

کنترل کننده مقاوم مود لغزشی تطبیقی امیدانسی زمان محدود بدون وزوز سیستم کنترل از راه دور در حضور تأخیر تصادفی

ابوالفضل کمالی اردکانی و هادی صفدرخانی

تأخیر ثابت در کانال ارتباطی استفاده شده است. مرجع [۳] به صورت تئوری به مسئله تأخیر نگاه کرده و با تبدیل مسئله کنترل از راه دور به مسئله خط انتقال، راه حلی برای مشکل تأخیر ارائه نموده و متغیر پراشیدگی را که در نظریه خط انتقال استفاده می‌شد، پیشنهاد داده است. در [۴] از کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع در سمت ربات فرمانده و در سمت ربات فرمان‌بر از کنترل کننده تطبیقی مستقل از ربات فرمانده استفاده شده است. هدف اصلی در این مقاله، ردیابی موقعیت-سرعت دو ربات می‌باشد و تأخیر در نظر گرفته شده در این مقاله از نوع تأخیر ثابت است. مرجع [۵] سیستم‌های کنترل از راه دور با ساختار نمونه‌بردار غیر یکنواخت را مورد بررسی و تحلیل پایداری قرار داده است. به این صورت که سیگنال‌های خروجی ربات‌های فرمانده و فرمان‌بر قبل از ورود به کنترل کننده به صورت غیر یکنواخت نمونه‌برداری می‌شوند. در این مرجع نیز تأخیر مورد بررسی از نوع تأخیر ثابت می‌باشد. در سیستم‌های کنترل از راه دور علاوه بر پایداری، شفافیت نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور به دست آوردن عملکرد منطقی و مناسب در بسیاری از سیستم‌های عملیات از راه دور، اپراتور به بازخورد اطلاعاتی از محیط و فضای کاری دوردست نیاز خواهد داشت. در بسیاری از کاربردها، سیستم‌های کنترل از راه دور، سیستم‌های یک‌طرفه هستند و به عبارتی در حین انجام عملیات، هیچ گونه بازخورد نیرویی از ربات فرمان‌بر و از طریق کانال ارتباطی به ربات فرمانده و در نتیجه اپراتور فرستاده نمی‌شود. اگر ربات فرمان‌بر دارای حسگرهای نیرو باشد، امکان آن وجود دارد که نیروهای عکس‌العملی ناشی از تقابل ربات فرمان‌بر و محیط، اندازه‌گیری شده و به شکل مناسب به سمت ربات فرمانده و اپراتور برگردانده شوند. بدین ترتیب، عملیات از راه دور دوطرفه خواهد بود. در حقیقت، این بازخورد نیرو که به اپراتور می‌رسد، اطلاعاتی از برخورد یا تماس ایجادشده در حین انجام عملیات در فضای کاری می‌باشد. ارائه‌شدن چنین اطلاعاتی به اپراتور، حسی مشابه لمس کردن واقعی محیط کاری دوردست را به اپراتور می‌دهد. اگر سیستم کنترل از راه دور به گونه‌ای عمل کند که به اپراتور، همان احساسی دست دهد که هنگام حضور و کار در محیط هدف می‌داشت، سیستم را شفاف گویند [۶]. شفافیت در سیستم‌های کنترل از راه دور یک چالش اساسی محسوب می‌شود. به طور معمول در چنین سیستم‌هایی، ربات فرمان‌بر در محیط باید موقعیت ربات فرمانده را با وجود نیروی عملی کاربر، دنبال کند و بازخورد نیرو را از محیط به ربات فرمانده و اپراتور منتقل نماید [۷] و [۸].

علاوه بر تأخیر، عوامل دیگری مانند وجود اغتشاشات و نامعینی‌ها در سیستم موجب از بین رفتن شفافیت می‌گردد. در [۹] از کنترل پیش‌بین برای مقابله با تأخیر متغیر با زمان استفاده شده است. در این روش در صورت وجود عواملی چون اغتشاشات و نامعینی در سیستم از عملکرد

چکیده: یکی از زمینه‌های بسیار کاربردی و مرتبط در علم رباتیک، موضوع کنترل از راه دور ربات‌ها می‌باشد. اغلب ساختارهای کنترلی سیستم‌های کارکرد از راه دور، به دنبال دستیابی هم‌زمان به شفافیت و پایداری می‌باشند که با وجود در نظر گرفتن نامعینی و اغتشاشات در سیستم و تأخیر تصادفی در کانال ارتباطی، دستیابی هم‌زمان به این دو هدف بسیار چالش‌برانگیز است. تا کنون بسیاری از محققان اطلاعات موقعیت، سرعت، نیرو یا امیدانس را برای ارائه روش‌های متنوع کنترلی به کار گرفته‌اند، اما در هیچ یک از این روش‌ها دستیابی به شفافیت کامل و پایداری مقاوم در حضور تأخیر تصادفی و نامعینی‌ها و اغتشاشات فراهم نشده و باید بین این دو هدف، مصالحه‌ای صورت گیرد. در این مقاله با استفاده از روشی نوین، یک ساختار کنترلی شامل مود لغزشی، کنترل تطبیقی و کنترل امیدانس ارائه شده است. این روش توسط نرم‌افزار Matlab و در محیط Simulink شبیه‌سازی گردیده و نشان داده شده که این روش، قادر است شفافیت ایده‌آل را برقرار کند و در حضور تأخیر تصادفی و وجود اغتشاشات و نامعینی‌ها پایداری مقاوم را نیز تضمین کند.

کلیدواژه: تأخیر تصادفی، سیستم کنترل از راه دور، کنترل امیدانس تطبیقی، کنترل مود لغزشی.

