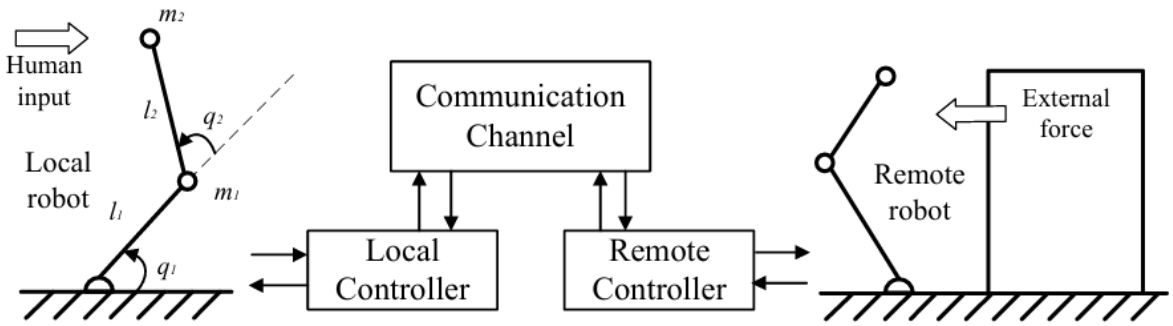
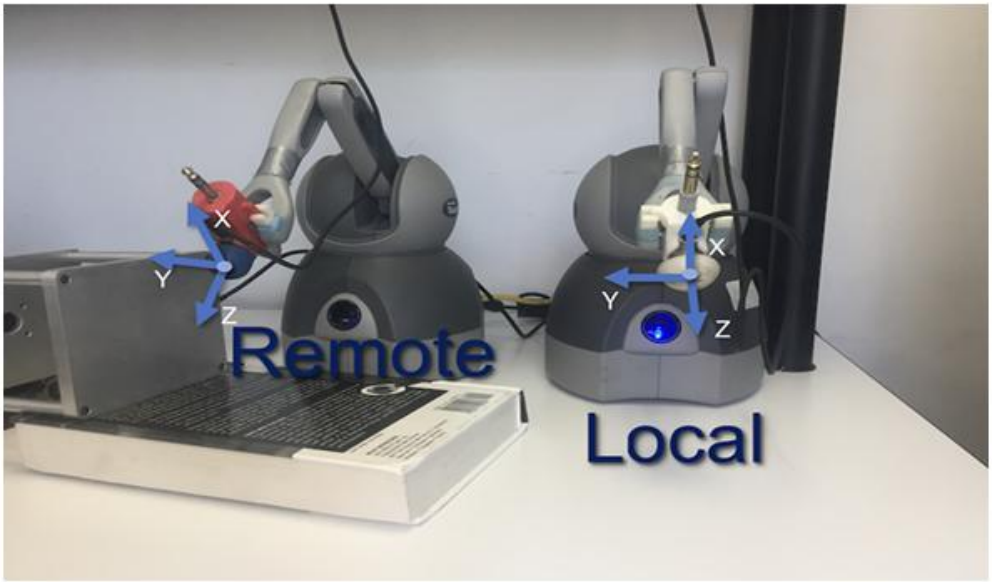
ب) سیستم رباتیک دورعملیات یا Teleoperation – ۴۰ نمره

مقدمه



تصویر ۲ دیاگرام مفهومی از سیستم دورعملیات دوطرفه



تصویر ۳ نمونه یک مدل آزمایشگاهی از سیستم ربات‌های دورعملیات

سیستم دورعملیات رباتیک، سیستمی است که به اپراتور انسانی اجازه می‌دهد تا یک ربات راه‌دور (Remote/ Slave) را در محیطی دور یا خطرناک کنترل کند، در حالی که خود اپراتور در یک ایستگاه محلی (Local/ Master) حضور دارد. این فناوری در کاربردهایی مانند جراحی از راه‌دور، اکتشافات زیر آب، راکتورهای هسته‌ای، ماموریت‌های فضایی، و عملیات نجات کاربرد دارد.

