

کنترل سیستم حرکت از راه دور با استفاده از روش ترکیبی متغیرهای موج و پیش‌بینی کننده اسمیت با تخمین زمان تأخیر متغیر

سهیل گنجه فر^۱، حمید رضا مومنی^{۲*}، فرخ جنابی شریفی^۳، محمد تقی حمیدی بهشتی^۴

۱- دانشجوی دکترای مهندسی برق-کنترل، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار بخش مهندسی برق، گروه کنترل، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رایرسون، تورنتو، کانادا

۴- استادیار بخش مهندسی برق، گروه کنترل، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران صندوق پستی: ۱۴۳-۱۴۱۱۵

S_Ganjefar@yahoo.co

(دریافت مقاله: مهر ۱۳۸۱، پذیرش مقاله اردیبهشت ۱۳۸۲)

چکیده - در این مقاله، آثار خطای مدل‌سازی و خطای زمان تأخیر در پیش‌بینی کننده اسمیت بررسی می‌شود. در سیستم‌های حرکت از راه دور^۱، به دلیل وجود فاصله بین سیستم فرمانده^۲ و فرمانبر^۳، امکان بروز خطای مدل‌سازی همواره وجود دارد. در این مقاله پایداری سیستم‌های حرکتی از راه دور در حضور خطای مدل‌سازی ارزیابی شده است. در بخش بعدی خطای زمان تأخیر در پیش‌بینی کننده اسمیت به دلیل استفاده از شبکه اینترنت به عنوان کانال انتقال در سیستم‌های حرکت از راه دور و نا مشخص بودن آن بررسی شده است. در این بخش به کمک قضیه ای مؤثر بودن پیش‌بینی کننده اسمیت در سیستم‌های حرکت از راه دور حتی با وجود خطا، نشان داده شده است. در ادامه، ساختار جدیدی برای کنترل سیستم‌های عمل از راه دور پیشنهاد شده است. در این ساختار جدید از یک فیلتر وفقی به منظور تعیین زمان تأخیر کانال انتقال برای استفاده در پیش‌بینی کننده اسمیت، استفاده شده است. روش ترکیبی متغیرهای موج و پیش‌بینی کننده اسمیت روشی کارا در کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور است که در این مقاله با یک فیلتر وفقی ترکیب شده و ساختار جدیدی را به وجود آورده است. یکی از مشکلات اصلی سیستم‌های حرکتی از راه دور، زمان تأخیر متغیر با زمان است که کاهش کارایی و حتی ناپایداری سیستم را در پی دارد. در این روش زمان تأخیر متغیر با زمان به صورت بیدرنگ^۴ اندازه‌گیری شده و در ساختار ترکیبی متغیرهای موج و پیش‌بینی کننده اسمیت به کار برده می‌شود. به طوریکه با استفاده از این روش مشکل کارایی پایین سیستم برطرف شده است.

کلید واژگان: زمان تأخیر، سیستم‌های حرکتی از راه دور، پیش‌بینی کننده اسمیت، متغیرهای موج.

۱- مقدمه

متقل می‌شود [۱]. این اطلاعات با عبور از تعداد زیادی

سویچ در خط جاری می‌شوند. هنگامی که کیفیت خط کاهش پیدا می‌کند، زمان تأخیر به دلیل ارسال مجدد یا

در سیستم‌های حرکتی از راه دور که کانال انتقال سیگنالهای آنها، شبکه اینترنت است، اطلاعات در بسته‌های کوچک

1. Teleoperation

2. Master

3. Slave

4. On Line

آندرسون و اسپانگ تئوری انفعالی^۴ و پراکندگی^۵ را در ارتباط با پایداری سیستمهای حرکتی از راه دور در سال ۱۹۸۹ ارائه نمودند [۷]. نایمر و اسلاتین روش متغیرهای موج را در ارسال سیگنال در سیستمهای حرکت از راه دور به کار برده و از تئوری انفعالی برای پایداری سیستم بهره بردند [۸]. در سال ۱۹۹۹ پارک و کو [۹] از روش مود لغزشی برای طراحی کنترل کننده در سیستمهای حرکت از راه دور در حضور تأخیر زمانی استفاده کردند. در سال ۲۰۰۰ الحاج [۱۰] روش مبنای اتفاق^۶ را که مستقل از زمان است برای کنترل سیستمهای حرکت از راه دور ارائه کرد. نویسندگان مقاله، روش ترکیبی جدیدی را برای سیستمهای حرکت از راه دور در سال ۲۰۰۱ ارائه کردند [۱۱].

در سال ۲۰۰۲ ساختار ترکیبی دیگری از سوی نویسندگان مقاله ارائه شده است که سرعت پاسخ بسیار مناسبی دارد [۱۲]. در مقاله حاضر خطای مدلسازی و خطای زمان تأخیر و زمان پیش‌بینی در سیستمهای حرکت از راه دور بررسی و اثر مثبت پیش‌بینی کننده اسمیت حتی در حضور خطا در زمان پیش‌بینی، به طور کامل نشان داده شده است. در ادامه با بکارگیری ساختار ترکیبی ارائه شده در [۱۲] و یک فیلتر وفقی، ساختار کاملاً جدید و مقاومی (مقاوم در برابر زمان تأخیر متغیر) معرفی شده است. این ساختار به دلیل پیش‌بینی زمان تأخیر آینده کانال انتقال و پیش‌بینی سیگنال کنترل، کارایی بسیار مناسبی دارد.