۱- مقدمه

به طور کلی می‌توان گفت که یک سیستم کنترل از راه دور از پنج بخش تشکیل شده است. بخش اول و دوم آن، ربات فرمانده و فرمان‌بر می‌باشند. بخش سوم کاربر بوده که فرمان مورد نظر خود را از طریق اعمال نیرو به ربات فرمانده وارد می‌کند و در حالت کلی ربات فرمان‌بر باید از ربات فرمانده پیروی کند. ربات فرمان‌بر ممکن است در شرایط فضای آزاد یا در تماس با یک محیط که بخش چهارم سیستم را تشکیل می‌دهد، عمل کند. ارتباط دو ربات فرمانده و فرمان‌بر را یک کانال ارتباطی برقرار می‌کند که عموماً از طریق اینترنت برقرار می‌شود، لذا در کانال ارتباطی دو ربات، با تأخیر تصادفی مواجه هستیم که غالباً موجب ناپایداری سیستم می‌گردد. برای پایداری سیستم در حضور تأخیر، روش‌های گوناگونی مانند نظریه پراشیدگی و متغیر موج استفاده شده است. این روش‌ها پایداری سیستم را در حضور تأخیر ثابت تضمین می‌نمایند. در [۱] و [۲] از متغیر موج برای کنترل سیستم‌های کنترل از راه دور خطی با

این مقاله در تاریخ ۲۲ خرداد ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۸ اسفند ۱۴۰۰ بازنگری شد.

ابوالفضل کمالی اردکانی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران،
(email: abolfazlkamali@stu.yazd.ac.ir)

هادی صفدرخانی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران،
(email: Safdarkhani@yazd.ac.ir)

برای کنترل سیستم‌های کنترل از راه دور، قادر به تضمین پایداری و در عین حال ردیابی هم‌زمان موقعیت و نیرو، آن هم در صورت وجود تأخیر تصادفی، اغتشاشات و نامعینی نمی‌باشد.

در این مقاله با ادغام روش‌های کنترلی مود لغزشی، تطبیقی و امیدانس به ارائه ساختاری نوین پرداخته شده است. ساختار کنترلی ارائه شده متشکل از کنترل مود لغزشی تطبیقی امیدانسی برای کنترل هم‌زمان موقعیت دو ربات در سمت فرمانده و کنترل نیروی محیط و کاربر در سمت ربات فرمان‌بر می‌باشد. ساختار پیشنهادی به دلیل استفاده مناسب از کنترل مود لغزشی در برابر تأخیر تصادفی و اغتشاشات و نامعینی‌های سیستم و پدیده وزوز مقاوم بوده و با استفاده از کنترل تطبیقی کران بالای مشتق اغتشاشات و نامعینی‌های سیستم تخمین زده می‌شوند.

این مقاله در پنج بخش تنظیم گردیده است. پس از مقدمه، در بخش دوم مدل در نظر گرفته شده برای دو ربات تشریح می‌گردد. بخش سوم شامل طراحی کنترل‌کننده‌های ربات‌های فرمانده و فرمان‌بر می‌باشد. در بخش چهارم، ساختار پیشنهادی در محیط Simulink نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی گردیده و عملکرد حاصل از آن نشان داده شده و در بخش آخر نیز به بیان و تحلیل نتایج به دست آمده پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی سیستم‌های کنترل از راه دور

سیستم کنترل از راه دور را می‌توان به صورت مجموعه ربات‌های فرمانده و فرمان‌بر در نظر گرفت که اطلاعاتی شامل موقعیت، سرعت و نیرو را بین خود تبادل می‌کنند. در واقع ربات فرمان‌بر می‌کوشد که رفتار ربات فرمانده را دنبال کند و احساس خود را از محیط به ربات فرمانده منتقل کند.

شکل ۱ دینامیک خطی ربات‌های فرمانده و فرمان‌بر را نشان می‌دهد. ورودی‌های کنترلی، نیروی اعمالی توسط ربات فرمان‌بر به محیط و نیروی اعمالی توسط کاربر به ربات فرمانده می‌باشد. در نتیجه معادلات دینامیکی ربات‌ها به صورت زیر است

$$M_m \ddot{x}_m + B_m \dot{x}_m = u_m + f_h + d_m \quad (1)$$

$$M_s \ddot{x}_s + B_s \dot{x}_s = u_s - f_e + d_s \quad (2)$$

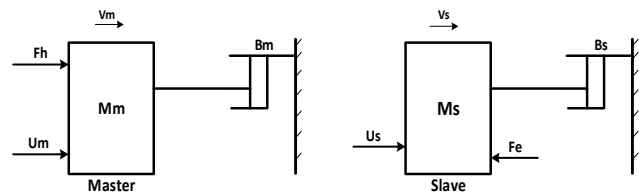
که در آن M جرم، B ضریب میرایی، x موقعیت و d مجموع اغتشاشات و نامعینی‌ها است. زیرنویس‌های m و s نیز به ترتیب به ربات‌های فرمانده و فرمان‌بر اشاره دارند.

۳- طراحی کنترل‌کننده

ساختار کنترلی پیشنهادی در این مقاله متشکل از دو کنترل‌کننده مود لغزشی تطبیقی امیدانسی برای کنترل موقعیت دو ربات و کنترل نیروهای محیط و کاربر برای ربات فرمان‌بر و فرمانده می‌باشد. از آنجا که در این ساختار، هم‌زمان از کنترل‌کننده مود لغزشی تطبیقی امیدانسی برای هر دو ربات استفاده شده است، در عین تضمین پایداری زمان محدود مقاوم در برابر تأخیر تصادفی، در برابر انواع اغتشاشات و نامعینی‌های سیستم نیز مقاوم بوده و از عملکرد مطلوبی نیز برخوردار است و لذا موجب می‌شود که علاوه بر تضمین پایداری، شفافیت نیز به خوبی صورت گرفته باشد و کاربر احساس درستی از محیط دور دست پیدا کند. شفافیت در سیستم‌های کنترل از راه دور با وجود تأخیر به صورت زیر تعریف می‌شود

$$f_h = f_e(t - \tau) \quad (3)$$

$$x_s = x_m(t - \tau) \quad (4)$$



شکل ۱: نمایش دینامیک ربات‌های فرمانده و فرمان‌بر.