یک سیستم دورعملیات دوطرفه شامل چهار بخش اصلی است:

- **ربات محلی:** رباتی است که اپراتور به طور مستقیم با آن تعامل دارد و با اعمال نیرو، موقعیت مفاصل آن را تغییر می‌دهد. حسگرهای این ربات، موقعیت و سرعت مفاصل را اندازه‌گیری می‌کنند.
- **کانال ارتباطی:** داده‌های موقعیت/سرعت از محلی به راه‌دور ارسال می‌شود و گشتاورهای بازخورد نیرو از راه‌دور به محلی منتقل می‌گردد. در عمل، این کانال ممکن است دارای تاخیر زمانی و افت داده باشد.
- **ربات راه‌دور:** رباتی است که در محیط دور قرار دارد و وظیفه انجام وظیفه اصلی (مانند جابجایی جسم، برش بافت و...) را بر عهده دارد. این ربات به طور معمول با محیط اطراف خود تماس فیزیکی برقرار می‌کند.
- **کنترل‌کننده:** الگوریتمی که بر اساس خطای ردیابی (تفاوت موقعیت محلی و راه‌دور) گشتاورهای موتورهای ربات راه‌دور را محاسبه می‌کند تا حرکت آن شبیه به حرکت ربات محلی شود. همچنین در برخی طراحی‌ها، گشتاوری به موتورهای ربات محلی اعمال می‌کند تا اپراتور حس تماس با محیط را لمس کند (بازخورد نیرویی یا haptic feedback)

مدل دینامیکی ربات بازو

در این پروژه، هر دو ربات (محلی و راه‌دور) به صورت یک بازوی دو درجه آزادی با مفاصل چرخشی (2-DOF RR manipulator) مدل می‌شوند. معادله حرکت برای یک دینامیک ربات به فرم استاندارد لاگرانژی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M_i(\mathrm{q}_i)\ddot{\mathrm{q}}_i + C_i(\mathrm{q}_i, \dot{\mathrm{q}}_i)\dot{\mathrm{q}}_i + \mathrm{g}_i(\mathrm{q}_i) = \tau_i + \tau_{\mathrm{ext},i}$$

که در آن:

شاخص $i \in \{l, r\}$ نشان‌دهنده ربات محلی یا راه‌دور است (local/remote).

$\mathrm{q}_i = [q_{1i}, q_{2i}]^T$ بردار موقعیت زاویه‌ای مفاصل (رادیان).

$\dot{\mathrm{q}}_i$ و $\ddot{\mathrm{q}}_i$ به ترتیب سرعت و شتاب مفاصل.

$M_i(\mathrm{q}_i)$: ماتریس اینرسی 2×2 که وابسته به پیکربندی ربات است و بیانگر نیروهای اینرسی ناشی از شتاب مفاصل.

$C_i(\mathrm{q}_i, \dot{\mathrm{q}}_i)$: ماتریس کوریولیس و گریز از مرکز که وابسته به موقعیت و سرعت است و نیروهای غیرخطی ناشی از جفت شدگی سرعت‌ها را نشان می‌دهد.

$\mathrm{g}_i(\mathrm{q}_i)$: بردار نیروهای گرانشی که به جرم لینک‌ها و شتاب گرانش وابسته است.

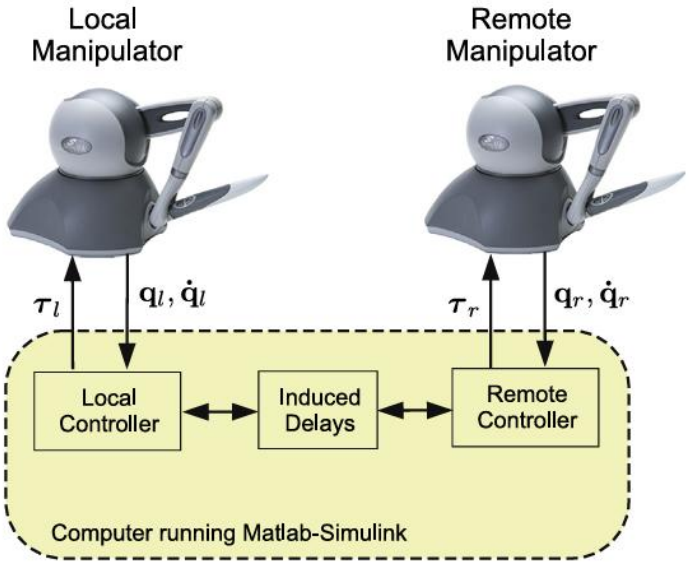
τ_i: گشتاورهای کنترلی اعمالی توسط محرک‌ها (موتورها) که ورودی سیستم است.