۲- سیستمهای حرکتی از راه دور

سیستم حرکت از راه دور را می‌توان به صورت شکل ۱ در نظر گرفت:

ترافیک سایر شبکه‌ها ممکن است به طور ناگهانی افزایش یابد و حتی در شرایطی ممکن است ارتباط به طور موقت قطع شود. در چنین شرایطی سیگنال ارسالی معیوب شده و این می‌تواند موجب ناپایداری سیستم شود. حرکت از راه دور تعمیمی از حسیهای انسان و توانایی انجام کارها با بازوی مصنوعی^۱ در موقعیتهای دور است. در سیستم حرکت از راه دور [۲]، کاربر از طریق یک بازوی مصنوعی سیستم فرمانده با اعمال نیرو، فرمان خود را صادر می‌نماید. با اعمال این نیرو بازوی مصنوعی با سرعت V حرکت کرده و این سرعت از طریق کانال ارتباطی به سیستم فرمانبر^۲ که شامل یک بازو است - منتقل می‌شود. بدین ترتیب بازو، به فرمان سرعت پاسخ داده و نیرویی در محیط کار تولید می‌کند. سیگنال اندازه این نیرو مجدداً توسط کانال انتقال به سیستم فرمانده^۳ منتقل می‌شود.

نکته مهم در این گونه سیستمها وجود تأخیر زمانی متغیر با زمان در شبکه انتقال است. تأخیر زمانی متغیر با زمان، کنترل سیستم را دشوار کرده و کارایی سیستم را کاهش می‌دهد. برای کاهش آثار تأخیر زمانی در سیستمهای حرکتی از راه دور کارهای مختلفی انجام شده است. در سال ۱۹۶۶ فرل [۳] برای اولین بار ناپایداری سیستم حرکت از راه دور را در حضور زمان تأخیر نشان داد. در سال ۱۹۷۵ اسمیت [۴] روشی را به نام پیش‌بینی کننده اسمیت برای کاهش زمان تأخیر در سیستمهای تأخیر دار ارائه کرد. سپس در سال ۱۹۸۱، ورتوت [۵] نشان داد که پایداری سازی چنین سیستمهایی با وجود زمان تأخیر، در صورتی که پهنای باند سیستم به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کند، امکان پذیر است. در این زمینه بروک در مقاله خود [۶] به پهنای باندی بین ۱۰-۴ Hz برای اعمال معمولی حرکت از راه دور اشاره کرده است.

4. Passivity

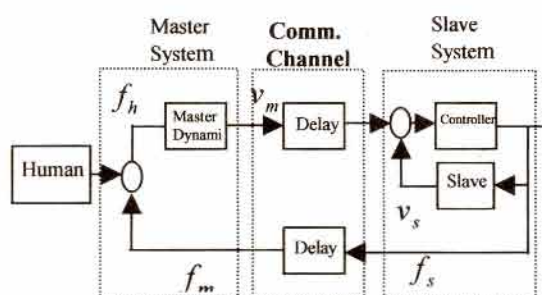
5. Scattering

6. Event Based

1. Manipulator

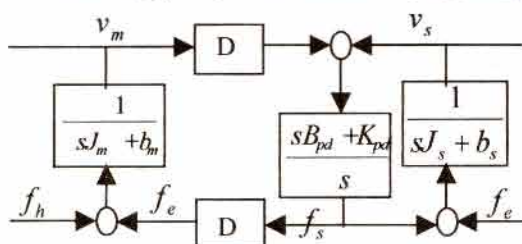
2. Slave

3. Master



شکل ۲ ساختار کلی سیستم حرکتی از راه دور دو طرفه

در شکل ۳ ساختار بلوکی سیستم حرکتی از راه دور (سیستم فرمانده و فرمانبر خطی فرض شده) - که در شبیه سازی از آن استفاده شده - ارائه گردیده است.



شکل ۳ سیستم حرکتی از راه دور به کار گرفته شده در شبیه سازی

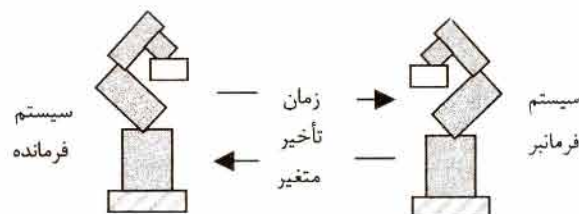
در این ساختار معادلات حرکت بازو در سیستم فرمانده به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$J_m \theta_m'' + b_m \theta_m' = \tau_m \quad (1)$$

در آن J_m ضریب اینرسی، b_m ضریب میرایی، θ_m'' شتاب، θ_m' سرعت و τ_m گشتاور اعمالی در بخش فرمانده است. به طور مشابه معادلات حرکت در سیستم فرمانبر به صورت زیر است:

$$J_s \theta_s'' + b_s \theta_s' = \tau_s \quad (2)$$

در آن J_s ضریب اینرسی، b_s ضریب میرایی، θ_s'' شتاب، θ_s' سرعت و τ_s گشتاور اعمالی در بخش فرمانبر است. S معرف پارامترها در فرمانبر و m معرف پارامترها در فرمانده

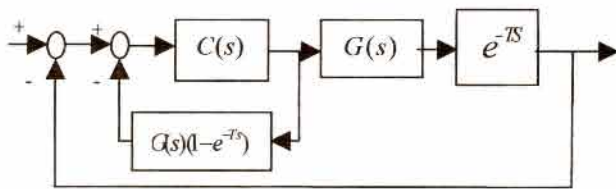


شکل ۱ نمایی از سیستم حرکت از راه دور (Teleoperation)

به طور کلی سیستمهای حرکت از راه دور به دو دسته کلی یکطرفه^۱ و دو طرفه^۲ تقسیم بندی می شود. بر طبق تعریف داده شده در [۱۳] وقتی عکس العمل نیروی اعمال شده به فرمانبر از طریق شبکه، به فرمانده فیدبک شده و از طریق محرک فرمانده به دست کاربر منتقل می شود، به سیستم حرکتی از راه دور مربوط، سیستم دو طرفه یا انعکاس نیرو گفته می شود.