مطلوبی برخوردار نمی‌باشد. در [۱۰] از کنترل‌کننده مود لغزشی در سمت ربات فرمان‌بر و از کنترل‌کننده امیدانسی در سمت ربات فرمانده استفاده گردیده که در این طراحی از خطا و مشتق خطا در تعریف سطح لغزش استفاده شده است. در این مقاله، تابع sat به جای تابع sign برای مقابله با پدیده وزوز در نظر گرفته شده و نامعینی و اغتشاش در معادلات آن در نظر گرفته نشده و دارای شفافیت ایده‌آل نمی‌باشد. بدیهی است که با اضافه شدن نامعینی و اغتشاشات به سیستم، میزان خطا افزایش یافته و از شفافیت سیستم نیز کاسته خواهد شد.

کنترل مود لغزشی به دلیل طراحی ساده و آسان، مقاوم بودن در برابر اغتشاشات و نامعینی‌ها و پاسخ سریع، در تحقیقات گذشته توجه بسیاری از محققان را برای کنترل سیستم‌های تله‌پراتوری و دیگر سیستم‌ها به خود جلب کرده است [۱۱]. در [۱۲] از کنترل‌کننده امیدانسی در سمت ربات فرمانده و از کنترل‌کننده امیدانسی مود لغزشی در سمت ربات فرمان‌بر استفاده شده است. استفاده از کنترل‌کننده امیدانسی مود لغزشی موجب مقاوم بودن ربات فرمان‌بر در برابر نامعینی‌ها شده است. در این مقاله تأخیر در نظر گرفته شده از نوع تأخیر ثابت بوده و هدف اصلی مقاله، ردیابی موقعیت ۲ ربات می‌باشد. در [۱۳] مانند [۱۲] از کنترل‌کننده‌های امیدانسی و امیدانسی مود لغزشی به ترتیب در سمت ربات فرمانده و فرمان‌بر استفاده شده است، با این تفاوت که برای ربات فرمان‌بر اغتشاش نیز اضافه گردیده است. در این مقاله ابتدا تأخیر در نظر گرفته نشده و فقط اغتشاش را به ربات فرمان‌بر افزوده است. در حالت بعدی، تأخیر ثابت نیز به سیستم اضافه شده که اثرات مخرب آن را در ردیابی نیرو و موقعیت دو ربات نشان می‌دهد و به دلیل استفاده از تابع sign پدیده وزوز نیز اتفاق افتاده است.

هانگ و همکاران در [۸] با استفاده از روش کنترل تطبیقی مود لغزشی، ردیابی موقعیت و پایداری سیستم کنترل از راه دور غیر خطی را مورد بررسی قرار داده‌اند. با این حال، اثر مخرب پدیده وزوز مشاهده می‌شود. در [۱۴] و [۱۵] برای مقابله با پدیده وزوز از روش مود لغزشی مرتبه بالا استفاده شده است. کنترل مود لغزشی تنها پایداری مجانبی را تضمین می‌کند. وانگ و همکاران در [۱۶] از کنترل مود لغزشی زمان محدود استفاده نموده‌اند که استفاده از این روش، علاوه بر بهبود پایداری و عملکرد سیستم، باعث تسریع در زمان همگرایی حول نقطه تعادل نیز می‌شود [۱۷]. در [۱۸] از کنترل مود لغزشی زمان ثابت برای کنترل سیستم‌های کنترل از راه دور در حضور تأخیر استفاده گردیده است. حسین‌آبادی و همکاران در [۱۹] نیز یک کلاس پیشرفته از کنترل مود لغزشی زمان ثابت با عنوان کنترل مود لغزشی زمان از پیش تعیین شده را مطرح می‌کنند.

وفایی و همکاران در [۲۰] از کنترل‌کننده امیدانسی مود لغزشی در سمت ربات فرمانده و از کنترل‌کننده مود لغزشی زمان محدود در سمت ربات فرمان‌بر استفاده نموده‌اند. در این کار تأخیر از نوع ثابت بوده و اغتشاش و نامعینی برای سیستم در نظر گرفته نشده و هدف اصلی آن فقط ردیابی موقعیت دو ربات می‌باشد. هیچ کدام از روش‌های موجود

$$u_m = \frac{M_m}{M_h} (-F_{tot} - \int A_1(e_1) + u_{m1}) \quad (15)$$

که در آن $F_{tot} = -\frac{M_h}{M_m} B_m \dot{x}_m + \frac{M_h}{M_m} f_h + B_h \dot{x}_m + k_h x_m - f_h^*$ است. سطح لغزش و مشتق آن نیز به صورت زیر به دست می‌آید

$$s_1 = u_{m1} + M_h \dot{d}_m \quad (16)$$

$$\dot{s}_1 = \dot{u}_{m1} + M_h \ddot{d}_m \quad (17)$$

در ادامه با در نظر گرفتن یک فرض و با استفاده از روش کنترل تطبیقی به تخمین کران بالای مشتق اغتشاشات و نامعینی‌ها پرداخته می‌شود و پایداری زمان محدود سیستم با استفاده از نظریه لیاپانوف اثبات می‌گردد.

۳-۲ اثبات پایداری

فرض در نظر گرفته شده به صورت زیر است

$$\tilde{h}_m = \hat{h}_m - u_m \rightarrow \dot{\tilde{h}}_m = \dot{\hat{h}}_m \quad (18)$$

$$|\dot{\tilde{d}}_m| \leq h_m \leq \hat{h}_m \quad (19)$$

که h_m کران بالای مشتق اغتشاشات و نامعینی‌ها می‌باشد که نامعلوم است و \hat{h}_m کران بالای h_m است که در روند اثبات تخمین زده می‌شود. کاندیدای تابع لیاپانوف به صورت زیر در نظر گرفته شده است. طبق نظریه لیاپانوف، مشتق تابع لیاپانوف باید منفی نیمه معین ($\dot{v}(x) \leq 0$) باشد

$$v = \frac{k}{\gamma} s_1^2 + \frac{k}{\gamma} \tilde{h}_m^2 \quad (20)$$

با مشتق گرفتن از تابع لیاپانوف داریم

$$\dot{v} = ks_1 \dot{u}_{m1} + ks_1 M_h \dot{d}_m + k\tilde{h}_m \dot{\hat{h}}_m \quad (21)$$