$\tau_{\mathrm{ext},i}$: گشتاورهای خارجی – برای ربات محلی، گشتاوری است که اپراتور به آن وارد می‌کند (نیروی دست اپراتور). برای ربات راه‌دور، گشتاور ناشی از تماس با محیط (نیروهای خارجی) است.

هدف پروژه

در این پروژه‌ی شبیه‌سازی، فرض می‌شود که ربات محلی توسط یک گشتاور خارجی $\tau_h(t)$ که از سوی اپراتور اعمال می‌شود، حرکت می‌کند .این گشتاور به صورت یک سیگنال زمانی به شما داده شده است. آن را به عنوان ورودی ربات محلی در مدل دینامیکی اعمال کنید. به عبارت دیگر، حرکت ربات محلی حاصل اعمال این گشتاور به سیستم دینامیکی آن است.

ربات راه‌دور باید موقعیت ربات محلی را دنبال کند. همچنین فرض می‌شود که کانال ارتباطی بدون نویز است اما دارای تاخیر زمانی (ثابت یا متغیر با زمان) می‌باشد و هیچ بازخورد نیرویی از ربات راه‌دور به ربات محلی اعمال نمی‌شود. بنابراین تنها هدف، دنبال‌کردن موقعیت ربات محلی توسط ربات راه‌دور است (در مراجع، به روش کنترل Bilateral یا Master-Slave معروف است)



تصویر ۴ بلوک دیاگرام سیستم رباتیک دورعملیات دوطرفه

شبیه سازی دینامیکی هر ربات

مدل لاگرانژی برای ساده‌سازی، یکسان درنظر گرفته می‌شود:

$$M_l(\mathrm{q}_l)\ddot{\mathrm{q}}_l + C_l(\mathrm{q}_l, \dot{\mathrm{q}}_l)\dot{\mathrm{q}}_l + \mathrm{g}_l(\mathrm{q}_l) = \tau_l + \tau_\mathrm{h}$$
$$M_r(\mathrm{q}_r)\ddot{\mathrm{q}}_r + C_r(\mathrm{q}_r, \dot{\mathrm{q}}_r)\dot{\mathrm{q}}_r + \mathrm{g}_r(\mathrm{q}_r) = \tau_r$$

که در آن:

$$\mathbf{q}_r = [q_{1r}, q_{2r}]^T \text{ ، } \mathbf{q}_l = [q_{1l}, q_{2l}]^T$$

$\boldsymbol{\tau}_l$: گشتاور کنترلی ربات محلی

$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{h}}$: گشتاور شبیه‌سازی‌شده دست اپراتور (که مسیر مرجع را تولید می‌کند)

$\boldsymbol{\tau}_r$: گشتاور کنترلی ربات راه‌دور که توسط قانون کنترل محاسبه می‌شود

درایه‌های ماتریس‌های دینامیکی ربات به صورت زیر است:

اینرسی M_i:

$$\begin{aligned} M_{i11} &= \alpha_i + 2\beta_i \cos(q_{2i}) \\ M_{i12} &= M_{i21} = \delta_i + \beta_i \cos(q_{2i}) \\ M_{i22} &= \delta_i \end{aligned}$$

کوریولیس C_i:

$$\begin{aligned} &C_{i11} = -2\beta_i \sin(q_{2i})\dot{q}_{2i}, C_{i12} = -\beta_i \sin(q_{2i})\dot{q}_{2i} \\ &C_{i21} = \beta_i \sin(q_{2i})\dot{q}_{1i}, \quad C_{i22} = 0 \end{aligned}$$