مدل کلی سیستم حرکت از راه دور دو طرفه به صورت شکل ۲ است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، کاربر، نیروی f_h را به سیستم فرمانده اعمال می کند، از این نیرو f_m (نیروی فیدبک شده از سیستم راه دور فرمانبر) کم شده و نتیجه به دینامیک فرمانده اعمال می شود. با توجه به دینامیک بازو، این بازو با سرعت v_m شروع به حرکت می کند. سپس این سرعت (v_m) توسط کانال انتقال با تأخیر $\tau_1(t)$ که به زمان وابسته است به سیستم راه دور (فرمانبر) منتقل می شود. در آن سیستم، سرعت منتقل شده ($v_m(t - \tau_1(t))$) با سرعت در سیستم راه دور v_s مقایسه شده و پس از عبور از یک کنترل کننده به دینامیک فرمانبر اعمال می گردد و سرعت v_s را ایجاد می کند. طبق تعریف سیستمهای دو طرفه، نیروی f_s پس از عبور از کانال با تأخیر $\tau_2(t)$ را برای مقایسه با f_h تولید می کند.

1. Unilateral
2. Bilateral



شکل ۵ پیش‌بینی کننده اسمیت [۴]

در این سیستم تابع انتقال حلقه بسته به صورت زیر قابل تعیین است:

$$G_{cl}(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} e^{-TS} \quad (6)$$

در این تابع انتقال، معادله مشخصه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta(s) = 1 + C(s)G(s) \quad (7)$$

همانطور که در این معادله مشاهده می‌شود، در معادله مشخصه عبارت نمایی وجود ندارد و ساختار مربوط به ازای تمام زمانهای تأخیر پایدار است.

نکته ای که در استفاده از پیش‌بینی کننده اسمیت وجود دارد، اطلاع کافی از زمان تأخیر (T) و مدل سیستم (G(s)) است.

۴- بررسی اثر خطای مدلسازی در پایداری سیستم تأخیر دار با پیش‌بینی کننده اسمیت

اکنون فرض می‌کنیم در مدل سیستم، خطایی ضربی به صورت زیر وجود داشته باشد:

$$\begin{aligned} \hat{G}(s) &= G(s)(1 + \delta G(s)) \\ \hat{G}(s) &= G(s) + G(s)\delta G(s) = G(s) + \Delta G(s) \end{aligned} \quad (8)$$

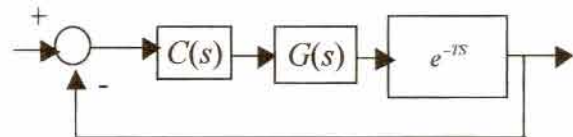
در معادله (۸)، $\hat{G}(s)$ معرف تابع انتقال سیستم واقعی، $G(s)$ معرف تابع انتقال در دسترس و $\delta G(s)$ معرف خطای مدلسازی ضربی است.

است. برای ردیابی موقعیت در فرمانبر از کنترل کننده ساده PD به صورت زیر استفاده گردیده است:

$$\tau_{pd} = K_{pd}(\theta_m - \theta_s) + B_{pd}(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_s) \quad (3)$$

۳- معرفی سیستم تأخیر دار و پیش‌بینی کننده اسمیت

در سیستم حلقه بسته تأخیر دار شکل ۴، ممکن است زمان تأخیر موجب ناپایداری سیستم شود. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، معادله مشخصه به صورت رابطه (۵) قابل نمایش است.



شکل ۴ سیستم حلقه بسته همراه با تأخیر T

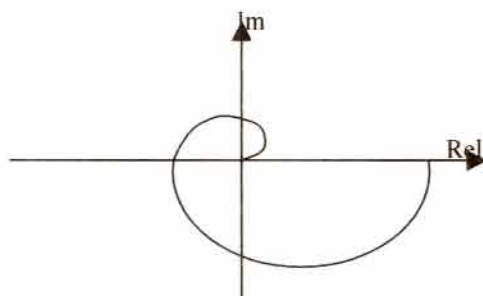
در این شکل تابع انتقال حلقه بسته سیستم به صورت رابطه (۴) است:

$$G_{cl}(s) = \frac{C(s)G(s)e^{-TS}}{1 + C(s)G(s)e^{-TS}} \quad (4)$$

که $G(s)$ تابع تبدیل سیستم، $G_{cl}(s)$ تابع تبدیل حلقه بسته و $C(s)$ تابع تبدیل کنترل کننده و T زمان تأخیر است. در این سیستم معادله مشخصه سیستم به صورت زیر است:

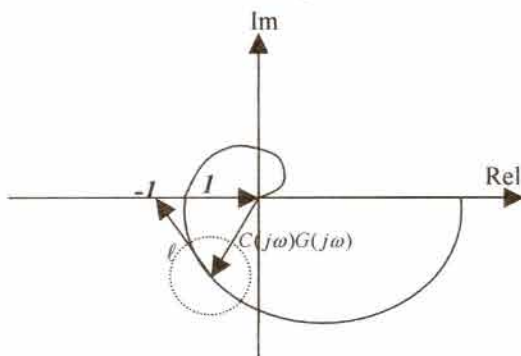
$$\Delta(s) = 1 + C(s)G(s)e^{-TS} \quad (5)$$

همانطور که در معادله مشخصه مشاهده می‌شود، زمان تأخیر موجب جابه‌جایی قطبها و در نتیجه احتمالاً موجب ناپایداری در سیستم می‌شود. اسمیت برای برطرف کردن این مشکل، پیش‌بینی کننده اسمیت را به صورت زیر پیشنهاد کرد (شکل ۵).



