

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ
وَالَّذِي يُضَوِّبُ الْمَوْتَاطِ
وَالَّذِي يُنَزِّلُ الْمَطَرَ
وَالَّذِي يُحْيِي الْمَوْتَى
وَالَّذِي يُحْيِي الْمَوْتَى
وَالَّذِي يُحْيِي الْمَوْتَى

بسمه تعالی



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

کنترل وفقی بازوی ربات در حضور نامعینی‌ها و اختلال نیروی خارجی نامشخص

رساله دکترای مهندسی برق
محمد دانش

اساتید راهنما

دکتر مهدی کشمیری

دکتر فرید شیخ‌الاسلام



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

رساله دکترای مهندسی برق آقای محمد دانش

با عنوان

کنترل وفقی بازوی ربات در حضور نامعینی‌ها و اختلال نیروی خارجی نامشخص

در تاریخ ۱۳۸۵/۸/۱۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و اصالت و صحت مطالب رساله مورد تأیید قرار گرفت.

- | | |
|----------------------------|-----------------|
| دکتر فرید شیخ‌الاسلام | ۱- استاد راهنما |
| دکتر مهدی کشمیری | ۲- استاد راهنما |
| دکتر علی خاکی صدیق | ۳- استاد مشاور |
| دکتر حمید تقی‌راد | ۴- استاد مشاور |
| دکتر سید علی اکبر موسویان | ۵- استاد داور |
| دکتر امیر حسین دوایی مرکزی | ۶- استاد داور |
| دکتر محمد جعفر صدیق | ۷- استاد داور |
| دکتر سعید حسین‌نیا | ۸- استاد داور |

دکتر علی محمد دوست حسینی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیر و تشکر

من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

پس از سپاس فراوان از خداوند سبحان لازم است که تشکر ویژه نمایم از اساتید ارجمند راهنما آقایان دکتر شیخ الاسلام و دکتر کشمیری که در کلیه مراحل انجام و تدوین این رساله نظرات سودمندشان گره-گشای مشکلات موجود در سر راه این تحقیق بود و صبورانه و با دقت نظر زیاد راهنمایی‌های ارزنده‌ای را ارائه نمودند و حمایت‌های بی‌دریغ‌شان مشوق و محرک اینجانب در پیشبرد فعالیت‌های این رساله بود.

همچنین از آقایان دکتر خاکی‌صدیق و دکتر تقی‌راد که در جلسه تبیین رساله راهنمایی‌های بسیار ارزشمندی را در خصوص جهت‌دهی مناسب به ادامه کار دادند و نیز از سرعت و دقت نظری که در زمینه ارزیابی این تحقیق داشتند کمال تشکر را به عمل می‌آورم.

از آقایان دکتر موسویان، دکتر دوائی، دکتر صدیق و دکتر حسین‌نیا که زحمت داوری این رساله را قبل فرمودند و در جلسه دفاع از رساله نکات مفیدی را یادآور شدند سپاسگزارم. همچنین تشکر ویژه دارم از آقای دکتر دوست‌حسینی که در طول تحصیل اینجانب در دوره دکترا با دقت نظر بالا زحمات زیادی را کشیدند. از خانم نکویی کارمند کوشای تحصیلات تکمیلی که برای هماهنگی‌های لازم جهت برگزاری جلسه دفاع و ویرایش رساله همکاری زیادی کردند و نیز از سایر کارکنان دانشکده برق و کامپیوتر متشکرم.

از خانواده‌ام مخصوصاً پدر و مادر عزیزم که صبورانه و فداکارانه سالیان متمادی زحمات بسیار زیادی را کشیدند که شاید جبران لحظه‌ای از آن برایم ممکن نباشد و مشوق و راهنمایم در عرصه‌های مختلف زندگی بودند صمیمانه کمال امتنان و سپاس را دارم. از برادران و خواهرم که مشفقانه کمک‌های فراوانی را به من کردند نهایت تشکر را دارم. از همسر عزیز، دلسوز و مهربانم و نیز خانواده همسر که با درک موقعیتی که در آن بودم مشوق، همراه و حامی من بودند بسیار سپاسگزارم.

از کلیه اساتیدی که از محضرشان استفاده کرده‌ام و دوستانی که از نعمت همراهی و مصاحبت با آنان برخوردار بوده‌ام و کلیه عزیزانی که مجال آن نشد که از آنها نامی بیاورم کمال تشکر و امتنان را دارم و سلامتی و تأییدات روزافزون همگی را از درگاه ایزد منان خواستارم.