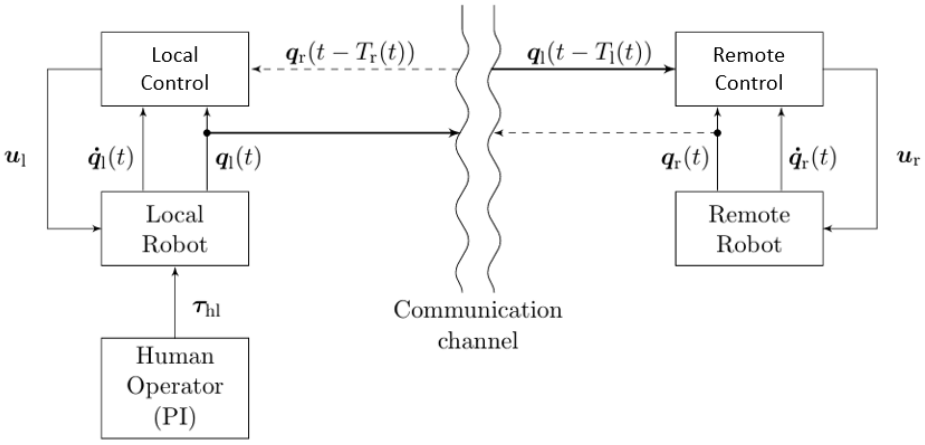
گرانش $\mathbf{g}_i$:

$$g_{i1} = \frac{1}{l_{2i}} g\delta_i \cos(q_{1i} + q_{2i}) + \frac{1}{l_{1i}}(\alpha_i - \delta_i)\cos(q_{1i})$$
$$g_{i2} = \frac{1}{l_{2i}} g\delta_i \cos(q_{1i} + q_{2i})$$

با پارامترهای کمکی:

$$\alpha_i = l_{2i}^2 m_{2i} + l_{1i}^2 (m_{1i} + m_{2i})$$

$$\beta_i = l_{1i} l_{2i} m_{2i} \quad , \quad \delta_i = l_{2i}^2 m_{2i}$$



تصویر ۵ بلوک دیاگرام کنترلی سیستم دورعملیات

قانون کنترلی

با استفاده از مدل کنترل‌کننده تناسبی + میرایی (Proportional Plus Damping)، قوانین کنترلی زیر برای دو ربات محلی (Local) و راه‌دور (Remote) نوشته می‌شود. این کنترل‌کننده به تنهایی (بدون نیاز به جمله انتگرالی) قادر است در حضور تاخیرهای متغیر با زمان، عملکرد دنبال‌کردن قابل قبولی ارائه دهد، مشروط به اینکه بهره‌ها به درستی تنظیم شوند

کنترل‌کننده ربات محلی:

$$\boldsymbol{\tau}_r = K_r[\mathbf{q}_l(t - T_l(t)) - \mathbf{q}_r] - B_r\,\dot{\mathbf{q}}_r$$

کنترل‌کننده ربات راه‌دور :

$$\boldsymbol{\tau}_l = K_l[\mathbf{q}_l - \mathbf{q}_r(t - T_r(t))] + B_l\,\dot{\mathbf{q}}_l$$

که در آن:

$K_l, K_r > 0$ بهره‌های تناسبی

$B_l, B_r > 0$ ضرایب میرایی

$\mathbf{q}_r(t - T_r(t))$: موقعیت راه‌دور در زمان گذشته با تاخیر $T_r(t)$ که از راه‌دور به محلی ارسال می‌شود.

$\mathbf{q}_l(t - T_l(t))$: موقعیت محلی در زمان گذشته با تاخیر $T_l(t)$ که به راه‌دور ارسال می‌شود.

خواسته‌های پروژه

نمودارهای پاسخ موقعیت دورانی ربات محلی و دور (به صورت جداگانه در هر مفصل)، نمودار خطای ردیابی و گشتاورهای کنترلی، با اعمال Legend های مناسب و به رنگ پس‌زمینه سفید ارائه شود.