شکل ۷ نمودار نایکوئیست رابطه (۷)

وجود جمله اضافی در معادله (۱۱) موجب می شود که نمودار نایکوئیست شکل ۷ به صورت زیر شود. در عمل در هر فرکانس (ω_*) ، جمله $\Delta G(j\omega_*)C(j\omega_*)e^{-T\omega_*}$ به هر نقطه اضافه می شود (شکل ۸).



شکل ۸ نمودار نایکوئیست معادله مشخصه رابطه (۱۱)

قضیه یک

سیستم خطی تک ورودی، تک خروجی مینیمم فاز تأخیردار با پیش‌بینی کننده اسمیت، در صورت وجود خطا در مدلسازی، پایدار است، اگر داشته باشیم:

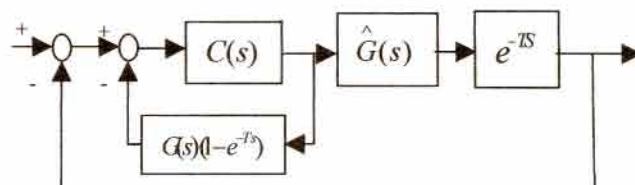
$$\forall \omega \quad |1 + [C(j\omega)G(j\omega)]^{-1}| > r(\omega) \quad (12)$$

که در آن:

$$\Delta G(j\omega) = G(j\omega)\delta G(j\omega) \quad \& \quad \forall \omega \quad |\delta G(j\omega)| < r(\omega)$$

که $r(\omega)$ تابع کران بالای خطای مدلسازی ضربی و $C(s)$ و $G(s)$ خطی است.

اکنون با فرض خطا در مدل در نظر گرفته شده سیستم شکل ۵ به شکل ۶ تبدیل می شود.



شکل ۶ سیستم با خطای مدل سازی

به روشی مشابه رابطه (۶)، تابع انتقال سیستم شکل ۶ را می توان محاسبه نمود:

$$G_{cl}(s) = \frac{C(s)\hat{G}(s)e^{-Ts}}{1 + C(s)G(s) + C(s)e^{-Ts}(\hat{G}(s) - G(s))} \quad (9)$$

با توجه به رابطه (۸)، رابطه (۹) به صورت رابطه (۱۰) تبدیل می شود:

$$G_{cl}(s) = \frac{C(s)\hat{G}(s)e^{-Ts}}{1 + C(s)G(s) + \Delta G(s)C(s)e^{-Ts}} \quad (10)$$

در این تابع انتقال، معادله مشخصه به صورت زیر است:

$$\Delta(s) = 1 + C(s)G(s) + \Delta G(s)C(s)e^{-Ts} \quad (11)$$

با مقایسه رابطه (۷) و (۱۱) براحتی می توان پی برد که جمله $\Delta G(s)C(s)e^{-Ts}$ در معادله (۱۱)، نسبت به معادله (۷) اضافه شده است. اضافه شدن این جمله می تواند موجب ناپایداری سیستم شود. بدین منظور، در قضیه ۱ شرایط پایداری برای چنین سیستمهایی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

قبل از ارائه قضیه، تأثیر جمله اضافه شده در معادله مشخصه (۱۱) را نسبت به معادله مشخصه (۷) با ترسیم نمودار نایکوئیست، بررسی می کنیم. اگر نمودار نایکوئیست، معادله (۶) به صورت شکل ۷ باشد، خواهیم داشت:

اثبات

$$G_{cl}(s) = \frac{C(s)G(s)e^{-TS}}{1 + C(s)G(s)(1 - e^{-T_1S}) + C(s)G(s)e^{-TS}} \quad (14)$$

$$\Delta(s) = 1 + C(s)G(s) + C(s)G(s)(e^{-TS} - e^{-T_1S}) \quad (15)$$

قضیه دو

در سیستم با پیش‌بینی کننده اسمیت با تأخیر کم، در صورت وجود خطا بین زمان تأخیر (T) و زمان پیش‌بینی (T_1)، رفتار سیستم، مشابه سیستم تأخیردار با زمان تأخیر کمتر (معادل با تفاضل دو زمان تأخیر $(|T - T_1|)$) است.

اثبات

با بسط جملات e^{-TS} و e^{-T_1S} به سری تیلور داریم:

$$e^{-TS} = 1 - TS + \frac{1}{2}T^2S^2 + \dots \quad (16)$$

$$e^{-T_1S} = 1 - T_1S + \frac{1}{2}T_1^2S^2 + \dots$$

با فرض اینکه زمان تأخیر (T) و زمان پیش‌بینی (T_1) مقادیر کوچکی باشند، جملات e^{-TS} و e^{-T_1S} را به صورت تقریبی زیر می‌توان در نظر گرفت:

$$e^{-TS} = 1 - TS \quad (17)$$

$$e^{-T_1S} = 1 - T_1S$$

با توجه به معادله (16)، معادله مشخصه (15) به صورت زیر قابل نمایش است:

$$\begin{aligned} \Delta(s) &= 1 + C(s)G(s) + C(s)G(s)(e^{-TS} - e^{-T_1S}) \\ &= 1 + C(s)G(s) + C(s)G(s)(1 - sT - 1 + sT_1) \\ &= 1 + C(s)G(s) + C(s)G(s)(sT_1 - sT) \\ &= 1 + C(s)G(s)(1 - s(T - T_1)) \\ &= 1 + C(s)G(s)e^{-(T-T_1)S} \end{aligned} \quad (18)$$