در کنترل مود لغزشی برای تضمین همگرایی زمان محدود، شرط زیر باید برقرار باشد

$$\dot{v} = s\dot{s} \leq -\eta|s| \quad (22)$$

که در آن η یک ثابت مثبت اختیار می‌شود. \dot{u}_{m1} و قانون تطبیق باید طوری طراحی شود تا علاوه بر شرط زمان محدود بودن، شرط منفی نیمه معین بودن مشتق تابع لیاپانوف نیز برقرار باشد

$$\dot{u}_{m1} = -r_1 \text{sign}^\alpha(s_1) - M_h \dot{\hat{h}}_m \text{sign}(s_1) \quad (23)$$

$$M_h |s_1| > \dot{\hat{h}}_m \rightarrow \dot{\hat{h}}_m = c_m M_h |s_1| \quad (24)$$

که در آن $r_1 > 0$ ، $0 < \alpha < 1$ و $c_m < 1/k$ می‌باشد. در نتیجه داریم

$$\begin{aligned} \dot{v} &\leq -\Delta_1 |s_1| - \Delta_2 \tilde{h}_m \leq -\Delta_{\min} (|s_1| + \tilde{h}_m) \\ &\leq -\Delta_{\min} (|s_1|^2 + \tilde{h}_m^2)^{\frac{1}{2}} \leq -\Delta_{\min} (2v)^{\frac{1}{2}} \leq -\Delta_{\min} \sqrt{2v}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (25)$$

که در آن $\Delta_1 = M_h |s_1| (1 + kc_m) = \Delta_2$ و $(k-1)M_h \tilde{h}_m = \Delta_1$ است.

۳-۳ طراحی کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی امیدانسی

ربات فرمان بر

با اعمال تغییر متغیر از (۲)، رابطه زیر را داریم

$$\dot{x}_s = x_5 \quad (26)$$

$$\dot{x}_r = \frac{1}{M_s} (-B_s \dot{x}_s + u_s + f_e) + d_s \quad (27)$$

که در آن τ زمان تأخیر انتقال داده می‌باشد. در بخش‌های بعدی چگونگی عملکرد و طراحی هر یک از این کنترل کننده‌ها به اختصار توضیح داده شده است.

۳-۱ طراحی کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی امیدانسی ربات فرمانده

کنترل کننده مود لغزشی روی یک سیستم کنترل از راه دور با یک درجه آزادی، ابتدا در [۲۱] به کار گرفته شد. در [۲۲] برای کنترل هر دو ربات فرمانده و فرمان بر از این نوع کنترل کننده استفاده شده است. از آنجا که این روش در برابر انواع اغتشاشات و نامعینی‌ها مقاوم می‌باشد، برای مقابله با مشکلات ناشی از تأخیر تصادفی نیز قابل استفاده است.

در این بخش با استفاده از کنترل کننده مود لغزشی امیدانسی زمان محدود، با پدیده وزوز و مشکلات ناشی از تأخیر تصادفی مقابله شده و با استفاده از روش کنترل تطبیقی، کران بالای مشتق اغتشاشات و نامعینی‌ها نیز تخمین زده شده است.

با فرض خطی بودن مدل رفتاری کاربر و محیط کاری، می‌توان کاربر و محیط کاری را به صورت مدل تونن (نظریه مدار) در نظر گرفت که در آن امیدانسی‌های Z_e و Z_h به ترتیب رفتار دینامیکی کاربر و محیط کاری هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$Z_h = M_h s + B_h + \frac{K_h}{s} \quad (5)$$

$$Z_e = M_e s + B_e + \frac{K_e}{s} \quad (6)$$

$$f_h = M_h \ddot{x}_m + B_h \dot{x}_m + K_h x_m + f_{ed} - f_h^* \quad (7)$$

$$f_e = M_e \ddot{x}_s + B_e \dot{x}_s + K_e x_s \quad (8)$$

که در آن M_h و B_h ، K_h به ترتیب سختی، میرایی و جرم دست کاربر و f_h^* نیروی وارد شده خارجی توسط کاربر می‌باشند. f_{ed} نیز به صورت زیر تعریف می‌شود

$$f_{ed} = f_e(t - \tau) \quad (9)$$

$$t - \tau = \varphi(t) \quad (10)$$

$$f_{ed} = f_e(\varphi(t)) \quad (11)$$

و τ زمان تأخیر انتقال داده است. برای طراحی کنترل کننده، خطای ردیابی سیستم به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود

$$e_1 = f_h - f_e(\varphi(t)) \quad (12)$$

گام اصلی در کنترل مود لغزشی تعریف یک سطح لغزش می‌باشد. در این مقاله، سطح لغزش با هدف ردیابی نیرو به صورت زیر تعریف شده است

$$s_1 = e_1 + \int A_1(e_1) \quad (13)$$

که $A_j(e) = B_j e^{p_j}$ ، $B_j > 0$ و $0 < p_j < q_j$ می‌باشد. با اعمال تغییر متغیر $\dot{x}_m = x_1$ و جاگذاری آن در (۱)، رابطه زیر به دست می‌آید

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{M_m} (-B_m \dot{x}_m + u_m + f_h) + d_m \quad (14)$$

با قراردادن (۱۴) در (۷) و سپس در (۱۲)، ورودی کنترلی ربات فرمانده به صورت زیر به دست می‌آید

در نتیجه داریم

$$\begin{aligned} \dot{v} &\leq -\Delta_r |s_r| - \Delta_r \tilde{h}_s \leq -\Delta_{\min} (|s_r| + \tilde{h}_s) \\ &\leq -\Delta_{\min} (|s_r| + \tilde{h}_s)^{\frac{1}{\gamma}} \leq -\Delta_{\min} (r\gamma)^{\frac{1}{\gamma}} \leq -\Delta_{\min} \sqrt{\gamma} v^{\frac{1}{\gamma}} \end{aligned} \quad (40)$$

که در آن $|s_r|(1+kc_s) = \Delta_r$ و $(k-1)\tilde{h}_s = \Delta_r$ ، $c_s < 1/k$ می‌باشد.

