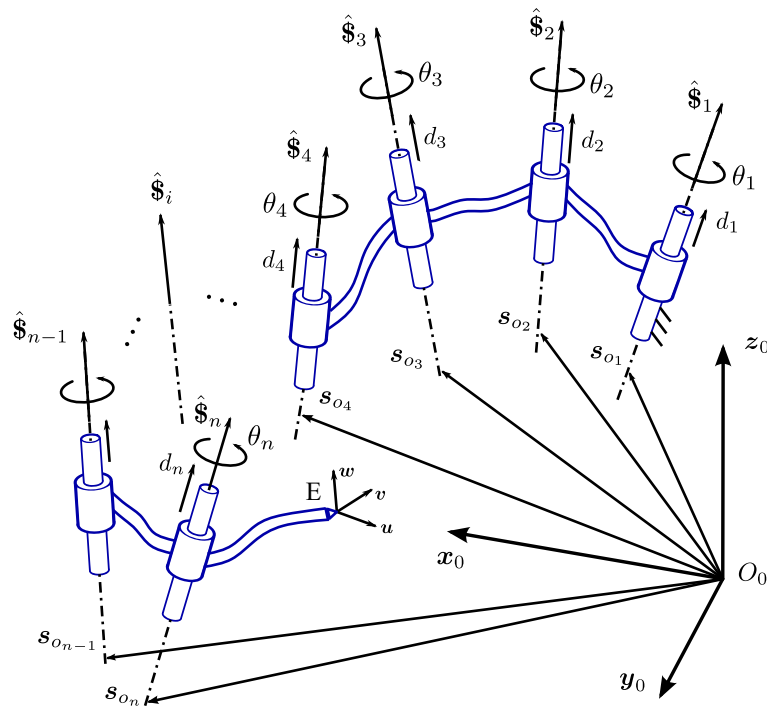
✓ مزیت روش مبتنی بر پیچه نسبت به روش دناویت-هارتبرگ



برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• سینماتیک مستقیم

✓ روش مبتنی بر پیچه



$$x_e^f = T_r \cdot x_e^* = T_1 \cdot T_2 \cdots T_n \cdot x_e^*$$

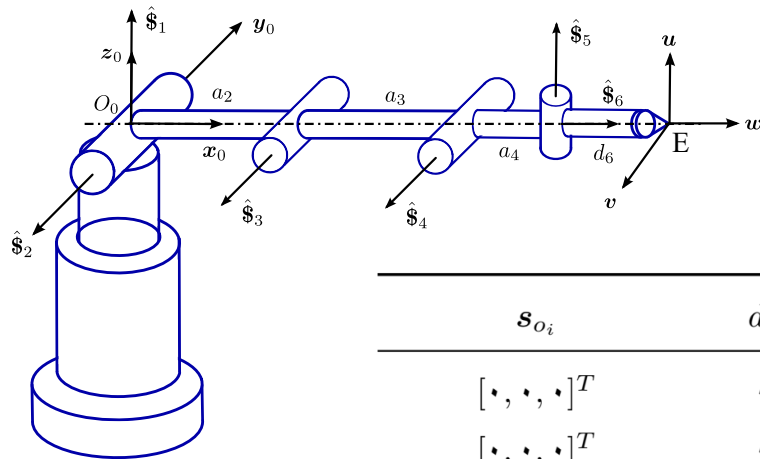
$$\begin{aligned} u^f &= T_r \cdot u^* \\ v^f &= T_r \cdot v^* ; \quad T_r = T_1 \cdot T_2 \cdots T_n \\ w^f &= T_r \cdot w^* \end{aligned}$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• سینماتیک مستقیم

✓ مثال: ربات آرنج شش درجه آزادی

□ پیچ‌های متوالی در وضعیت اولیه ربات



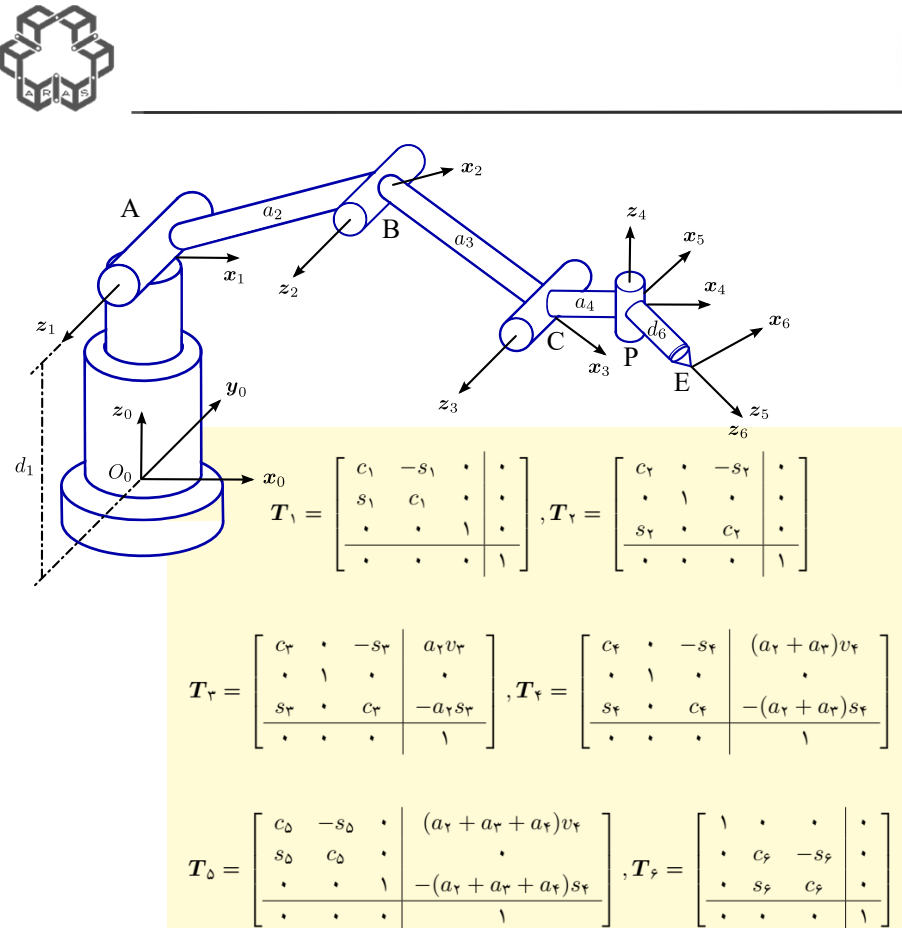
s_{o_i}	d_i	\hat{s}_i	θ_i	i
$[\cdot, \cdot, \cdot]^T$	\cdot	$[\cdot, \cdot, 1]^T$	θ_1	۱
$[\cdot, \cdot, \cdot]^T$	\cdot	$[\cdot, -1, \cdot]^T$	θ_2	۲
$[a_2, \cdot, \cdot]^T$	\cdot	$[\cdot, -1, \cdot]^T$	θ_3	۳
$[a_2 + a_3, \cdot, \cdot]^T$	\cdot	$[\cdot, -1, \cdot]^T$	θ_4	۴
$[a_2 + a_3 + a_4, \cdot, \cdot]^T$	\cdot	$[\cdot, \cdot, 1]^T$	θ_5	۵
$[\cdot, \cdot, \cdot]^T$	\cdot	$[1, \cdot, \cdot]^T$	θ_6	۶