بنابراین در چنین سیستمی، معادله مشخصه به صورت زیر قابل بیان است:

$$\Delta(s) = 1 + C(s)G(s)e^{-(T-T_1)S}$$

چنانچه نمودار نایکویست به ازای تمام فرکانسها، از نقطه ۱- عبور نکند (شرط پایداری بر طبق قضیه نایکویست). بر اساس شکل ۸ برای برقراری چنین شرطی کافی است، $\ell = 1 + C(j\omega)G(j\omega)$ از اغتشاش وارد شده در فرکانس ω ($\Delta G(j\omega)C(j\omega)e^{-Tj\omega}$) بزرگتر باشد، یعنی:

$$\begin{aligned} |1 + C(j\omega)G(j\omega)| &> |\Delta G(j\omega)C(j\omega)e^{-Tj\omega}| \\ \Rightarrow |1 + C(j\omega)G(j\omega)| &> |G(j\omega)\delta G(j\omega)C(j\omega)e^{-Tj\omega}| \\ \Rightarrow |1 + [C(j\omega)G(j\omega)]^{-1}| &> |\delta G(j\omega)e^{-Tj\omega}| \end{aligned}$$

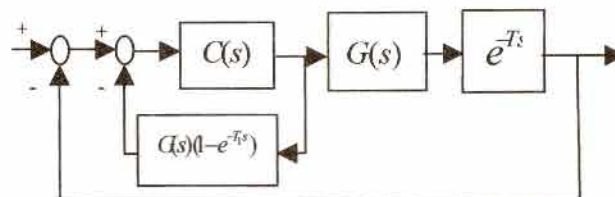
با توجه به اینکه خطای مدلسازی ضربی $\delta G(j\omega)$ به ازای تمامی فرکانسها، کوچکتر از $r(j\omega)$ است، بنابراین اگر رابطه (۱۳) برقرار باشد، همواره شرط پایداری برقرار است:

$$|1 + [C(j\omega)G(j\omega)]^{-1}| > r(\omega) \quad (13)$$

و لذا قضیه ثابت می‌شود.

۵- بررسی اثر پیش‌بینی کننده اسمیت با وجود خطا در زمان پیش‌بینی

در شکل ۹ اگر بین زمان تأخیر موجود T در سیستم و زمان پیش‌بینی اسمیت T_1 ، خطا وجود داشته باشد، تابع انتقال و معادله مشخصه سیستم به صورت زیر قابل تعیین است:



شکل ۹ سیستم دارای خطا بین زمان پیش‌بینی و زمان تأخیر

همانطور که در این معادله مشاهده می‌شود، معادله مشخصه به صورت زیر قابل تعیین است.

خروجی این سیستم، همان زمان تأخیر در مرحله $k+1$ ام است، یعنی:

$$y_k = d_{k+1}$$

برطبق رابطه (۲۰)، $y_k = a_k^T W$ برای پیش‌بینی زمان تأخیر به‌روشن زمان حقیقی، از روش حداقل مربعات بازگشتی (RLS) می‌توان استفاده کرد. در این روش ماتریس کوواریانس (مربعی مثبت معین) از رابطه زیر در هر مرحله بر اساس مقادیر مرحله قبل تعیین می‌شود.

$$p_k = p_{k-1} - \frac{p_{k-1} a_k^T a_k p_{k-1}}{1 + a_k^T p_{k-1} a_k} \quad (21)$$

p_k ماتریس کوواریانس مربعی مثبت معین است. خطای خروجی و تخمین وزنها و در نهایت پیش‌بینی زمان تأخیر به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$e_k = y_k - a_k^T \hat{W}_{k-1}$$

$$\hat{W}_k = \hat{W}_{k-1} + p_k a_k e_k \quad (22)$$

$$d_{k+1} = a_k^T \hat{W}_k$$

که e خطای خروجی و $\hat{W}_k$ بردار تخمین وزنها است.

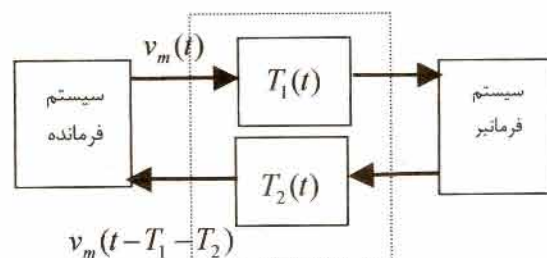
با توجه به متغیر بودن زمان تأخیر، مرتبه فیلتر (n) نباید بزرگ (بزرگتر از ۴) انتخاب شود. لذا فیلتر فوقی به‌کار برده شده در این ساختار از مرتبه سه پیشنهاد شده است، زیرا زمان تأخیر قابل پیش‌بینی، متغیری تصادفی بوده و برای پیش‌بینی آن نمی‌توان طول پنجره فیلتر را بزرگ در نظر گرفت. در واقع طول پنجره فیلتر، میزان وابستگی زمان تأخیر تحت پیش‌بینی را به زمانهای تأخیر قبلی نشان می‌دهد.

$$a_k = \begin{bmatrix} d_k \\ d_{k-1} \\ \vdots \\ d_{k-n+1} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

رفتار این سیستم، مشابه رفتار سیستمی با تأخیر $T - T_1$ است.

۶- پیش‌بینی زمان تأخیر در سیستمهای حرکتی از راه دور

پیش‌بینی زمان تأخیر بین دو سیگنال به روشهای مختلفی انجام می‌شود [۱۴]. در سیستمهای حرکت از راه دور، زمان تأخیر بین دو سیگنال فرمان و فیدبک متغیر با زمان h_{sj} بنابراین باید از روشهای زمان حقیقی برای تعیین و پیش‌بینی زمان تأخیر استفاده a, n . در شکل ۱۰ نمایی از سیستم حرکت از راه دور و زمان تأخیر موجود در آن نشان داده شده است.