۴- شبیه‌سازی

در این قسمت، سیستم کنترل از راه دور با ساختار ارائه شده در محیط Simulink شبیه‌سازی گردیده و نتایج حاصل از آن از لحاظ میزان شفافیت و وجود اغتشاشات و نامعینی‌ها در سیستم با [۲۳] مقایسه شده است (شکل ۲). پارامترهای در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی از [۲۳] انتخاب گردیده‌اند که به شرح زیر می‌باشند

$$\begin{aligned} M_s &= 5 \text{ [kg/m}^2\text{]} & B_s &= 1.5 \text{ [kg/m]} \\ M_m &= 0.1 \text{ [kg/m}^2\text{]} & B_m &= 0.1 \text{ [kg/m]} \\ M_e &= 1 \text{ [kg]} & B_e &= 10 \text{ [ns/m]} \\ K_e &= 500 \text{ [n/m]} & M_h &= 0.1 \text{ [kg]} \\ B_h &= 1 \text{ [ns/m]} & K_h &= 10 \text{ [n/m]} \\ f_h^* &= 0.1 \times \sin(3t) \end{aligned}$$

ضرایب کنترلی انتخاب شده در این شبیه‌سازی نیز به شرح زیر هستند

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.7 & \beta &= 0.4 \\ c_m &= 0.2 & c_s &= 0.2 \\ r_1 &= 9 & r_2 &= 0.7 \\ B_{jm} &= 13 & B_{js} &= 11 \\ p_{jm} &= 10.1 & p_{js} &= 10.1 \\ q_{jm} &= 10.3 & q_{js} &= 10.3 \\ d_m &= 0.1 \sin t & d_s &= 0.1 \cos t \end{aligned}$$

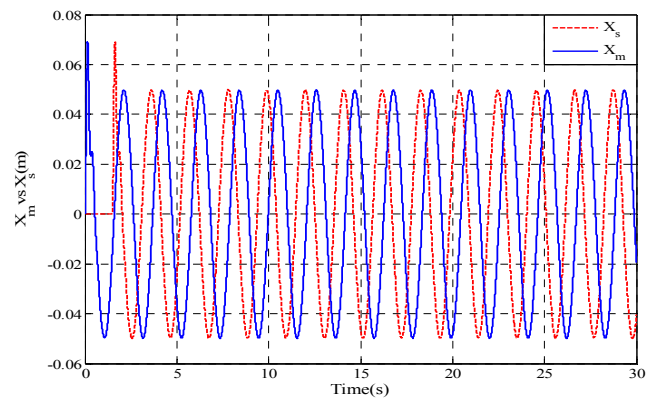
۴-۱ مقایسه میزان شفافیت

در [۲۳] ادعا شده که برای اولین بار از کنترل کننده امپدانس تطبیقی و کنترل کننده مود لغزشی برای ردیابی هم‌زمان نیرو و موقعیت دو ربات که همان تعریف شفافیت می‌باشد، استفاده گردیده است. در صورتی که طبق تعریف، زمانی شفافیت در سیستم تحقق می‌یابد که (۳) و (۴) برقرار باشد. در [۲۳] برای تحقق شفافیت از (۴۱) و (۴۲) استفاده شده که بیشتر به ردیابی ایده‌آل منجر می‌گردد. در این مقاله برای بهبود این امر و جهت تحقق شفافیت مطلوب، همان گونه که در طراحی کنترل کننده اشاره گردید، از (۳) و (۴) استفاده شده است

$$x_s = x_m(t-\tau) \quad (41)$$

$$f_e = f_h(t-\tau) \quad (42)$$

همان طور که در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود، ردیابی موقعیت دو ربات فرمانده و فرمان‌بر و نیروهای محیط و دست کاربر در کنترل کننده‌های پیشنهادی به خوبی صورت گرفته است. در نتیجه شفافیت مطلوب با وجود عواملی چون انواع نامعینی‌ها و اغتشاشات و تأخیر تصادفی در سیستم، به خوبی صورت گرفته و سیستم نیز عاری از پدیده وزوز می‌باشد. تأخیر در نظر گرفته شده در این مقاله از نوع تأخیر تصادفی بوده که بر همین اساس از تابع تصادفی با میانگین ۱/۵ و واریانس ۰/۰۱ در شبیه‌سازی استفاده شده که دامنه تغییرات آن در شکل ۵ دیده می‌شود.



شکل ۲: ردیابی موقعیت دو ربات [۲۳].

خطای ردیابی سیستم به صورت اختلاف بین موقعیت تأخیریافته ربات فرمانده و موقعیت ربات فرمان‌بر و اختلاف بین مشتق موقعیت تأخیریافته ربات فرمانده و مشتق موقعیت ربات فرمان‌بر تعریف می‌شود

$$e_r = x_s - x_m(\varphi(t)) \quad (28)$$

$$e_v = \dot{x}_s - \dot{\varphi}(t)\dot{x}_m(\varphi(t)) \quad (29)$$

که در آن $\varphi(t) = t - \tau$ و τ زمان تأخیر انتقال داده است. سطوح لغزش با هدف ردیابی موقعیت به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$s_r = \dot{e}_r + A(e_r) \quad (30)$$

$$s_v = \dot{e}_v + A(s_r) \quad (31)$$

با ترکیب (۲۷)، (۳۰) و (۳۱) ورودی کنترلی ربات فرمان‌بر به صورت زیر به دست می‌آید

$$u_s = M_s(-f_{final} - \dot{A}(e_r) - A(s_r) + u_{s1}) \quad (32)$$

که در آن f_{final} از رابطه زیر حاصل می‌شود

$$\begin{aligned} f_{final} &= -\frac{1}{M_s} B_s \dot{x}_s - \frac{1}{M_s} f_e \\ &\quad - \ddot{\varphi}(t)\dot{x}_m(\varphi(t)) - (\dot{\varphi}(t))^2 \ddot{x}_m(\varphi(t)) \end{aligned}$$