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• سینماتیک مستقیم

✓ مثال: ربات آرنج شش درجه آزادی

□ پیچ‌های متوالی در وضعیت نهایی ربات



$$x_e^f = T_r \cdot x_e^i$$

$$\begin{aligned} x_e &= (a_r + a_3 + a_6) s_1 s_5 \\ &+ c_1 c_r [a_r v_r + (a_r + a_3)(s_r s_5 + c_r v_5) - (a_r + a_3 + a_6) c_r v_5] \\ &+ c_1 s_r [a_r s_r + (a_r + a_3)(c_r s_5 - s_r v_5) - (a_r + a_3 + a_6) s_r v_5] \\ &- (a_r + a_3 + a_6 + d_6) [s_1 s_5 - c_1 c_r c_{r5} c_5 + c_1 s_r s_{r5} c_5] \\ y_e &= -(a_r + a_3 + a_6) c_1 s_5 \\ &+ s_1 c_r [a_r v_r + (a_r + a_3)(s_r s_5 + c_r v_5) + (a_r + a_3 + a_6) c_r v_5] \\ &+ s_1 s_r [a_r s_r + (a_r + a_3)(c_r s_5 - s_r v_5) - (a_r + a_3 + a_6) s_r v_5] \\ &+ (a_r + a_3 + a_6 + d_6) [c_1 s_5 + s_1 c_r c_{r5} c_5 - s_1 s_r s_{r5} c_5] \\ z_e &= a_r s_2 + a_3 s_{23} + a_6 s_{234} + \frac{1}{4} d_6 (s_{2345} + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 - \theta_5)) \end{aligned}$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• ماتریس ژاکوبی:

✓ روش مبتنی بر پیچه

□ ستون های ماتریس ژاکوبین از پیچه ها تشکیل می شود

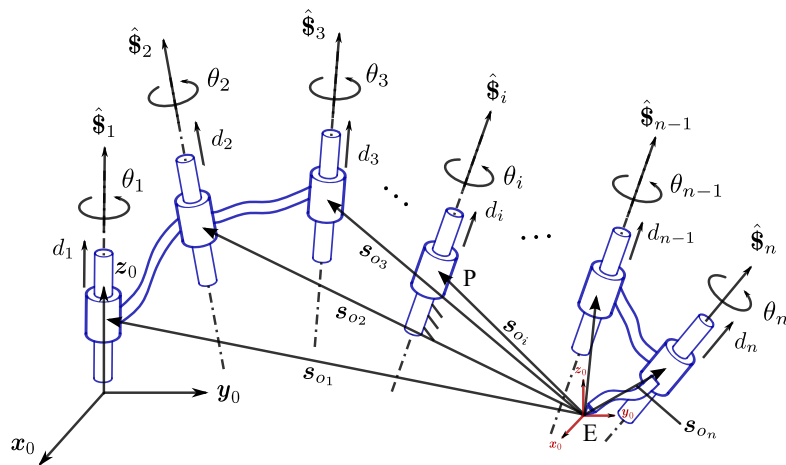
$$J^s(q) = \left[\hat{\$}_1 \mid \hat{\$}_2 \mid \cdots \mid \hat{\$}_n \right]_{6 \times n}$$

□ در مفصل های لولایی

$$\hat{\$}_i = \begin{bmatrix} \hat{s}_i \\ s_{o_i} \times \hat{s}_i \end{bmatrix}$$

□ در مفصل های کشویی

$$\hat{\$}_i = \begin{bmatrix} \cdot \\ \hat{s}_i \end{bmatrix}$$



برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• وضعیت تکین ماتریس ژاکوبی:

✓ در وضعیت تکین $\det J(q) = 0$

□ حرکت پنجه ربات در حداقل یک جهت در دسترس

نیست. (مرز فضای کاری) گردن افراشته زرافه

□ سرعت های محدود پنجه ربات با سرعت نامتناهی در

مفصل ها ایجاد می شود (که در عمل میسر نیست)

□ حداقل در یک جهت بدون اعمال گشتاور در مفصل ها

نیروی بسیار بزرگی را به محیط می توان اعمال نمود

(بلند کردن وزنه های سنگین)

□ تعیین فضای کاری دسترسی پذیر با تحلیل وضعیت

تکین

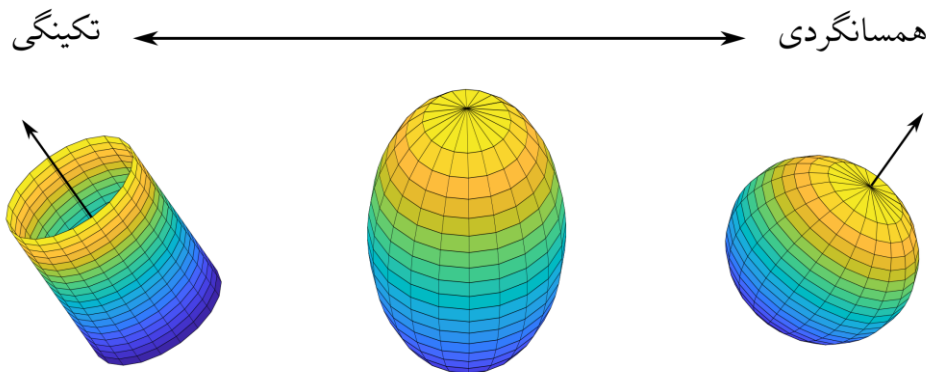
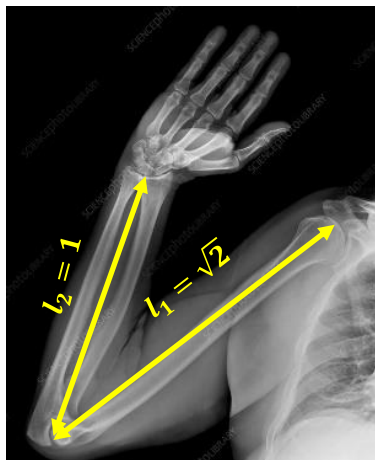


برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• ویژگی‌های پایای ماتریس ژاکوبی:

✓ چرا نسبت طول بازوهای دست انسان نزدیک $\sqrt{2}$ است؟

□ تعریف همسانگردی در مقابل تکینگی

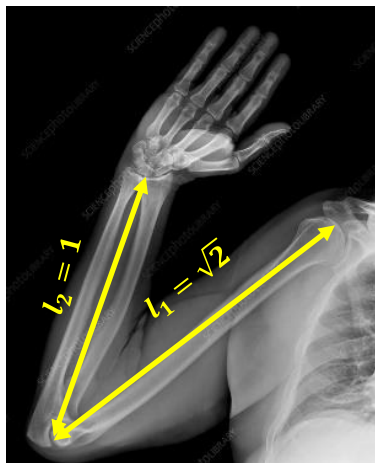


بیضی‌گون مهارت ربات از همسانگردی تا تکینگی

• ویژگی‌های پایای ماتریس ژاکوبی:

✓ چرا نسبت طول بازوهای دست انسان نزدیک $\sqrt{2}$ است؟

□ بهینه شدن



$$\begin{aligned}\mu &= \sqrt{\det(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)} = \sqrt{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdots \lambda_n} \\ &= \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdots \sigma_n\end{aligned}$$

□ معیار چابکی

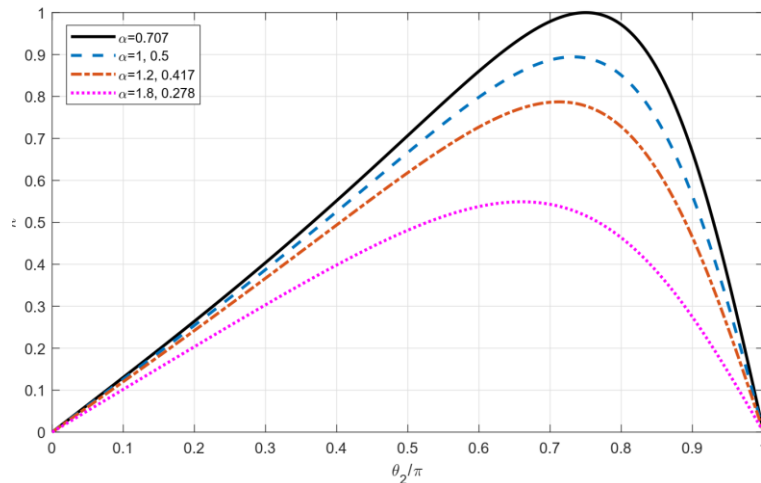
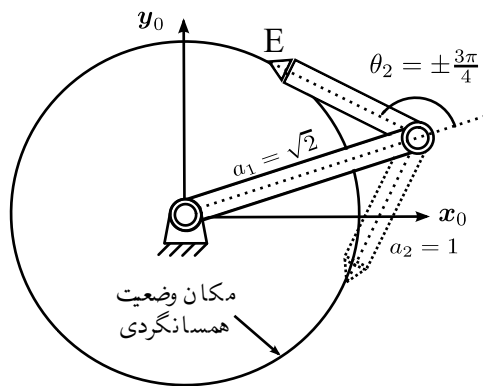
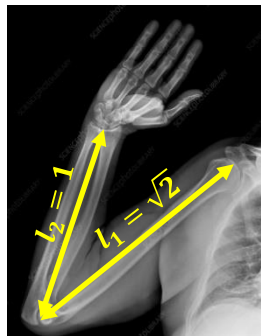
$$\kappa(\mathbf{J}(\mathbf{q})) = \frac{\sigma_{\min}(\mathbf{J}(\mathbf{q}))}{\sigma_{\max}(\mathbf{J}(\mathbf{q}))}$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• ویژگی‌های پایای ماتریس ژاکوبی:

✓ چرا نسبت طول بازوهای دست انسان نزدیک $\sqrt{2}$ است؟

□ بهینه شدن معیار چابکی به ازای این نسبت در بازوی دو پیوندی!

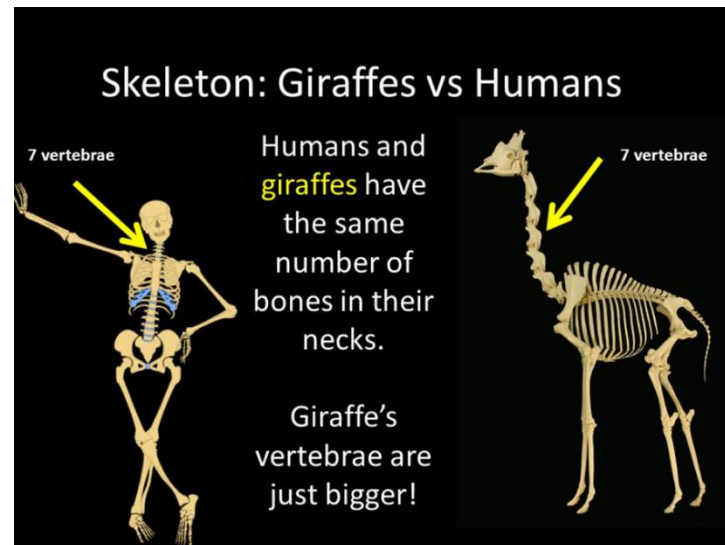
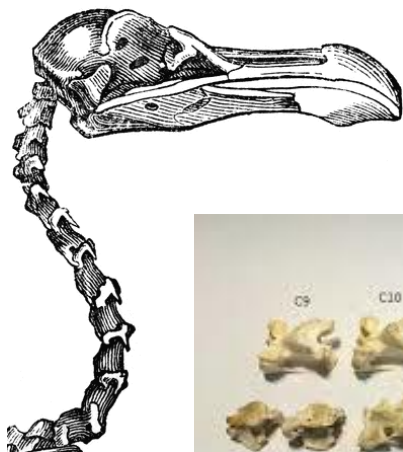


مقدار معیار چابکی در ربات 2R به ازای $\theta_2 = [0, \pi]$ بر حسب مقادیر مختلف α .