تقدیم به پیشگاہ
پیامبر اعظم، حضرت ختمی مرتبت
محمد مصطفیٰ (ص)

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
۵۵	فهرست علائم و نمادها
پانزده	فهرست شکل‌ها
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱. موضوع مورد بحث
۴	۲-۱. تاریخچه
۸	۳-۱. اهداف و نتایج به دست آمده در این رساله
۱۱	۴-۱. روند ارائه مطالب
۱۳	فصل دوم: معادله حرکت بازوی ربات
۱۳	۱-۲. مقدمه
۱۳	۲-۲. دینامیک‌های اوایلر-لاگرانژ
۱۴	۱-۲-۲. معادلات لاگرانژ حرکت
۱۷	۲-۲-۲. به دست آوردن دینامیک‌های بازو
۲۲	۳-۲. ساختار و خواص معادله ربات
۲۳	۱-۳-۲. خواص ماتریس اینرسی
۲۴	۲-۳-۲. خواص جملات کوریولیس/جانب مرکز
۳۰	۳-۳-۲. خواص جاذبه، اختلال و اصطکاک
۳۲	۴-۳-۲. خطی بودن در پارامترها
۳۶	۵-۳-۲. پسیو بودن و پایستاری انرژی
۳۸	۴-۲. خلاصه
۴۱	فصل سوم: کنترل وفقی بازو جهت حذف اثر اختلال نیرو با پارامترهای اینرسی معین
۴۱	۱-۳. مقدمه
۴۱	۲-۳. طراحی و تحلیل کنترل کننده مبتنی بر تخمین زن نیرو
۵۰	۳-۳. شبیه سازی
۶۲	۴-۳. نتیجه گیری
۶۳	فصل چهارم: کنترل وفقی بازو جهت حذف اثر اختلال نیرو با پارامترهای اینرسی نامشخص
۶۳	۱-۴. مقدمه
۶۴	۲-۴. طراحی و تحلیل کنترل کننده وفقی پیشنهادی

صفحه	عنوان
۷۲	۳-۴. شبیه‌سازی
۸۱	۴-۴. نتیجه‌گیری
۸۲	فصل پنجم: کنترل وفقی مقاوم بازوی ربات با وجود اختلال نیروی خارجی نامشخص و نامعینی‌های ساختاری و غیرساختاری
۸۲	۱-۵. مقدمه
۸۳	۲-۵. الگوریتم وفقی مقاوم پیشنهادی
۸۵	۳-۵. تحلیل پایداری سیستم کنترل پیشنهادی
۸۹	۴-۵. تحلیل پایداری سیستم کنترل پیشنهادی در حالت خاص
۹۳	۵-۵. شبیه‌سازی
۱۰۸	۶-۵. نتیجه‌گیری
۱۳۸	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۳۸	۱-۶. نتیجه‌گیری
۱۴۳	۲-۶. پیشنهادات
۱۴۴	پیوست‌ها: پیوست الف: نرم‌ها
۱۴۷	پیوست ب: قضایا
۱۴۸	پیوست ج: کراندار بودن
۱۵۲	مراجع

فهرست علائم و نمادها

α_2 و α_1	توابع کلاس K
β_2 و β_1	توابع کلاس K
c_1	$\cos q_1$
c_{12}	$\cos(q_1 + q_2)$
c_2	$\cos q_2$
d	کران نامعینی غیرساختاری ($\ \mathbf{r}_d\ < d$)
$d(H, \mathbf{x})$	فاصله میان H و \mathbf{x}
\hat{d}	تخمین d (کران نامعینی غیرساختاری)
\tilde{d}	خطای تخمین کران نامعینی غیرساختاری ($\tilde{d} = d - \hat{d}$)
dm	یک جرم بی نهایت کوچک
δ_2 و δ_1	ثابت های مثبت تعریف شده توسط طراح در به ترتیب S_2 و S_1
δp	بردار تغییر مکان مجازی پنجه در فضای کارتیزین
δq	بردار تغییر مکان مجازی مفاصل در فضای مفاصل
δW	کار مجازی
\mathbf{e}	خطای تعقیب مسیر ($\mathbf{e}(t) = \mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}(t)$)
\mathbf{e}_4	آخرین ستون ماتریس همانی 4×4 (یعنی $\mathbf{e}_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$)
ε_1	ثابت مثبت در اصلاح قانون کنترل \mathbf{u}_p
ε_2	ثابت مثبت در اصلاح قانون کنترل \mathbf{u}_d
η	بهره قانون تخمین d (کران نامعینی غیرساختاری)
\mathbf{F}	اصطکاک (جمله گشتاور اصطکاک در معادله دینامیکی حرکت بازو)
\mathbf{F}_d	اصطکاک دینامیکی
\mathbf{F}_{ext}	اختلال نیروی خارجی اعمالی به ریات
$\hat{\mathbf{f}}$	تخمین \mathbf{F}_{ext}
$\tilde{\mathbf{f}}$	خطای تخمین نیرو ($\tilde{\mathbf{f}} = \mathbf{F}_{\text{ext}} - \hat{\mathbf{f}}$)
\mathbf{F}_v	ماتریس ضرایب اصطکاک چسبندگی
F_x	مؤلفه افقی \mathbf{F}_{ext} (در راستای محور x)