سطح لغزش و مشتق آن نیز به صورت زیر به دست می‌آید

$$s_r = u_{s1} + d_s \quad (33)$$

$$\dot{s}_r = \dot{u}_{s1} + \dot{d}_s \quad (34)$$

فرض تعریف شده

$$\tilde{h}_s = \hat{h}_s - h_s \rightarrow \dot{\tilde{h}}_m = \dot{\hat{h}}_m \quad (35)$$

$$|\dot{d}_s| \leq h_s \leq \hat{h}_s \quad (36)$$

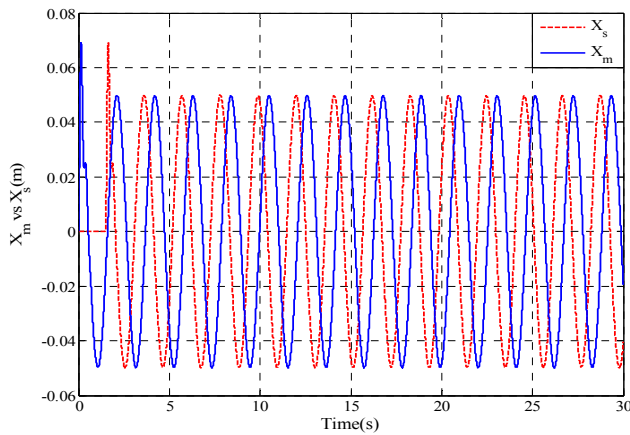
کاندیدای تابع لیاپانوف

$$v = \frac{k}{\gamma} s_r^2 + \frac{k}{\gamma} \tilde{h}_s^2 \quad (37)$$

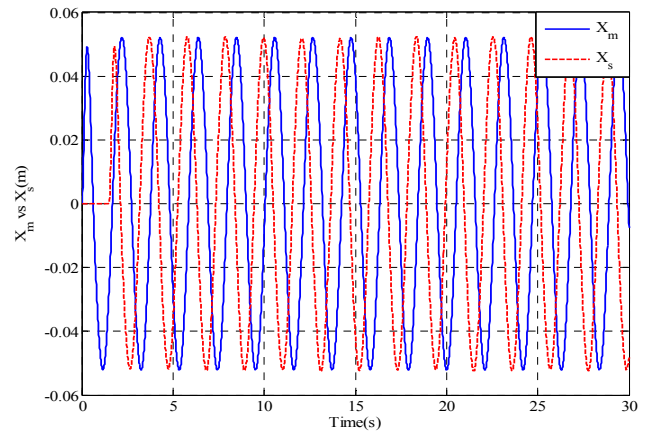
\dot{u}_{s1} و قانون تطبیق طوری طراحی می‌شود تا علاوه بر شرط زمان محدودبودن، شرط منفی نیمه معین بودن مشتق تابع لیاپانوف نیز برقرار باشد

$$\dot{u}_{s1} = -r_s \text{sign}^\beta(s_r) - \hat{h}_s \text{sign}(s_r) \quad (38)$$

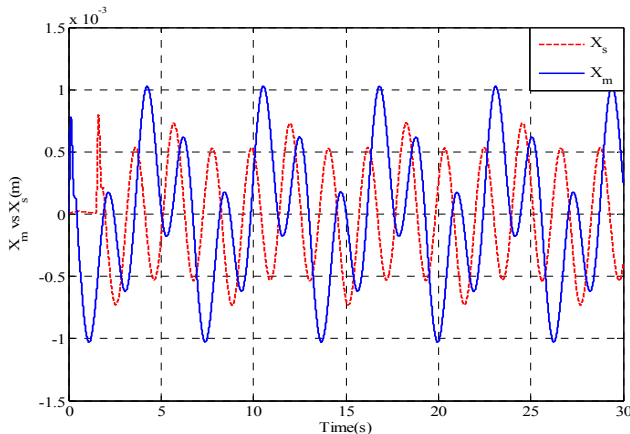
$$|s_r| > \hat{h}_m \rightarrow \dot{\hat{h}}_m = c_s |s_r| \quad (39)$$



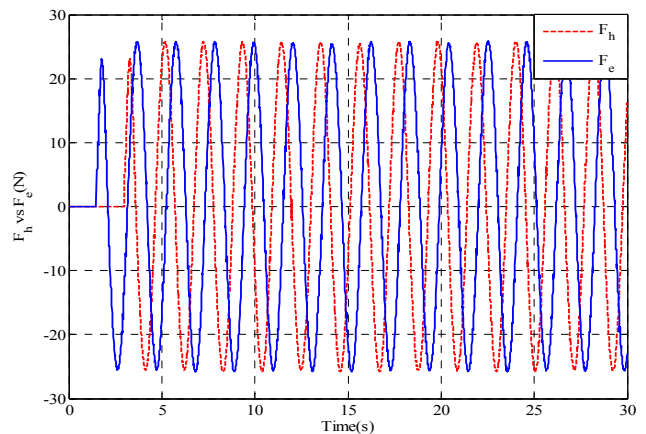
شکل ۶: ردیابی موقعیت دو ربات بدون اغتشاش و نامعینی در [۲۳].



شکل ۳: ردیابی موقعیت دو ربات با کنترل کننده پیشنهادی.



شکل ۷: ردیابی موقعیت دو ربات با وجود اغتشاش و نامعینی در [۲۳].



شکل ۴: ردیابی نیروهای محیط و دست کاربر با کنترل کننده پیشنهادی.