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• ویژگی‌های پایای ماتریس ژاکوبی:

✓ چرا گردن همه پستانداران ۷ مهره دارد، ولی گردن پرندگان ۱۴ مهره؟ (افزونگی در تحریک)

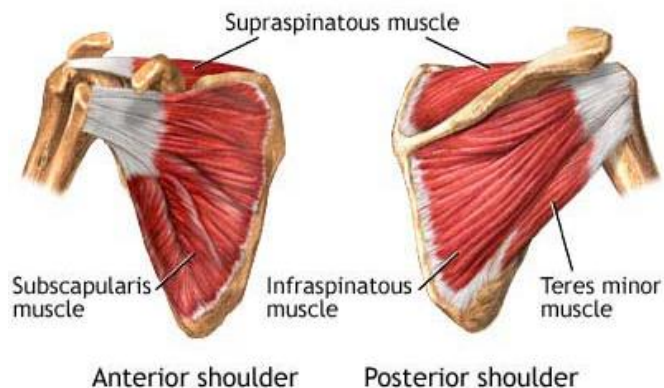


برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

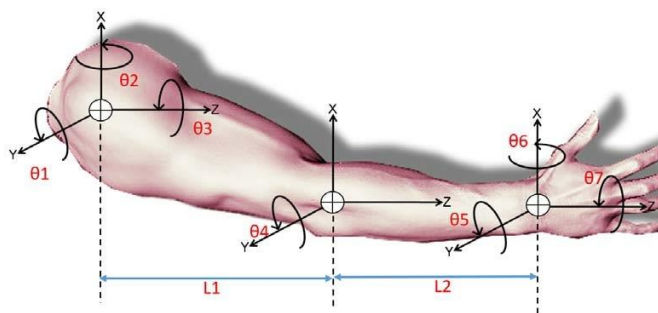
• ویژگی‌های پایای ماتریس ژاکوبی:

✓ افزونگی در تحریک در طبیعت

□ در مفصل شانه انسان چهار گروه ماهیچه ای برای تحریک سه درجه آزادی دورانی استفاده شده است.



□ بازوی دست انسان از ساختار ۷ درجه آزادی تشکیل شده است.



برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

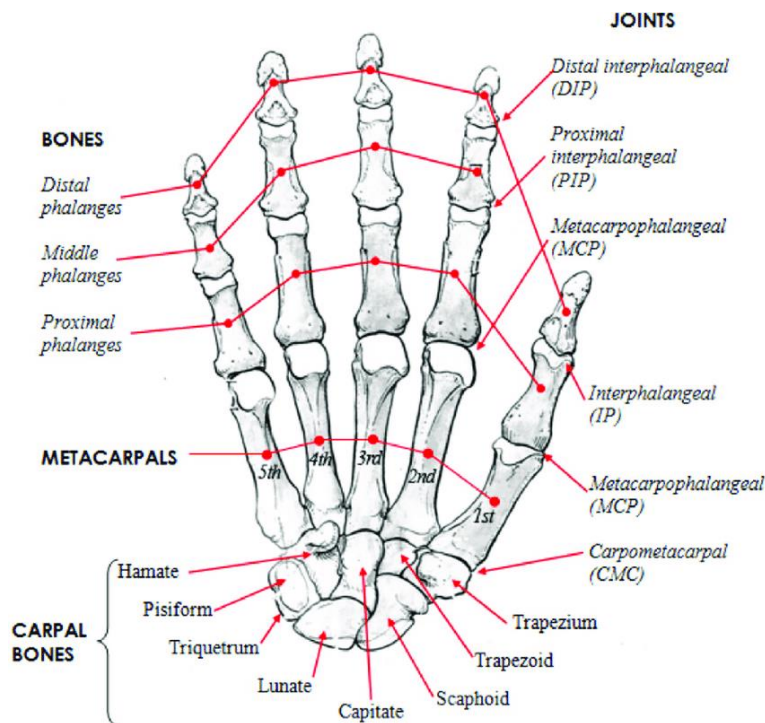
• ویژگی‌های پایای ماتریس ژاکوبی:

✓ افزونگی در تحریک در طبیعت

□ مفصل مچ دست انسان برای ایجاد حرکت سه درجه آزادی دورانی از هشت استخوان تشکیل شده است.

□ و بسیاری از مثال‌های دیگر

✓ افزونگی در تحریک سبب می‌شود ویژگی‌های پایای ماتریس ژاکوبی بهبود یافته و ساختار افزونه، ربات را از تکینگی دور می‌کند.



جایگاه درس رباتیک مقدماتی

معرفی زنجیره های درسی پیشنهادی در برنامه آموزشی رباتیک و جایگاه درس رباتیک مقدماتی

گزیده ای از درس رباتیک مقدماتی

سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

گزیده ای از درس رباتیک مقدماتی

سال پایانی دوره کارشناسی (مهندسی برق، مکانیک یا کامپیوتر)

گزیده ای از درس کنترل در رباتیک

سال اول دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

در این بخش جایگاه درس رباتیک مقدماتی در برنامه پیشنهادی آموزش رباتیک برای مهندسان معرفی می شود. در ابتدا زنجیره های درسی پیشنهادی در این برنامه معرفی شده و جایگاه مهم درس رباتیک مقدماتی عنوان می شود. سپس محتوای آموزشی این درس با ارائه گزیده ای از مطالب اصلی در آن برای ارائه در دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد به تفکیک بیان خواهد شد. در نهایت نیز محتوای درس کنترل در رباتیک یا رباتیک پیشرفته با بیان گزیده ای از محتوای آموزش آن، ارائه خواهد شد.

• گزیده‌ای از مباحث درس کنترل در رباتیک:

✓ سال دوم دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک یا کامپیوتر)

□ تحلیل دینامیکی روش مستقیم لاگرانژ

$$\mathcal{L} = K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - P(\mathbf{q})$$

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}}$$

□ فرم بسته معادلات دینامیکی ربات

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{v}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}$$

• روش بازگشتی لاگرانژ

✓ تعریف ماتریس ژاکوبی مرکز جرم پیوندها

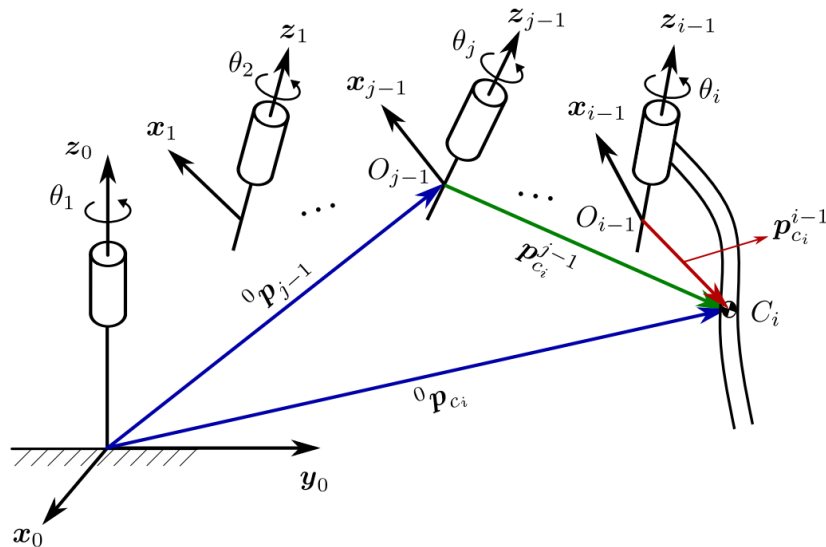
$$\dot{\mathbf{x}}_{c_i} = \mathbf{J}_i(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad \mathbf{J}_i(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{v_i} \\ \mathbf{J}_{\omega_i} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}_{c_i} = \mathbf{J}_{v_i}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad \boldsymbol{\omega}_{c_i} = \mathbf{J}_{\omega_i}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$