مؤلفه عمودی \mathbf{F}_{ext} (در راستای محور y)	F_y
مؤلفه افقی $\hat{\mathbf{f}}$ (در راستای محور x)	\hat{f}_x
مؤلفه عمودی $\hat{\mathbf{f}}$ (در راستای محور y)	\hat{f}_y
شتاب جاذبه	g
بردار جاذبه در مختصات پایه	\mathbf{g}
بردار گشتاور جاذبه (جمله جاذبه در معادله دینامیکی حرکت بازو)	\mathbf{G}
$\gamma = \max(\ \Lambda \mathbf{e}\ , \ \dot{\mathbf{e}}\)$	γ
کران بالای نرم بردار گشتاور جاذبه ($\ \mathbf{G}(\mathbf{q})\ \leq g_b(\mathbf{q})$)	g_b
مجموع جملات کوریولیس/جانب مرکز، جاذبه و اصطکاک در معادله دینامیکی حرکت بازو	\mathbf{h}
همیلتونین	H
ماتریس 4×4 انتقال همگن از چهارچوب i ام به چهارچوب مبنا	\mathbf{H}_i
ماتریس همانی	\mathbf{I}
ماتریس شبه اینرسی عضو i	\mathbf{I}_i
ماتریس همانی $n \times n$	\mathbf{I}_n
ماتریس حاصل ضرب‌های اینرسی I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}	
ماتریس ژاکوبین	\mathbf{J}
ماتریس بهره کنترل‌کننده	\mathbf{K}
ماتریس بهره تخمین‌زن نیرو	\mathbf{K}_f
ضریب اصطکاک ایستایی برای مفصل i	k_{si}
ماتریس بهره تخمین‌زن پارامتر	\mathbf{K}_θ
ضریب خطای تعقیب مسیر در $\mathbf{r} = \dot{\mathbf{e}} + \Lambda \mathbf{e}$	Λ
طول عضو اول بازو	l_1
طول عضو دوم بازو	l_2
مقدار ویژه حداقل $\Lambda \mathbf{K}$	λ_1
مقدار ویژه حداکثر $\Lambda \mathbf{K}$	λ_2
لاگرانژین	L

ماتریس اینرسی	\mathbf{M}
جرم عضو اول بازو	m_1
جرم عضو دوم بازو	m_2
مقدار ویژه حداقل \mathbf{M} روی جمیع \mathbf{q} ها ($\mu_1 = \min_q \lambda_{\min}(\mathbf{M})$)	μ_1
مقدار ویژه حداکثر \mathbf{M} روی جمیع \mathbf{q} ها ($\mu_2 = \max_q \lambda_{\max}(\mathbf{M})$)	μ_2
یک متغیر کمکی ($\mathbf{v} = \dot{\mathbf{q}}_d + \Lambda \mathbf{e}$)	\mathbf{v}
$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \Lambda \mathbf{K} \Lambda & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Lambda \end{bmatrix}$	\mathbf{P}
کران‌های بالا و پایین ماتریس اینرسی ($\phi_1 \mathbf{I} \leq \mathbf{M}(\mathbf{q}) \leq \phi_2 \mathbf{I}$)	ϕ_1 و ϕ_2
بردار مختصات تعمیم‌یافته در فضای مفاصل (بردار متغیرهای مفاصل)	\mathbf{q}
بردار سرعت مفاصل در فضای مفاصل	$\dot{\mathbf{q}}$
بردار شتاب مفاصل در فضای مفاصل	$\ddot{\mathbf{q}}$
بردار مختصات تعمیم‌یافته مطلوب در فضای مفاصل ($\mathbf{q}_d(t)$: مسیر زمانی مطلوب)	\mathbf{q}_d
بردار سرعت مطلوب مفاصل در فضای مفاصل	$\dot{\mathbf{q}}_d$
بردار شتاب مطلوب مفاصل در فضای مفاصل	$\ddot{\mathbf{q}}_d$
موقعیت عضو اول بازو	q_1
موقعیت عضو دوم بازو	q_2
بردار نیروی تعمیم‌یافته	\mathbf{Q}_F
مختصات یک نقطه روی ربات نسبت به چهارچوب مبنا	\mathbf{r}
فیلتر شده خطای تعقیب مسیر ($\mathbf{r} = \dot{\mathbf{e}} + \Lambda \mathbf{e}$)	\mathbf{r}
مختصات یک نقطه مشخص روی عضو i نسبت به چهارچوب i	${}^i \mathbf{r}$
کران نامعینی ساختاری ($\ \tilde{\boldsymbol{\theta}}\ = \ \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_0\ \leq \rho$)	ρ
تخمین ρ	$\hat{\rho}$
خطای تخمین ρ ($\tilde{\rho} = \rho - \hat{\rho}$)	$\tilde{\rho}$
$\sin q_1$	s_1
ضریب اصلاحی در قانون تخمین ρ	S_1
$\sin(q_1 + q_2)$	s_{12}