شکل ۱۰ نمایی از سیستم حرکت از راه دور با زمان تأخیر کانالهای آن

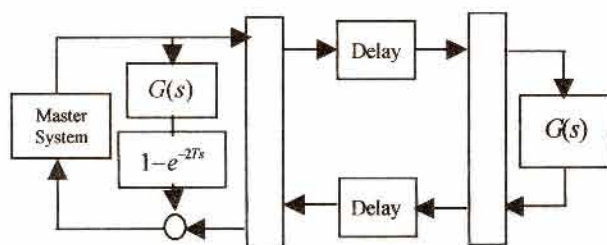
در شکل ۱۰ هدف اندازه‌گیری زمان تأخیر بین دو سیگنال

$v_m(t)$ و $v_m(t - T_1 - T_2)$ و پیش‌بینی آن است. T_1 و T_2 هر دو متغیر با زمان است. برای پیش‌بینی زمان تأخیر از فیلتری با ساختار زیر استفاده شده است:

$$d_{k+1} = w_1 d_k + w_2 d_{k-1} + w_3 d_{k-2} + \dots + w_n d_{k-n+1} \quad (20)$$

که در آن n مرتبه فیلتر و w_i ها پارامترهای فیلتر است. در این ساختار بردار ورودی و وزنها به‌صورت زیر می‌باشند:

است؛ لذا ثابت بودن زمان پیش‌بینی و عدم تطابق آن با زمان تأخیر کانال، کارایی سیستم را کاهش می‌دهد.

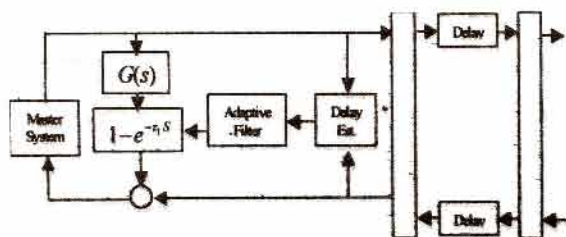


شکل ۱۲ ساختار ترکیبی پیش‌بینی کننده اسمیت و متغیرهای موج

بنابراین در بخش بعدی، ساختار جدیدی همراه با فیلتر وقفی برای رفع این مشکل ارائه شده است.

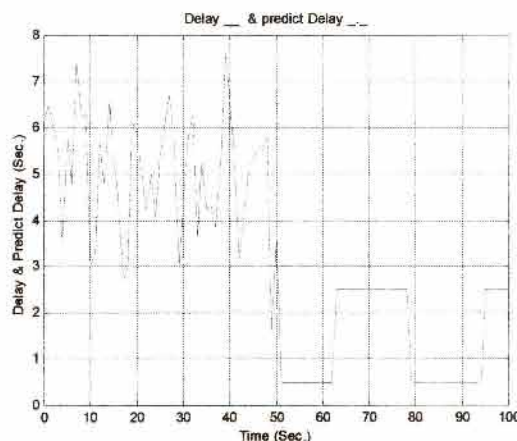
۸- ساختار جدید ترکیبی همراه با فیلتر وقفی

برای نزدیک کردن زمان پیش‌بینی اسمیت و زمان تأخیر کانالهای انتقال، از یک فیلتر وقفی به روش RLS در ساختار جدید استفاده شده است. در این ساختار مقدار زمان پیش‌بینی اسمیت به کمک فیلتر وقفی بهنگام می‌گردد. ساختار جدید معرفی شده، در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ ساختار جدید وقفی سیستمهای حرکتی از راه دور

در این ساختار از فیلتر وقفی معرفی شده در بخش ششم مقاله استفاده شده است. به‌طور کلی هدف محققان در سیستمهای حرکتی از راه دور، کاهش زمان پاسخ سیستم فرمانبر به سیستم فرمانده است. وجود زمان تأخیر متغیر با



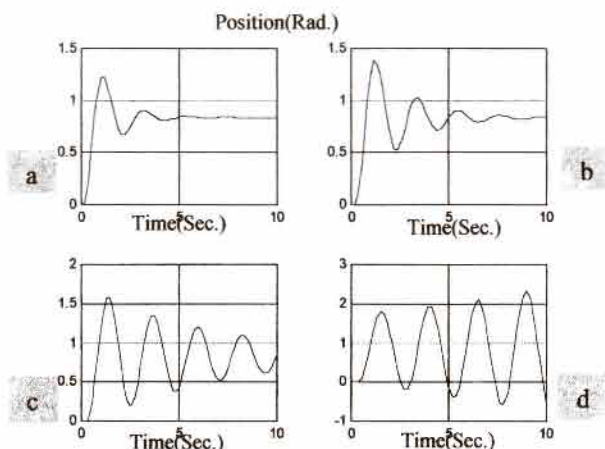
شکل ۱۱ پیش‌بینی زمان تأخیر توسط فیلتر وقفی

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، فیلتر وقفی به‌کار رفته، به خوبی زمان تأخیر در سیستم را پیش‌بینی می‌کند. با استفاده از این فیلتر ساختار جدیدی در بخش پنجم ارائه شده است.

۷- روش ترکیبی متغیرهای موج و پیش‌بینی کننده اسمیت در سیستمهای حرکت از راه دور

در روش ترکیبی پیش‌بینی کننده اسمیت و متغیر موج [۱۲] از پیش‌بینی کننده اسمیت قبل از مبدل موج [۸] و کانال انتقال برای بالا بردن کارایی (سرعت و دقت) سیستمهای حرکت از راه دور استفاده شده است. ساختار جدید پیش‌بینی کننده اسمیت و متغیرهای موج در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

در این ساختار، یک پیش‌بینی کننده پارامترهای سیستم فرمانده را قبل از تأخیر موجود در سیستم تخمین می‌زند که این عمل موجب افزایش کارایی در سیستم می‌شود. همانطور که در این ساختار مشاهده می‌شود، زمان پیش‌بینی در جبران کننده اسمیت $2T$ ثانیه است، در صورتی که زمان تأخیر در کانالهای سیستم حرکتی از راه دور متغیر با زمان