✓ بدین ترتیب

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n \left(m_i \mathbf{J}_{v_i}^T \mathbf{J}_{v_i} + \mathbf{J}_{\omega_i}^T \mathbf{I}_i \mathbf{J}_{\omega_i} \right)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = - \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{J}_{v_i}^T \mathbf{g}$$



• ویژگی های معادلات دینامیکی

✓ ماتریس کریستوفل: با استفاده از ضرب کرونکر

$$V(q, \dot{q}) = \dot{M}(q) = \frac{\partial M^T}{\partial q} (I_{n \times n} \otimes \dot{q})$$

$$U(q, \dot{q}) = (I_{n \times n} \otimes \dot{q}^T) \frac{\partial M}{\partial q}$$

$$C(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} [V(q, \dot{q}) + U^T(q, \dot{q}) - U(q, \dot{q})]$$

□ فرم بسته معادلات

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = Q$$

□ که در آن ماتریس $M - 2C$ پاد متقارن است.

• ویژگی‌های معادلات دینامیکی

✓ مثال: ماتریس کریستوفل ربات اسکارا با استفاده از نرم افزارهای محاسبه نمادین

$$V(q, \dot{q}) = \dot{M}(q) = \frac{\partial M^T}{\partial \dot{q}} (I_{n \times n} \otimes \dot{q})$$

$$C(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} [V(q, \dot{q}) + U^T(q, \dot{q}) - U(q, \dot{q})] =$$

$$\begin{bmatrix} \cdot & -\frac{1}{2}a_1a_2s_2(m_2 + 2m_3)(2\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) & \cdot \\ -\frac{1}{2}a_1a_2s_2(m_2 + 2m_3)(2\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) & \frac{1}{2}a_1a_2s_2(m_2 + 2m_3)\dot{\theta}_1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

$$\left[\begin{array}{ccc} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{array} \right]$$

□ که در آن ماتریس $\dot{M} - 2C$ پاد متقارن است.

• معادلات دینامیکی موثر ربات در حضور عملگر

□ تاثیر دینامیک عملگر با جعبه دنده با نسبت تبدیل η

$$I_e = (\eta^\top I_m + I), \quad b_e = (\eta^\top b_m + b)$$

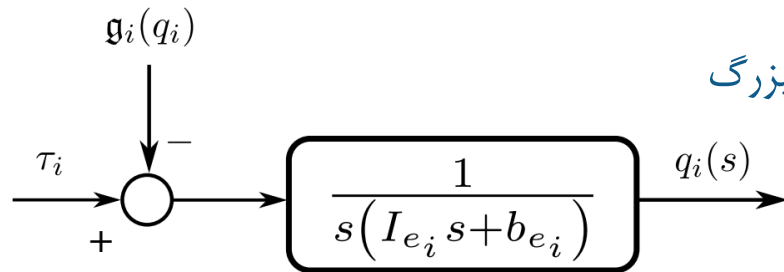
$$\tau - b_e \dot{q} = M_e(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q)$$

$$M_e(q) = M(q) + \begin{bmatrix} \eta_1^\top I_{m_1} & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \eta_2^\top I_{m_2} & \cdots & \cdot \\ \vdots & \cdot & \ddots & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdots & \eta_n^\top I_{m_n} \end{bmatrix} \quad b_e = \begin{bmatrix} b_1 + \eta_1^\top b_{m_1} \\ b_2 + \eta_2^\top b_{m_2} \\ \vdots \\ b_n + \eta_n^\top b_{m_n} \end{bmatrix}$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• روش‌های کالبراسیون ربات

✓ در صورت استفاده از جعبه دنده با نسبت تبدیل بسیار بزرگ



$$\tau_i = I_{e_i} \ddot{q}_i + b_{e_i} \dot{q}_i + g_i(q_i)$$

$$\tau = \mathcal{Y}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \Phi$$

✓ تبدیل به مدل رگرسیون خطی بر اساس آزمایش

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_N \end{bmatrix}, \quad \mathcal{Y} = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 & \dot{q}_1 & \cos q_1 \\ \ddot{q}_2 & \dot{q}_2 & \cos q_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \ddot{q}_N & \dot{q}_N & \cos q_N \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} I_e \\ b_e \\ g \end{bmatrix}$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• روش‌های کالیبراسیون ربات

✓ استفاده از روش کمترین مربعات خطا (LS) و وارون مجازی

$$\hat{\Phi} = \mathcal{Y}^{\dagger} \tau$$

$$\tau = \mathcal{Y}(q, \dot{q}, \ddot{q})\Phi$$

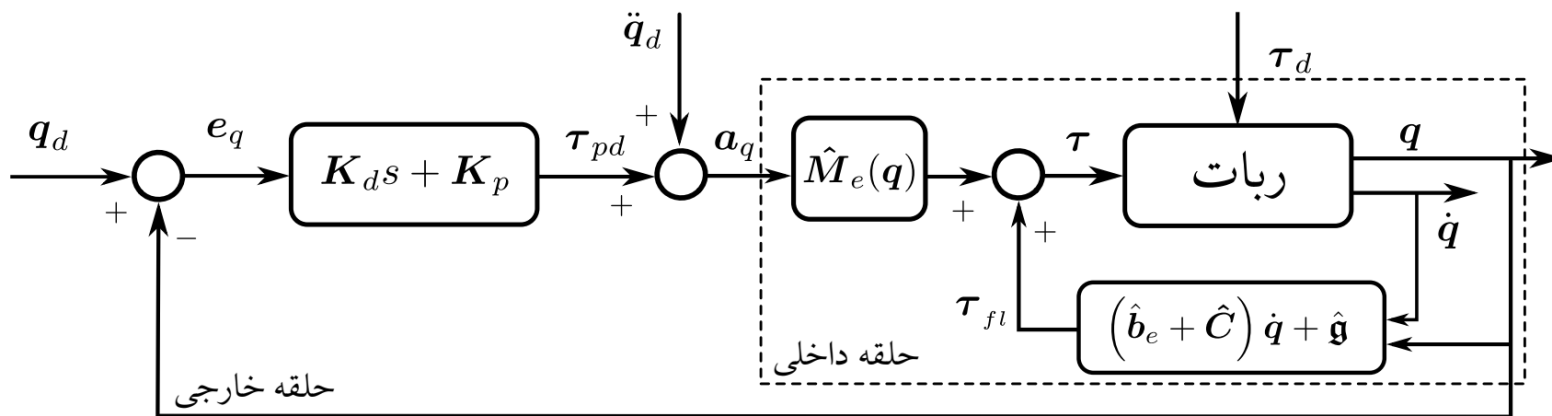
$$\mathcal{Y}^{\dagger} = (\mathcal{Y}^T \mathcal{Y})^{-1} \mathcal{Y}^T$$

✓ ارزیابی مدل با شاخص سازگاری

$$\text{CM} = \frac{\text{انحراف معیار}}{\text{میانگین}} = \text{شاخص سازگاری}$$

• کنترل حرکت چندمتغیره و غیرخطی ربات:

✓ روش کنترل دینامیک وارون



شکل ۱۳.۶ نمودار بلوکی کنترل دینامیک وارون ربات در فضای مفصلی.