	$\sin q_2$	s_2
	ضریب اصلاحی در قانون تخمین d	S_2
	زمان	t
	انرژی جنبشی	T
	انرژی جنبشی عضو i ام	T_i
	بردار گشتاور مفاصل	τ
	نامعینی غیرساختاری	τ_d
	گشتاور نامی کنترلی بدون حضور نامعینی و اختلال ($\tau_0 = \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}})\boldsymbol{\theta}_0 + \mathbf{K}\mathbf{r}$)	τ_0
	بردار پارامترهای (واقعی) ربات	$\boldsymbol{\theta}$
	تخمین $\boldsymbol{\theta}$	$\hat{\boldsymbol{\theta}}$
	خطای تخمین پارامتر ($\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}$) در کنترل وفقی فصل ۴	$\tilde{\boldsymbol{\theta}}$
	اختلاف میان بردارهای پارامترهای واقعی و نامی ربات ($\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_0$) در کنترل وفقی مقاوم	$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}$
	فصل ۵	
	بردار پارامتر نامی	$\boldsymbol{\theta}_0$
	انرژی پتانسیل	U
	سیگنال کنترل جهت مقاوم سازی نسبت به نامعینی غیرساختاری	\mathbf{u}_d
	انرژی پتانسیل عضو i ام	U_i
	سیگنال کنترل جهت مقاوم سازی نسبت به نامعینی ساختاری	\mathbf{u}_p
	سرعت نقطه در مختصات مبنا	\mathbf{v}
	تابع لیپانوف	$V(\mathbf{x}, t)$
	بردار کوریولیس/جانب مرکز	$\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$
	$V_E = \mathbf{e}^T \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{K} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e} + \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{K} \dot{\mathbf{e}}$	V_E
	توابع لیپانوف	V_2 و V_1
	$\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{V}_m(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$	\mathbf{V}_m
	یک متغیر کمکی ($V_u = \frac{1}{2\eta} \tilde{d}^2 + \frac{1}{2\zeta} \tilde{\rho}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{f}}^T \mathbf{K}_f \tilde{\mathbf{f}}$)	V_u
	یک متغیر کمکی ($w = \ \mathbf{r}\ d - \mathbf{r}^T \mathbf{u}_d = \ \mathbf{r}\ d - \ \mathbf{r}\ ^2 \frac{d}{\varepsilon_2}$)	w

بردار حالت سیستم حلقه بسته	\mathbf{x}
ماتریس رگرسیون یا رگرسور	\mathbf{Y}, \mathbf{Y}_1
یک متغیر ماتریسی کمکی $(\mathbf{Z}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) = [-\mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \quad \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}})])$	\mathbf{Z}
بهره قانون تخمین ρ	ξ
کران‌های بالا و پایین نرم ماتریس اینرسی $(\xi_1 \leq \ \mathbf{M}(\mathbf{q})\ \leq \xi_2)$	ξ_1 و ξ_2

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱. یک بازو با نیروی خارجی \mathbf{F}_{ext} اعمالی به پنجه آن.
۳	شکل ۱-۲. سنسور نیرو (نیرو/گشتاور).
۹	شکل ۱-۳. یک بلوک دیاگرام کلی از طرح‌های پیشنهادی.
۱۵	شکل ۱-۲. بازوی آرنجی صفحه ای دو عضوی.
۳۷	شکل ۲-۲. توصیف ورودی- خروجی از سیستم غیرخطی.
۴۴	شکل ۱-۳. سیستم کنترل وفقی ربات با تخمین زن نیرو.
۵۱	شکل ۲-۳. پاسخ بدون جبران‌سازی نیرو.
۵۲	شکل ۳-۳. پاسخ با جبران‌سازی نیرو با سنسور نیرو.
۵۴	شکل ۴-۳. پاسخ سیستم کنترل ربات پیشنهادی به ازای اختلال $\mathbf{F}_{\text{ext}} = [50, 10]^T$.
۵۶	شکل ۵-۳. پاسخ سیستم کنترل ربات پیشنهادی به ازای اختلال مربعی.
۵۷	شکل ۶-۳. پاسخ سیستم کنترل ربات پیشنهادی به ازای اختلال سینوسی.
۵۸	شکل ۷-۳. پاسخ سیستم کنترل به ازای $\mathbf{q}_d(t) = 0.5[\sin 10t, \cos 10t]^T$ و $T_s = 5ms$.
۶۰	شکل ۸-۳. پاسخ سیستم کنترل به ازای $\mathbf{q}_d(t) = 0.5[\sin 10t, \cos 10t]^T$ و $T_s = 0.5ms$.
۶۵	شکل ۱-۴. سیستم کنترل وفقی ربات با تخمین‌زن‌های نیرو و پارامتر.
۷۴	شکل ۲-۴. پاسخ بدون جبران‌سازی نیرو.
۷۵	شکل ۳-۴. پاسخ با جبران‌سازی نیرو با سنسور نیرو.
۷۷	شکل ۴-۴. پاسخ سیستم کنترل ربات پیشنهادی به ازای اختلال $\mathbf{F}_{\text{ext}} = [50, 10]^T$.
۷۹	شکل ۵-۴. پاسخ سیستم کنترل ربات پیشنهادی به ازای اختلال مربعی.
۸۰	شکل ۶-۴. پاسخ سیستم کنترل ربات پیشنهادی به ازای اختلال سینوسی.
۸۴	شکل ۱-۵. سیستم کنترل ربات وفقی مقاوم با تخمین‌زن‌های نیرو، کران نامعینی ساختاری و کران نامعینی غیرساختاری.
۱۱۰	شکل ۲-۵. پاسخ سیستم کنترل بدون وجود اختلال و نامعینی، و با ورودی $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_0$.
۱۱۱	شکل ۳-۵. پاسخ سیستم کنترل وفقی ربات فصل ۳ با وجود اختلال $\boldsymbol{\tau}_d$.
۱۱۳	شکل ۴-۵. پاسخ سیستم کنترل وفقی ربات فصل ۴ با وجود اختلال $\boldsymbol{\tau}_d$.
۱۱۵	شکل ۵-۵. پاسخ RAC با معلوم بودن ρ و d ، و تخمین \mathbf{F}_{ext} .
۱۱۶	شکل ۶-۵. پاسخ RAC با تخمین ρ ، d و \mathbf{F}_{ext} .
۱۱۸	شکل ۷-۵. پاسخ RAC با تخمین ρ ، d و \mathbf{F}_{ext} ، و به ازای $\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{0}$.
۱۱۹	شکل ۸-۵. پاسخ RAC با تخمین ρ و d ، بدون لحاظ کردن نیرو در قانون کنترل، و به ازای $\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{0}$.
۱۲۰	شکل ۹-۵. پاسخ RAC با معلوم بودن ρ و d ، تخمین \mathbf{F}_{ext} ، و به ازای $\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{0}$.