جدول ۱: IAE

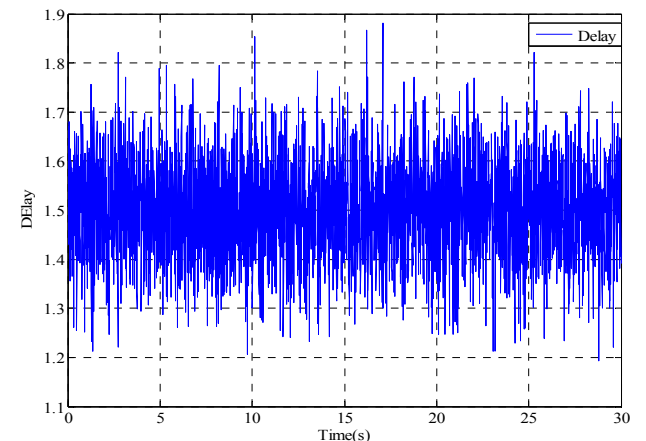
IAE_r	IAE_c	کنترل کننده
۰٫۱۹۰۸	۰٫۰۰۱۱	پیشنهادی
۷۹٫۶۵۹۷	$۶٫۴۰۴۹ \times 10^{-3} \approx 0$	مرجع [۲۳] بدون اغتشاش
۸۱٫۴۸۸۹	۰٫۰۹۸۹	مرجع [۲۳] با اغتشاش

همان طور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، ردیابی موقعیت دو ربات فرمانده و فرمان‌بر و نیروهای محیط و دست کاربر با وجود نامعینی‌ها و اغتشاشات در سیستم به خوبی صورت گرفته که نشان از تحقق مطلوب شفافیت و مقاوم‌بودن روش پیشنهادی در سیستم می‌باشد. برای درک بهتر این موضوع از معیار عملکردی IAE استفاده گردیده که نتایج حاصل از آن در جدول ۱ آمده است. از معیار عملکردی IAE برای محاسبه مقدار خطا استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$IAE = \int |e| dt \quad (۴۳)$$

۵- نتیجه‌گیری

همان طور که پیشتر نیز بیان شد، ساختارهای کنترلی ارائه‌شده در مورد سیستم‌های کنترل از راه دور هر یک با چالش‌های متفاوتی چون تأخیر ثابت، تأخیر متغیر با زمان، وجود نامعینی‌ها، وجود اغتشاشات، وجود پدیده وزوز و پایداری سیستم روبه‌رو بودند و هدف اصلی در این سیستم‌ها، رسیدن به شفافیت ایده‌آل بود که به بیان برخی از آنها پرداخته شد. ساختارهای کنترلی ارائه‌شده در این مقالات هر یک، وجود یک یا چند چالش را مورد بررسی قرار داده بودند و اثرات مخرب آنها نیز در رسیدن به



شکل ۵: تأخیر تصادفی.

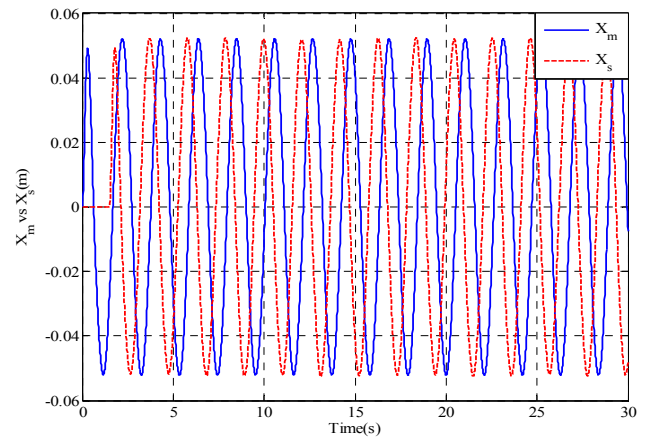
۴-۲ مقایسه مقاوم‌بودن در برابر اغتشاشات و نامعینی‌ها

در این بخش، ابتدا نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده‌های [۲۳]، بدون وجود نامعینی و اغتشاش در سیستم در شکل ۶ آورده شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی با وجود نامعینی و اغتشاش در سیستم در شکل ۷ نشان داده می‌شود و در انتها نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی کنترل‌کننده‌های پیشنهادی مقاله با وجود نامعینی و اغتشاش و تأخیر تصادفی در سیستم آمده است. همان طور که ملاحظه می‌شود وجود نامعینی و اغتشاش در سیستم، باعث افزایش چشم‌گیر خطا در سیستم شده است. در نتیجه ردیابی موقعیت دو ربات به خوبی صورت نگرفته و سیستم از شفافیت مطلوبی در حضور نامعینی و اغتشاش در سیستم برخوردار نمی‌باشد.

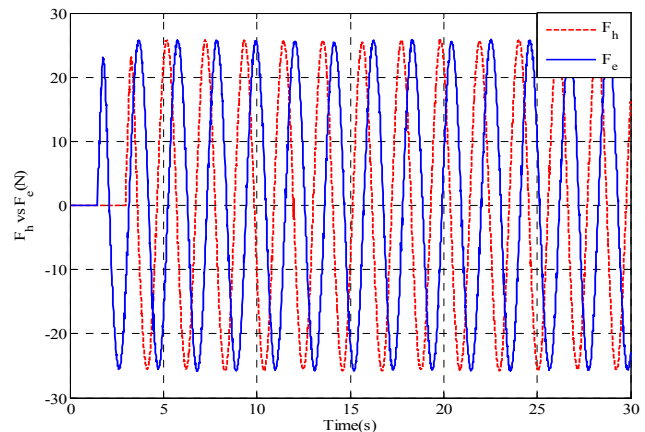
[۵] ا. امین‌زاده قوی‌فکر، "تحلیل پایداری نمایی سیستم‌های کنترل از راه دور خطی گسسته با نمونه‌برداری غیر یکنواخت"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، الف- مهندسی برق، سال ۱۵، شماره ۳-الف، صص. ۱۹۳-۱۸۵، پاییز ۱۳۹۶.