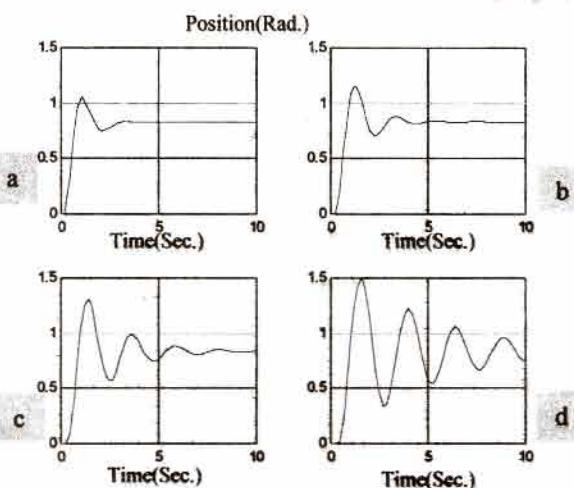


شکل ۱۴

- (a) پاسخ پله سیستم تأخیر دار، به ازای تأخیر 0.1 Sec.
- (b) پاسخ پله سیستم تأخیر دار، به ازای تأخیر 0.2 Sec.
- (c) پاسخ پله سیستم تأخیر دار، به ازای تأخیر 0.3 Sec.
- (d) پاسخ پله سیستم تأخیر دار، به ازای تأخیر 0.4 Sec.

۹-۱-۲- حالت دوم

در این حالت، پاسخ پله سیستم تأخیردار، با پیش‌بینی کننده اسمیت، به ازای چهار تأخیر مختلف ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ ثانیه محاسبه و رسم شده است. در این حالت زمان پیش‌بینی برابر ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۵

- (a) پاسخ پله سیستم، به ازای تأخیر 0.1 Sec و پیش‌بینی 0.1 Sec.
- (b) پاسخ پله سیستم، به ازای تأخیر 0.2 Sec و پیش‌بینی 0.1 Sec.
- (c) پاسخ پله سیستم، به ازای تأخیر 0.3 Sec و پیش‌بینی 0.1 Sec.
- (d) پاسخ پله سیستم، به ازای تأخیر 0.4 Sec و پیش‌بینی 0.1 Sec.

زمان در سیستم، موجب کندی زمان پاسخ می‌شود. ارائه ساختار ترکیبی [۱۲] و [۱۱] زمان پاسخ را به میزان قابل توجهی کاهش داده اما با وجود این، ساختار جدید معرفی شده در این مقاله، باعث پاسخ سریعتر سیستم فرمانبر از سیستم فرمانده شده است. برای مقایسه عملکرد سیستم ارائه شده با ساختارهای قبلی به نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در بخش بعدی می‌توان رجوع کرد.

۹- شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی از مدل شکل ۳ استفاده شده است. شبیه‌سازی از دو بخش تشکیل شده، بخش اول برای خطای زمان تأخیر و بخش دوم برای ساختار ترکیبی جدید. در مدل شکل ۳ پارامترها به صورت زیر است:

$$[J_m \ b_m \ B_{pd} \ K_{pd} \ J_s \ b_s \ b] = [10 \ 5 \ 60 \ 60 \ 40 \ 35 \ 120]$$

۹-۱- بخش اول شبیه‌سازی

در بخش اول شبیه‌سازی، سه حالت مورد ارزیابی قرار گرفته است:

- ۱- شبیه‌سازی سیستم تأخیردار، بدون پیش‌بینی کننده اسمیت؛
- ۲- شبیه‌سازی سیستم تأخیردار، با حضور پیش‌بینی کننده اسمیت ($T \geq T_1$)؛
- ۳- شبیه‌سازی سیستم تأخیردار، با پیش‌بینی کننده اسمیت ($T \leq T_1$).

۹-۱-۱- حالت اول

در این حالت، پاسخ پله سیستم تأخیردار (بدون پیش‌بینی کننده اسمیت)، به ازای چهار تأخیر مختلف ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ محاسبه و رسم شده است.

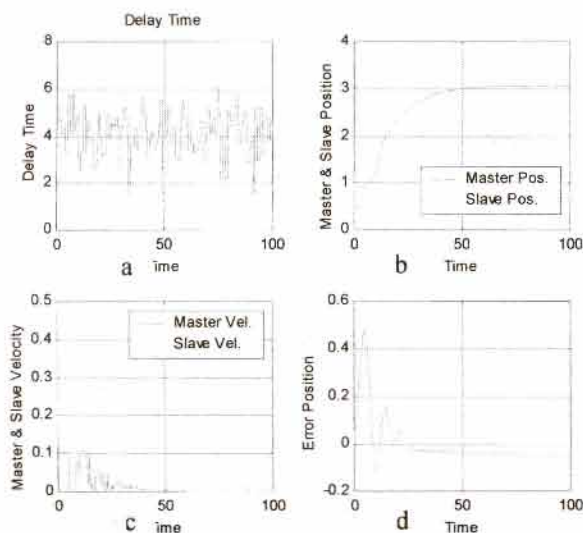
همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، افزایش زمان تأخیر موجب می‌شود، سیستم به سمت ناپایداری حرکت کند. در شکل بالا سیستم به ازای تأخیر ۰/۴ ثانیه ناپایدار شده است.

زمان تأخیر متغیر با زمان است. در هر حالت موقعیت، سرعت و خطای موقعیت در سیستم فرمانده و فرمانبر شبیه‌سازی و به‌صورت مستقل رسم شده است. شبیه‌سازیهای انجام شده برای دو ساختار:

- ۱- روش ترکیبی بدون فیلتر وقفی؛
- ۲- روش ترکیبی جدید وقفی انجام شده است.