• کنترل حرکت چندمتغیره و غیرخطی ربات:

✓ روش کنترل دینامیک وارون

□ تلاش کنترلی لازم

$$\tau = \hat{M}_e(q)a_q + (\hat{b}_e + \hat{C}(q, \dot{q}))\dot{q} + \hat{g}(q)$$

$$a_q = \ddot{q}_d + K_d \dot{e}_q + K_p e_q$$

□ رفتار سیستم حلقه بسته

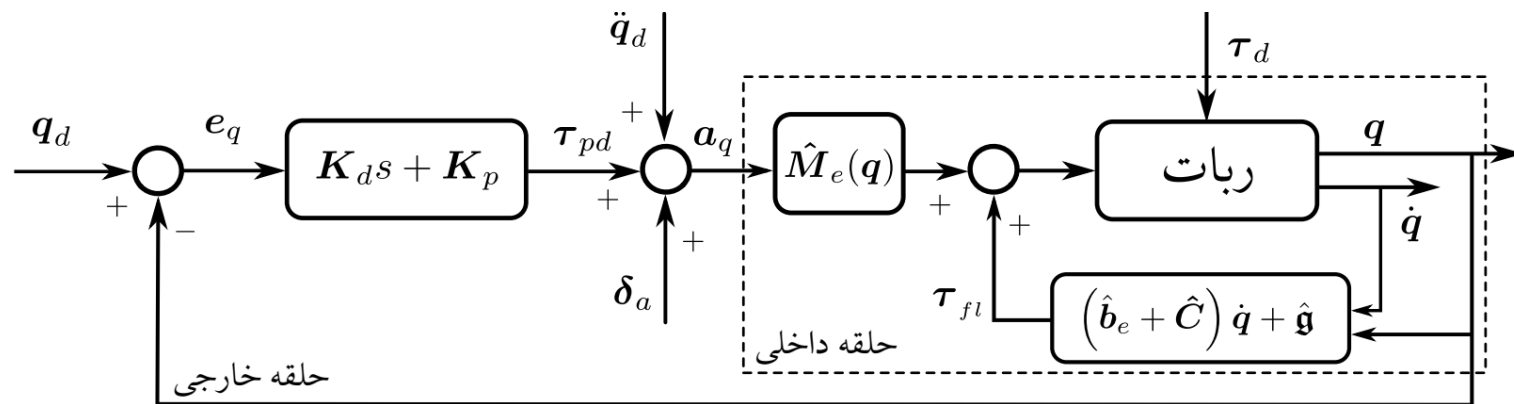
$$\ddot{e}_q + K_d \dot{e}_q + K_p e_q =$$

$$M_e^{-1} \left\{ (M_e - \hat{M}_e) \ddot{q} + (b_e - \hat{b}_e) \dot{q} + (C - \hat{C}) \dot{q} + (g - \hat{g}) - \tau_d \right\}$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• کنترل حرکت چندمتغیره و غیرخطی ربات:

✓ کنترل دینامیک وارون مقاوم



شکل ۱۵.۶ نمودار بلوکی کنترل دینامیک وارون مقاوم ربات.



• کنترل حرکت چندمتغیره و غیرخطی ربات:

✓ روش کنترل دینامیک وارون

□ تلاش کنترلی لازم

$$\tau = \hat{M}_e(q)a_r + \left(\hat{b}_e + \hat{C}(q, \dot{q})\right)\dot{q} + \hat{g}(q)$$

$$a_r = \ddot{q}_d + K_d \dot{e}_q + K_p e_q + \delta_a$$

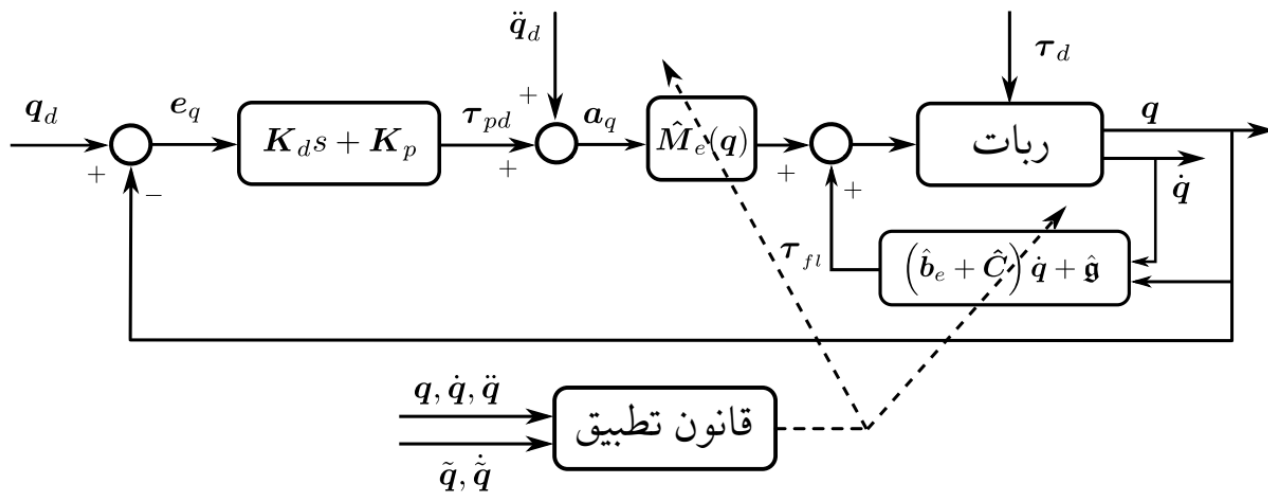
□ عبارت مقاوم ساز بدون تواتر منظم

$$\delta_a = \begin{cases} -\rho \frac{v}{\|v\|} & \text{if } \|v\| > \epsilon \\ -\rho \frac{v}{\epsilon} & \text{if } \|v\| \leq \epsilon \end{cases}$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• کنترل حرکت چندمتغیره و غیرخطی ربات:

✓ کنترل دینامیک وارون تطبیقی



شکل ۱۷.۶ نمودار بلوکی کنترل دینامیک وارون تطبیقی ربات.