- [6] D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 624-637, Oct. 1993.
- [7] L. Ramos and P. Wilianson, "Desarrollo de una Plataforma en Android para Teleoperacion de un Sistema Robotico en Seguridad de Empresas y Almacenes," 2019.
- [8] F. Huang, et al., "RBFNN-based adaptive sliding mode control design for nonlinear bilateral teleoperation system under time-varying delays," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11905-11912, Jan. 2019.
- [9] Y. J. Pan, C. Canudas-de-Wit, and O. Sename, "Predictive controller design for bilateral teleoperation systems with time varying delays," in *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control, CDC'04*, vol. 4, pp. 3521-3526, Nassau, Bahamas, 14-17 Dec. 2004.
- [10] J. H. Park and H. C. Cho, "Sliding-mode controller for bilateral teleoperation with varying time delay," in *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 311-316, Atlanta, GA, USA, Sept. 1999.
- [11] S. Mobayen, D. Baleanu, and F. Tchier, "Second-order fast terminal sliding mode control design based on LMI for a class of non-linear uncertain systems and its application to chaotic systems," *J. of Vibration and Control*, vol. 23, no. 18, pp. 2912-2925, Oct. 2017.
- [12] H. C. Cho and J. H. Park, "Stable bilateral teleoperation under a time delay using a robust impedance control," *Mechatronics*, vol. 15, no. 5, pp. 611-625, Jun. 2005.
- [13] A. Monemian Esfahani, et al., "Robust impedance control of a teleoperation system with friction compensation under time delay," in *Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 43833, pp. 199-207, Madrid, Spain, June 11-13, 2008.
- [14] L. G. Garcla-Valdovinos, V. Parra-Vega, and M. A. Arteaga, "Observer-based sliding mode impedance control of bilateral teleoperation under constant unknown time delay," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 8, pp. 609-617, Aug. 2007.
- [15] E. Olgun-Diaz, V. Parra-Vega, L. G. Garcla-Valdovinos, and V. de Paul Garcla-Alvizu, "Design parametrization for dynamically similar delayed teleoperation systems," in *Proc. Informatics in Control Automation and Robotics*, vol. 85., pp. 143-155, 2011.
- [16] Y. Wang, G. Luo, L. Gu, and X. Li, "Fractional-order nonsingular terminal sliding mode control of hydraulic manipulators using time delay estimation," *J. of Vibration and Control*, vol. 22, no. 19, pp. 3998-4011, Nov. 2016.
- [17] Y. Xia, J. Zhang, K. Lu, and N. Zhou, "Finite-time attitude control of multiple rigid spacecraft using terminal sliding mode," in *Finite Time and Cooperative Control of Flight Vehicles*, vol. 32, pp. 215-231, 2019.
- [18] Z. Wang, Y. Sun, and B. Liang, "Synchronization control for bilateral teleoperation system with position error constraints: a fixed-time approach," *ISA Trans.*, vol. 93, pp. 125-136, Oct. 2019.
- [19] P. Alinaghi Hosseinabadi, A. Soltani SharifAbadi, S. Mekhilef, and H. R. Pota, "Chattering-free trajectory tracking robust predefined-time sliding mode control for a remotely operated vehicle," *J. of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 1177-1195, Oct. 2020.
- [20] A. Vafaei and M. J. Yazdanpanah, "Terminal sliding mode impedance control for bilateral teleoperation under unknown constant time delay and uncertainties," in *Proc. European Control Conf., ECC'13*, pp. 3748-3753, Zurich, Switzerland, 17-19 Jul. 2013.
- [21] P. Buttolo, P. Braathen, and B. Hannaford, "Sliding control of force reflecting teleoperation: preliminary studies," *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 3, no. 2, pp. 158-172, Spring 1994.
- [22] M. Guiatni, A. Kheddar, and H. Melouah, "Sliding mode bilateral control and four channels scheme control of a force reflecting master/slave teleoperator," in *Proc. IEEE Int Conf. Mechatronics and Automation*, vol. 3, pp. 1660-1665, Niagara Falls, Canada, 29 Jul.-1 Aug. 2005.

[۲۳] م. آزادگان، کنترل سیستم کارکرد از راه دور در حضور تأخیر متغیر با زمان به روش مود لغزشی، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۹.



شکل ۸: ردیابی موقعیت دو ربات با وجود اغتشاشات و نامعینی‌ها با روش پیشنهادی.



شکل ۹: ردیابی نیروهای محیط و دست کاربر با وجود اغتشاشات و نامعینی‌ها در روش پیشنهادی.

شفافیت به وضوح دیده می‌شود. این مقاله با ارائه ساختاری نوین متشکل از کنترل‌کننده‌های مود لغزشی تطبیقی امیدانسی، با وجود در نظر گرفتن تمامی چالش‌های نام‌برده اعم از تأخیر متغیر با زمان، وجود نامعینی‌ها، وجود اغتشاشات و وجود پدیده رزون به حل تمامی چالش‌ها پرداخته است. علاوه بر آن که با استفاده از روش کنترل تطبیقی به تخمین کران بالای اغتشاشات و نامعینی‌ها نیز پرداخته و ردیابی موقعیت دو ربات فرمانده و فرمان‌بر و نیروهای محیط و دست کاربر (شفافیت ایده‌آل) که هدف اصلی در این نوع سیستم‌ها محسوب می‌شود به خوبی صورت گرفته که خود گامی بزرگ در عرصه سیستم‌های کنترل از راه دور به حساب می‌آید و پایداری هر دو کنترل‌کننده، علی‌رغم وجود چالش‌ها نیز از نوع پایداری زمان محدود می‌باشد.

مراجع

- [1] G. Niemeyer and J. J. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *IEEE J. of Oceanic Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 152-162, Jan. 1991.
- [2] D. Sun, F. Naghdy, and H. Du, "Application of wave-variable control to bilateral teleoperation systems: a survey," *Annual Reviews in Control*, vol. 38, no. 1, pp. 12-31, Jan. 2014.
- [3] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 34, no. 5, pp. 494-501, May 1989.

[۴] س. ک. حسینی ثانی، ح. مومنی و ف. جنابی شریفی، "طراحی کنترل‌کننده تطبیقی مدل مرجع برای سیستم حرکت از راه دور با فیدبک از خروجی پیش‌بینی شده"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۳، شماره ۲، صص. ۹۶-۱۰۲، پاییز و زمستان ۱۳۸۴.

هادی صفدرخانی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق در دانشگاه صنعتی امیرکبیر در سال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۴ به پایان برد. دکتر صفدرخانی از سال ۱۳۹۵ به عنوان عضو هیأت علمی در بخش الکترونیک و کنترل دانشکده برق دانشگاه یزد مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند شبکه‌های صنعتی، اینترنت اشیا و طراحی سیستم‌های دیجیتال می‌باشد.

ابوالفضل کمالی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه آزاد یزد و در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل در سال ۱۳۹۹ از دانشگاه یزد دریافت نمود. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های کنترل از راه دور، رباتیک و سیستم‌های تأخیردار.