- شکل ۱۰-۵. پاسخ RAC با معلوم بودن ρ و d ، شامل τ_d شامل $\mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}}$ ، و به ازای $d = 7.3$. ۱۲۱
- شکل ۱۱-۵. پاسخ RAC با معلوم بودن ρ و d ، شامل τ_d شامل $\mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}}$ ، و به ازای $d = 10$. ۱۲۲
- شکل ۱۲-۵. پاسخ RAC با معلوم بودن ρ و d ، شامل τ_d شامل $\mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}}$ ، و به ازای $d = 35$. ۱۲۳
- شکل ۱۳-۵. پاسخ RAC با تخمین ρ و d ، شامل τ_d شامل $\mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}}$ ، و بدون اصلاح ضرایب قوانین تطبیق برای تخمین ρ و d . ۱۲۴
- شکل ۱۴-۵. پاسخ RAC با اصلاح ضرایب قوانین تطبیق برای تخمین ρ و d ، و τ_d شامل $\mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}}$. ۱۲۵
- شکل ۱۵-۵. پاسخ سیستم کنترل ربات مقاوم اسپانگ در حضور $\tilde{\theta}$ و τ_d ، و بدون اعمال اختلال نیروی خارجی. ۱۲۶
- شکل ۱۶-۵. پاسخ سیستم کنترل ربات مقاوم اسپانگ در حضور $\tilde{\theta}$ ، τ_d و اختلال نیروی خارجی $\mathbf{F}_{\text{ext}} = [50, 10]^T$. ۱۲۷
- شکل ۱۷-۵. پاسخ RAC با معلوم بودن ρ و d ، شامل τ_d شامل $\mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}}$ ، و به ازای $d = 7.3$ و $\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{0}$. ۱۲۸
- شکل ۱۸-۵. پاسخ RAC با معلوم بودن ρ و d ، شامل τ_d شامل $\mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}}$ ، و به ازای $d = 35$ و $\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{0}$. ۱۲۹
- شکل ۱۹-۵. پاسخ RAC با تخمین ρ و d ، شامل τ_d شامل $\mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}}$ ، و به ازای $d = 35$ و $\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{0}$. ۱۳۰
- شکل ۲۰-۵. پاسخ RAC با معلوم بودن ρ و d ، تخمین \mathbf{F}_{ext} ، و با قانون کنترل اصلاح نشده. ۱۳۱
- شکل ۲۱-۵. پاسخ RAC با تخمین ρ ، d و \mathbf{F}_{ext} ، و با قوانین تطبیق اصلاح نشده. ۱۳۲
- شکل ۲۲-۵. پاسخ سیستم کنترل و فقی ربات فصل ۳ با $|\tau_{1,\text{max}}| = 80N.m$ و $|\tau_{2,\text{max}}| = 30N.m$. ۱۳۳
- شکل ۲۳-۵. پاسخ سیستم کنترل و فقی ربات فصل ۳ با $|\tau_{1,\text{max}}| = 80N.m$ و $|\tau_{2,\text{max}}| = 32N.m$. ۱۳۴
- شکل ۲۴-۵. پاسخ سیستم کنترل و فقی ربات فصل ۴ با $|\tau_{1,\text{max}}| = 80N.m$ و $|\tau_{2,\text{max}}| = 32N.m$. ۱۳۵
- شکل ۲۵-۵. پاسخ RAC با تخمین ρ ، d و \mathbf{F}_{ext} ، و $|\tau_{1,\text{max}}| = 80N.m$ و $|\tau_{2,\text{max}}| = 32N.m$. ۱۳۶
- شکل ۲۶-۵. پاسخ RAC با تخمین ρ ، d و \mathbf{F}_{ext} ، و $|\tau_{1,\text{max}}| = 100N.m$ و $|\tau_{2,\text{max}}| = 32N.m$. ۱۳۷
- شکل ب-۱. برخی از انواع کراندار بودن. ۱۴۹
- شکل ب-۲. نمودار زمانی بند الف مثال ب-۱. ۱۵۰
- شکل ب-۳. نمودار زمانی بند ب مثال ب-۱. ۱۵۱