• کنترل حرکت چندمتغیره و غیرخطی ربات:

✓ روش کنترل دینامیک وارون

□ تلاش کنترلی لازم

$$\tau = \hat{M}_e(q)a_q + \left(\hat{b}_e + \hat{C}(q, \dot{q})\right)\dot{q} + \hat{g}(q)$$

$$a_q = \ddot{q}_d + K_d \dot{e}_q + K_p e_q$$

□ پارامترهای سیستم به فرم رگرسیون خطی نوشته و به صورت فوقی تصحیح می شوند

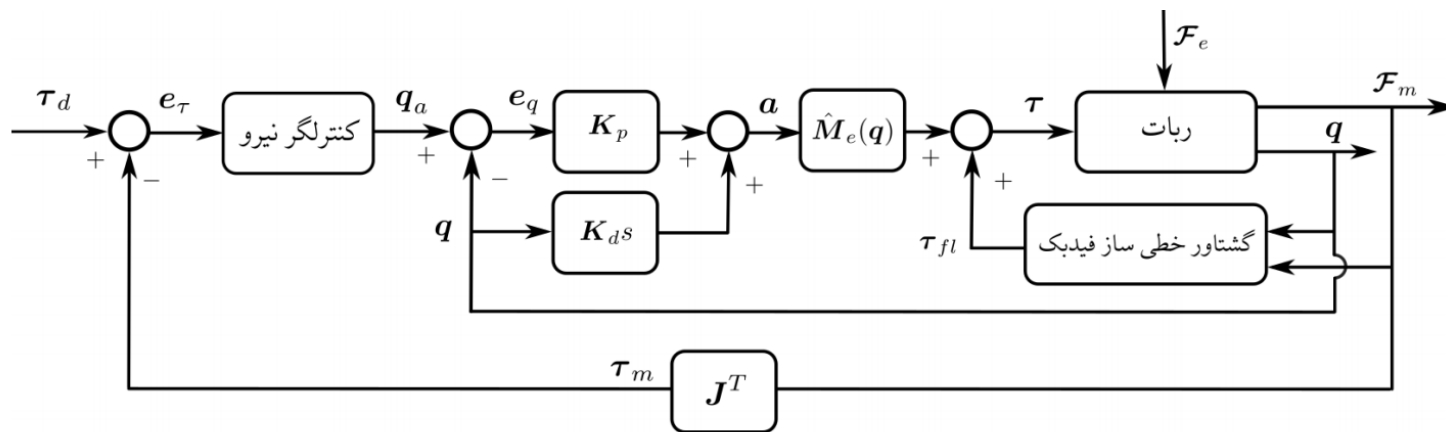
□ قانون تطبیق پارامترها

$$\dot{\Phi} = \Gamma^{-1} Z^T B^T P \epsilon$$

برنامه آموزشی رباتیک مقدماتی: جزئیات

• کنترل مستقیم نیرو

✓ طراحی حلقه های تودرتو



شکل ۶.۷ نمودار بلوکی کنترل مستقیم نیرو: فیدبک نیرو در حلقه خارجی و کنترل مکان در حلقه داخلی ساختار کنترل تودرتو.

• کنترل مستقیم نیرو

✓ تلاش کنترلی لازم

$$\tau = \hat{M}_e(q)a + \tau_{fl},$$

$$\tau_{fl} = \left(\hat{C}(q, \dot{q}) + \hat{b}_e \right) \dot{q} + \hat{g}(q) + J^T \mathcal{F}_m$$

$$a = K_p(q_a - q) - K_d \dot{q}$$

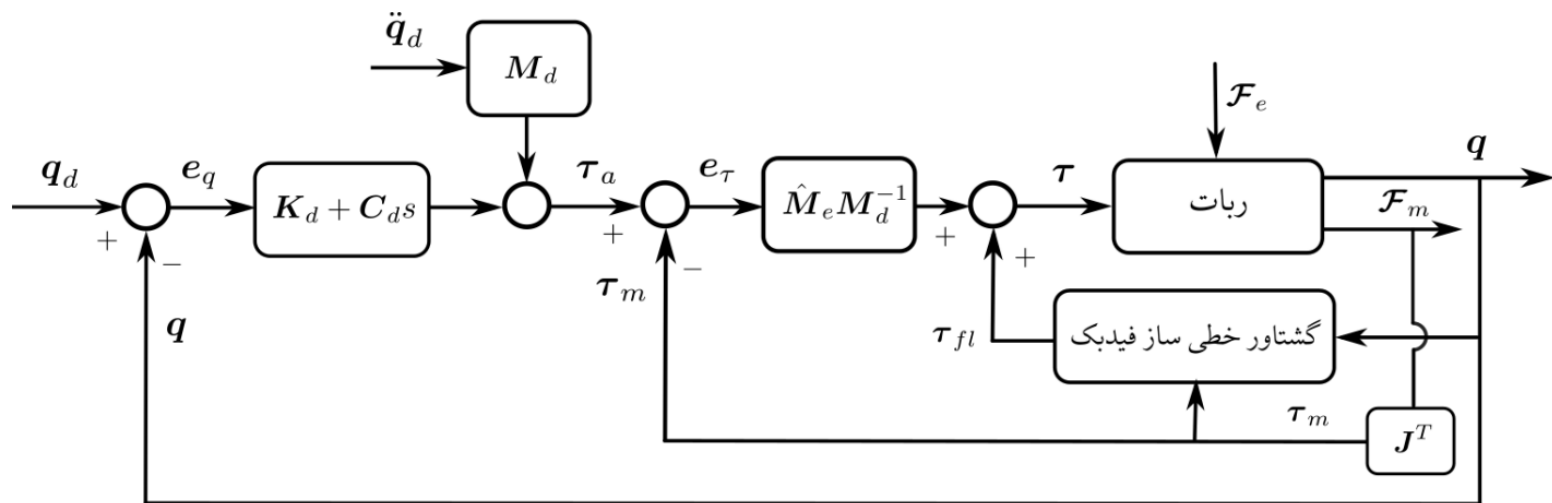
$$C_\tau(s) = K_P^{-1} \left(K_{\tau_p} + \frac{1}{s} K_{\tau_i} \right) e_\tau(s)$$

✓ کنترلگر نیرو معمولاً PI انتخاب می شود

✓ کارایی سیستم حلقه بسته

$$\ddot{q} + K_d \dot{q} + K_p q = K_{\tau_p} e_\tau(t) + K_{\tau_i} \int_0^t e_\tau(\eta) d\eta$$

• کنترل امپدانس



شکل ۱۱.۷ نمودار بلوکی کنترل امپدانس: فیدبک مکان در حلقه خارجی و فیدبک نیرو در حلقه داخلی.