تحلیل‌های مناسب از هر نمودار ارائه شود.

نکات پیاده‌سازی

به دلیل بزرگ بودن برنامه‌ی سیمولینک، استفاده از زیرسیستم‌ها و برچسب‌های goto پیشنهاد می‌شود. نامگذاری مناسب سیگنال‌ها می‌تواند به شما کمک کند.

شبیه‌سازی معادلات دینامیکی، به صورت MATLAB-Function و زیرسیستم‌های مختلف صورت پذیرد. سعی بر بدست آوردن $\ddot{\mathbf{q}}_i\ , i \in \{l, r\}$ کنید. سپس با دو بار انتگرال‌گیری به مقادیر موقعیت و سرعت برسید.

برای اعمال تاخیرهای متغیر با زمان $T_l(t)$ و $T_r(t)$، از بلوک Variable Transport Delay در سیمولینک استفاده شود. برای ساخت سیگنال گشتاور اپراتور، می‌توانید از بلوک Switch استفاده کنید.

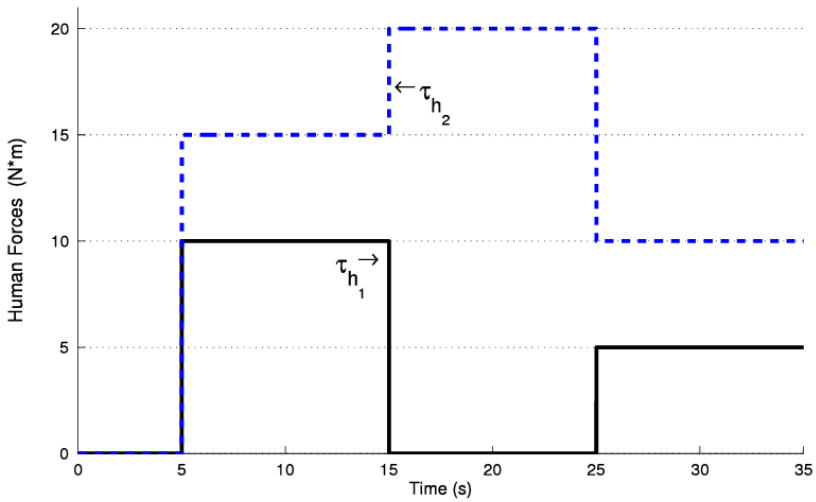
بهره‌های کنترل‌کننده (K_l, K_r, B_l, B_r) باید به گونه‌ای تنظیم شوند که سیستم حلقه بسته پایدار بوده و خطای دنبال‌کردن به اندازه کافی کوچک باشد. معمولاً با افزایش K خطای ماندگار کاهش می‌یابد و با افزایش B نوسانات کم می‌شوند، اما مقادیر بیش از حد ممکن است باعث ناپایداری یا اشباع گشتاور شود. همانطور که از معادلات مشخص است، توجه شود که این مقادیر همگی به صورت بهره‌های برداری هستند.

.

جزییات شبیه‌سازی

جدول ۲ مقادیر شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
زمان شبیه سازی(s)	35
تاخیر Local (s)	$T_l(t) = 0.2 + 0.1sin(5t) + 0.05sin(2.5t)$
تاخیر Remote (s)	$T_r(t) = 0.2 + 0.1sin(2.5t) + 0.05sin(5t)$
شرایط اولیه‌ی موقعیت (rad)	$q_l(0) = [-\pi/3, \pi/3]^T, \qquad q_r(0) = [0,0]^T$
شرایط اولیه‌ی سرعت (rad/s)	همگی صفر
طول لینک‌ها (m)	$l_{1i} = 0.38, l_{2i} = 0.38$
جرم‌های ربات محلی(kg)	$m_{1l} = 3.9473, m_{2l} = 0.6232$
جرم‌های ربات دور (kg)	$m_{1r} = 3.2409, m_{2r} = 0.3185$
گشتاور اعمالی اپراتور(N.m)	شکل 1 : τ_h



تصویر ۶ سیگنال زمانی گشتاور اعمالی اپراتور