چکیده:

در این رساله، راهبرد وفقی جهت دفع اختلالات نیروی خارجی ناشناخته وارد بر ربات ارائه شده است. در این راهبرد، فیدبک موقعیت و سرعت مفاصل، و پیش‌تغذیه نیرو در کنترل سیستم و دفع اختلالات نیرو مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سیگنال‌های موقعیت و سرعت با استفاده از سنسورهای مربوط، و سیگنال نیرو به دلیل پرهزینه بودن و مشکلات فنی به-کارگیری سنسور نیرو، با استفاده از تخمین‌زن وفقی نیرو استخراج شده‌اند. بر مبنای این تخمین‌زن، الگوریتم‌های وفقی جهت کنترل بازوی ربات به‌گونه‌ای پیشنهاد شده‌اند که برای حالات در نظر گرفته شده، سیستم کنترل قابلیت دفع اختلالات نیرو را داشته و در نتیجه، ربات توانایی تعقیب مسیر حرکت مورد نظر را داشته باشد. الگوریتم‌های مناسب برای حالتی که دینامیک ربات کاملاً مشخص است و نیز حالتی که پارامترهای دینامیکی ربات نامعین می‌باشند ارائه گردیده‌اند. در هر یک از این حالات، نوع، محدوده و شرایط پایداری سیستم حلقه‌بسته تحلیل و اثبات شده‌اند. از آنجایی که نامعینی غیرساختاری می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در تقلیل عملکرد و پایداری سیستم داشته باشند، جهت مقاوم کردن سیستم کنترل نسبت به این نوع نامعینی، یک الگوریتم کنترل وفقی مقاوم پیشنهاد شده و پایداری یکنواخت آن در قالب یک قضیه اثبات شده است. پایداری مجانبی یکنواخت سراسری (GUAS) و کراندار بودن نهایتاً یکنواخت (UUB) خطای تعقیب با قوانین کنترلی پیشنهادی برای حالت‌های خاص تضمین گردیده‌اند. مطلوبیت عملکرد و کارآمد بودن هر یک از روش‌های پیشنهادی، و نیز صحت نتایج حاصل از مباحث تئوری با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی یک بازوی ربات نمونه نشان داده شده است.