• کنترل امپدانس

✓ تلاش کنترلی لازم

$$\tau = \hat{M}_e M_d^{-1} \cdot e_\tau + \tau_{fl}$$

$$e_\tau = \tau_a - \tau_m$$

$$\tau_a = M_d \ddot{q}_d + C_d \dot{q}_d + K_d e_q$$

$$\tau_{fl} = \left(\hat{C}(q, \dot{q}) + \hat{b}_e \right) \dot{q} + \hat{g}(q) + \tau_m$$

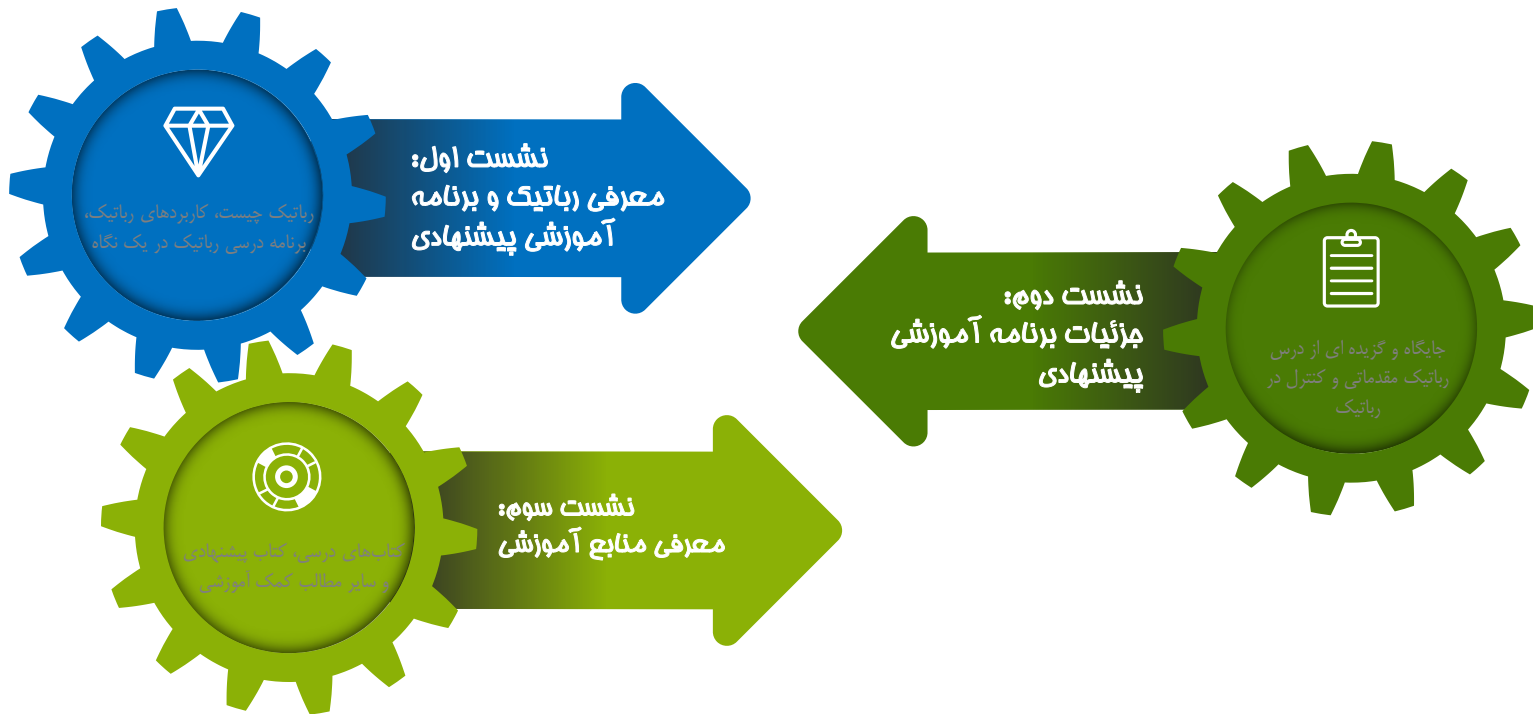
✓ رفتار سیستم حلقه بسته در غیاب نامعینی

$$M_d \ddot{e}_q + C_d \dot{e}_q + K_d e_q = \tau_e$$

□ تنظیم رابطه دینامیکی بین حرکت و نیرو

□ تنظیم امپدانس

نشست‌های علمی کارگاه در یک نگاه



بیوگرافی دکتر حمید رضا تقی راد

حمید رضا تقی راد مدرک کارشناسی خود را در مهندسی مکانیک از دانشگاه صنعتی شریف در سال ۱۳۶۸ و کارشناسی ارشد خود را در مهندسی مکانیک (مکاترونیک) در سال ۱۳۷۲ و دکترای خود را در مهندسی برق - کنترل و رباتیک در سال ۱۳۷۶ از دانشگاه مک گیل کانادا دریافت کرده است. او در حال حاضر استاد تمام و مدیر گروه رباتیک ارس در دپارتمان کنترل و سیستم، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است. ایشان دارای عضویت ارشد انجمن IEEE، دستیار سردبیر مجلات IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics، Frontiers in Robotics: AI - Biomedical Robotics، and International Journal of Robotics: Theory and Application هستند. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه وی کاربرد کنترل مقاوم و غیرخطی بر روی سیستم های رباتیک بوده و زمینه های مختلف رباتیک شامل ربات های موازی و کابلی، ربات های خودران، ربات های جراحی و سامانه های هپتیک آموزش جراحی چشم در حیطه تخصص ایشان قرار دارد. تحقیقات اخیر ایشان بیشتر معطوف بر ربات های پزشکی بوده و تالیفات ایشان شامل شش کتاب و بیش از ۳۰۰ مقاله در کنفرانس ها و مجلات معتبر بین المللی است.



حمید رضا تقی راد
استاد

بیوگرافی دکتر محمد اعظم خسروی

محمد اعظم خسروی مدرک کارشناسی خود را در مهندسی برق-الکترونیک از دانشگاه سیستان و بلوچستان در سال ۱۳۷۶ و کارشناسی ارشد خود را در مهندسی برق - کنترل در سال ۱۳۷۸ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی اخذ کرده است. پس از قریب به ۱۰ سال فعالیت در صنعت با بازگشت به دانشگاه، ایشان دکترای خود را در مهندسی برق- کنترل در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت کرد. ایشان در حال حاضر استادیار گروه کنترل و مدیر گروه مکاترونیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و حوزه‌های پژوهشی مورد علاقه وی مشتمل بر زمینه‌های مختلف رباتیک با تاکید بر کاربرد روش‌های کنترل غیرخطی و مقاوم، رباتیک پزشکی و اتوماسیون صنعتی و ابزار دقیق است.



محمد اعظم خسروی
استادیار



گروه رباتیک ارس

پایان بخش دوم

متشکرم

آموزش رباتیک برای مهندسان:

چالش ها و چشم انداز آینده