فصل اول

مقدمه

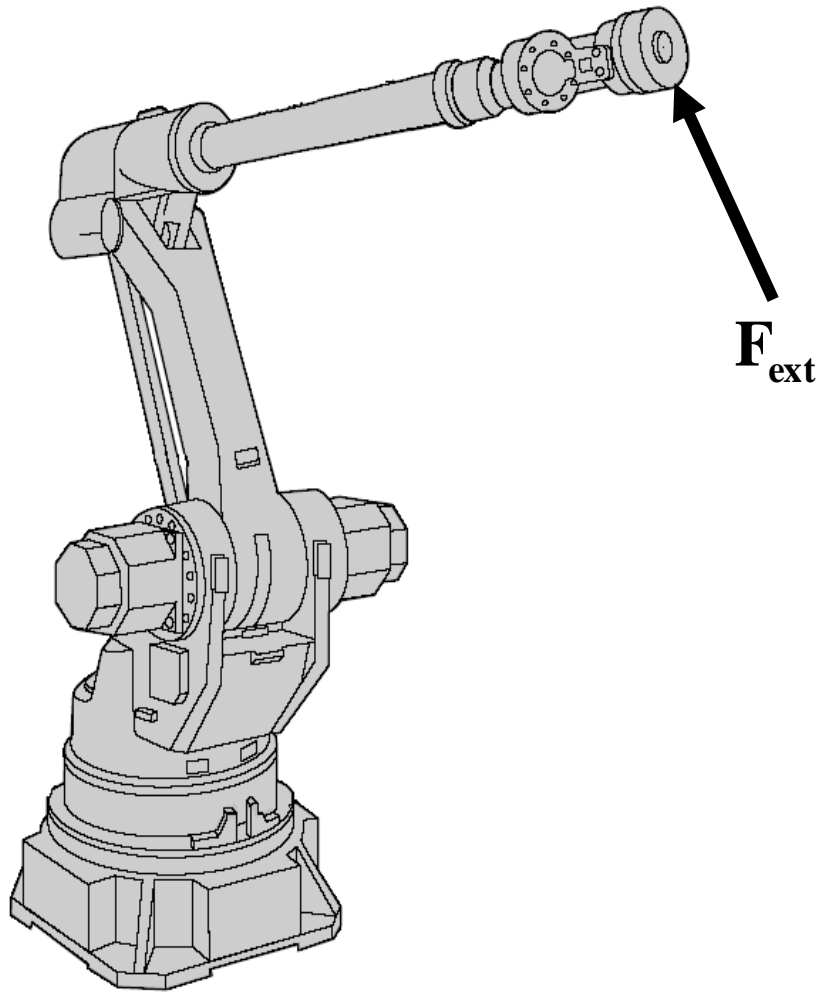
۱-۱. موضوع مورد بحث

در بسیاری از کاربردهای رباتیک، پنجه ربات با محیط در تماس است و نیرویی از محیط به ربات یا بالعکس اعمال می‌شود. به عنوان مثال، در کاربردهایی نظیر براده‌برداری، سنگ‌زنی و مونتاژ دقیق، لازم است پنجه با محیط تماس پیدا کند و این تماس را حفظ نماید [۱]. همچنین در مونتاژ برخی قطعات الکترونیکی، موفقیت کار به نظارت و کنترل نیروی جایگذاری به شدت وابسته است [۲]. در برخی از این کاربردها نیرو به صورت *اختلال* عمل می‌نماید و می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر رفتار سیستم داشته باشد. به طور مثال، اعمال شدن نیروی خارجی ناخواسته به یک بازوی متحرک می‌تواند حرکت ربات را ناپایدار کند [۳]. برای استفاده صحیح از ربات در چنین مواردی، هم نیرو و هم موقعیت باید در طراحی سیستم کنترل منظور شود [۱]. شکل ۱-۱ یک بازوی ربات را نشان می‌دهد که به پنجه آن نیروی خارجی F_{ext} وارد می‌گردد. معمولاً برای اندازه‌گیری موقعیت به سنسورهای موقعیت، و برای اندازه‌گیری نیرو (نیرو/گشتاور) به سنسور نیرو (نیرو/گشتاور) نیاز می‌باشد. شکل ۱-۲ یک سنسور نیرو را نشان می‌دهد.

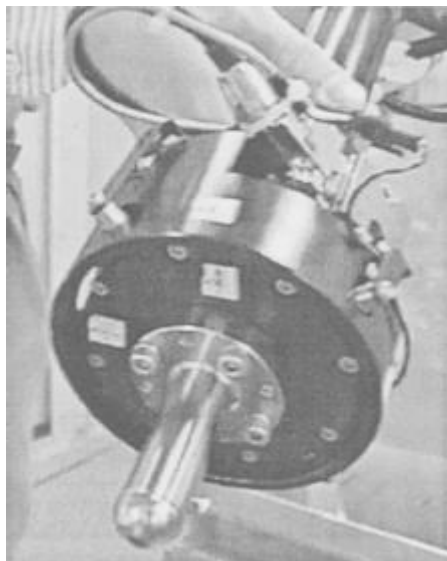
استفاده از سنسور نیرو به دلیل مشکلاتی که به همراه دارد در کاربردهای صنعتی متداول نگردیده

و از نامعینی‌های

است. یکی از ا



شکل ۱-۱. یک بازو با نیروی خارجی F_{ext} اعمالی به پنجه آن.



شکل ۱-۲. سنسور نیرو (نیرو/گشتاور).

محیطی نظیر دمای زیاد و نویز بزرگ متأثر می‌گردد امکان نصب سنسور نیرو بر روی ربات وجود ندارد [۱]. علاوه بر این، برای مواردی که سنسور نیرو به‌سادگی قابل استفاده است نصب سنسور روی ربات، ساختار بازو را پیچیده می‌کند [۴]. با توجه به این مشکلات، باید به دنبال جایگزین مناسبی برای سنسور نیرو باشیم. در این رساله، کنترل مسیر ربات با اختلال نیرو بدون استفاده از سنسور نیرو مد نظر است.

۲-۱. تاریخچه

استفاده از کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مشاهده‌گر اختلال^۱ یکی از معمول‌ترین شیوه‌ها جهت حذف اثر اختلال ناشی از اندرکنش محیطی در کنترل حرکت بوده است و محققین بسیاری به این موضوع پرداخته‌اند [۱۵-۱]. آهن^۲ و یانگ^۳ از کنترل H_{∞} [۱۲]، و چن^۴ از کنترل مدل داخلی [۲] در طراحی این مشاهده‌گرها استفاده نمودند. چن^۵ و همکارانش مشاهده‌گر اختلال را به عنوان جایگزینی برای سنسور نیرو جهت فیدبک نیرو و کنترل مکان/نیرو مورد استفاده قرار دادند [۶].

گرچه مشاهده‌گرهای اختلال، خواص مناسبی از لحاظ تنظیم مدل و دفع اثر اختلال دارند اما به سبب استفاده از فیدبک با مشکلاتی در خصوص پایداری و پایداری مقاوم مواجه می‌باشند. علاوه بر این، در اکثر موارد، تحلیل یا طراحی بر اساس مدل‌های خطی شده یا استفاده از روش‌های سیستم خطی صورت گرفته است که قابلیت اعتماد مناسب برای کنترل یک بازوی ربات چند عضوی، که در عمل یک سیستم کوپل شده غیرخطی می‌باشد را نخواهد داشت. از سوی دیگر، در مشاهده‌گرهای اختلال که تاکنون معرفی گردیده‌اند بسیاری از خواص مهم مانند تخمین بدون بایاس یا حتی پایداری سراسری تضمین نشده است [۶]. اگرچه کارهایی در زمینه مشاهده‌گرهای غیرخطی اختلال صورت گرفته و خواصی مانند پایداری سراسری برای آن‌ها اثبات شده است، لیکن این مشاهده‌گرهای غیرخطی، فقط برای حالات خاصی بسط داده شده‌اند به عنوان مثال، چن و همکارانش [۶] برای بازوهای دو عضوی، و فریدل^۶ و پارک^۷ برای اصطکاک کولمب [۹] مشاهده‌گرهایی را طراحی کرده‌اند که دارای خاصیت پایداری سراسری است.

1. disturbance observer
3. Yang

2. Ahn
4. Chan

5. Chen
7. Park

6. Friedl

یک راه حل دیگر، جهت حذف اثر اختلال نیروی خارجی، که در این رساله نیز مد نظر است استفاده از کنترل وفقی است به گونه‌ای که مشکلات فوق الذکر را نداشته باشد. طرح‌های کنترل وفقی ربات را می‌توان به‌طور عمده به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول، طرح‌های کنترلی دینامیک معکوس^۱ یا گشتاور محاسبه شده^۲ که تلاش می‌کنند که معادله حرکت ربات را به‌طور سراسری خطی و غیرممزوج (دکوپله) نمایند. دسته دوم اصولاً مبتنی بر پس‌پس بودن^۳ دینامیک ربات صلب هستند و برای خطی کردن معادله حرکت تلاشی نمی‌کنند.

کریگ^۴ و همکارانش [۱۶] یک طرح دینامیک معکوس ارائه کردند که در هنگامی که تمام پارامترهای ربات مشخص باشند به یک سیستم حلقه‌بسته خطی غیرممزوج (دکوپله) می‌انجامد که به معنای این است که عملکرد حلقه‌بسته به سادگی به‌طور کمی قابل ارزیابی می‌شود. برای رسیدن به چنین نتایجی، اندازه‌گیری شتاب‌های مفاصل و نیز اصلاح قانون تطبیق پارامتر که معکوس‌پذیری ماتریس اینرسی تخمین زده شده را تضمین کند لازم می‌باشد. میدلتون^۵ و گودوین^۶ با معرفی یک فیلتر درجه یک در [۱۷] نیاز به اندازه‌گیری شتاب‌های مفاصل را برطرف کردند. اسپانگ^۷ و ارتگا^۸ در [۱۸] شق دیگری از کنترل دینامیک معکوس وفقی را برای ربات‌های صلب ارائه نمودند و ادعا کردند که روش آن‌ها نیازی به معکوس‌پذیر بودن ماتریس اینرسی تخمین زده شده ندارد. پس از آن، داوسون^۹ و لوئیس^{۱۰} [۱۹] این ادعا را اصلاح کردند و نشان دادند که برای کراندار بودن شتاب باید فرمی از معکوس ماتریس اینرسی تخمین زده شده کراندار باشد. اسپانگ و ارتگا در جوابیه‌ای در پاسخ به اشکال مذکور ضمن پذیرش این اشکال، یک قانون تطبیق پارامتر اصلاح شده معرفی نمودند که معکوس‌پذیری ماتریس اینرسی تخمین زده شده یا فرم دیگری از آن را لازم نداشت، لیکن همچنان به اندازه‌گیری شتاب‌های مفاصل نیاز داشت. آن‌ها در [۱۸] اشاره کردند که به‌کارگیری فیلتر [۱۷] در کنترل دینامیک معکوس‌شان برای حذف اندازه‌گیری شتاب‌های مفاصل کار ساده‌ای به نظر نمی‌رسد، و تا آنجایی که ما اطلاع داریم هنوز کسی مشکل روش آن‌ها را برطرف نکرده است. با توجه به این مطالب، می‌توان ادعا نمود که

1. inverse dynamics
3. passivity-based
5. Middleton
7. Spong
9. Dawson

2. computed torque
4. Craig
6. Goodwin
8. Ortega
10. Lewis