۹-۲-۱- حالت اول، روش ترکیبی بدون فیلتر وقفی

همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، خطای موقعیت در شکل ۱۷-d هیچگاه صفر نمی‌شود و همواره وجود دارد. اما در شکل ۱۸، خطای موقعیت صفر شده و حساسیت سیستم به زمان تأخیر متغیر کاهش یافته است. مشکل حالت قبل (خطای حالت دائم موقعیت سیستم فرمانده و فرمانبر) با استفاده از ساختار جدید کاملاً حل شده است.

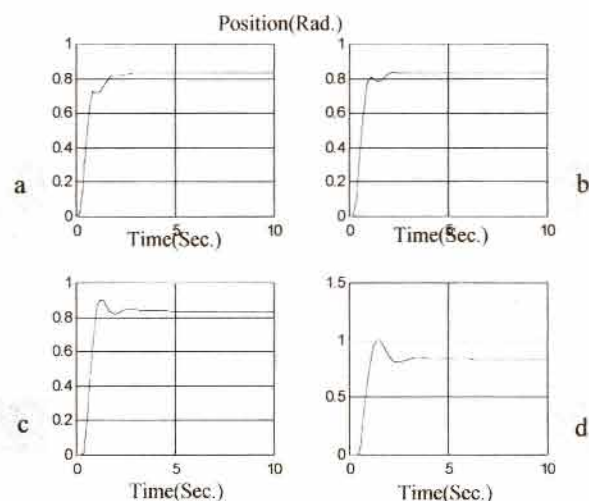


شکل ۱۷ (a) زمان تأخیر موجود در سیستم (b) موقعیت در سیستم فرمانبر و فرمانده (c) سرعت در سیستم فرمانده و فرمانبر (d) خطا بین موقعیت فرمانده و فرمانبر

در این حالت در شکل ۱۵، با وجود تأخیرهای یکسان نسبت به حالت قبل، به دلیل استفاده از پیش‌بینی کننده اسمیت با پیش‌بینی ۰/۱ ثانیه، سیستم نا پایدار نشده است.

۹-۱-۳- حالت سوم

در این حالت، پاسخ پله سیستم تأخیردار، با پیش‌بینی کننده اسمیت، به‌ازای چهار تأخیر مختلف ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ ثانیه محاسبه و رسم شده است. در این حالت زمان پیش‌بینی ۰/۴ ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۶

- (a) پاسخ پله سیستم، به‌ازای تأخیر 0.1 Sec. و پیش‌بینی 0.4 Sec.
- (b) پاسخ پله سیستم، به‌ازای تأخیر 0.2 Sec. و پیش‌بینی 0.4 Sec.
- (c) پاسخ پله سیستم، به‌ازای تأخیر 0.3 Sec. و پیش‌بینی 0.4 Sec.
- (d) پاسخ پله سیستم، به‌ازای تأخیر 0.4 Sec. و پیش‌بینی 0.4 Sec.

در این حالت در شکل ۱۶، زمان پیش‌بینی در هر چهار مورد، بزرگتر از یا مساوی با زمان تأخیر سیستم در نظر گرفته شده است. در چنین حالتی رفتار سیستم کاملاً پایدار است.

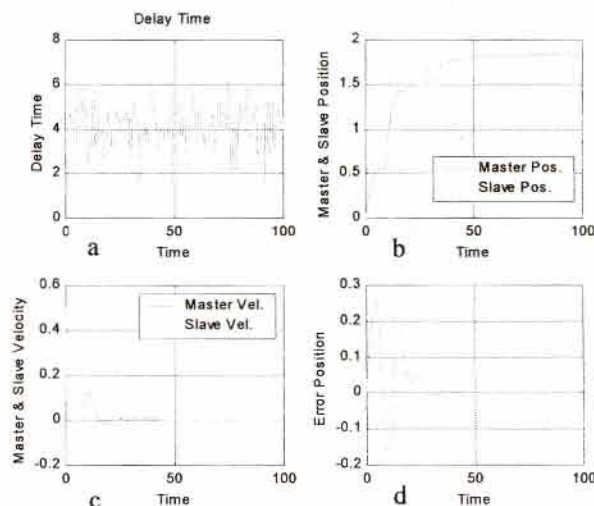
۹-۲- بخش دوم شبیه‌سازی

در بخش دوم شبیه‌سازی از ساختار ارائه شده در شکل ۳ استفاده شده است. در کلیه کارهای انجام شده در این بخش

کمک زمانهای تأخیر قبلی پیش‌بینی می‌شود اما برای پیش‌بینی دقیق‌تر زمان تأخیر می‌توان از پارامترهای ورودی دیگری مانند مختصات مبدا و مقصد اتصال، زمان اتصال، تعداد سوییچهای اتصال و ... نیز استفاده کرد.

۱۱- منابع

- [1] G. Niemeyer; E. Slotine; "Towards Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet;" *Proc. Of the IEEE; Int. Conf. On Robotics & Automation*; 1998.
- [2] H. Momeni; S. Ganjefar; "Control and Executing Long-Distance Instructive Using Internet;" *The World Internet & Electronic Cities Conference*; 2001; Kish Island.
- [3] W. Ferrel; "Remote Manipulator with Transmission Delay;" *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*; HF E-6; 24-32; Sep. 1965
- [4] O. Smith; "Closer Control of Loops with Dead Time;" *Chemical Engineering Progress*; Vol. 53 , No. 5; May 1957; pp 217-219
- [5] J. Vertut; A. Micaelli; P. Marchal; J. Guitter; "Short Transmission Delay on a Force Relative Bilateral Manipulator;" *In Proceeding of the 4th Rom_An; Sywarsaw*; 1981; pp. 269.
- [6] T.L. Brooks; "Teleoperator System Response for Nuclear Telepresence;" *STX Publication ST system corp.*; March 1990.
- [7] J. Anderson; W. Spong; "Bilateral Control of Teleoperators with TimeDelay;" *IEEE Tran. On Automatic Control*; Vol. 34, 1989; pp 499-501.
- [8] G. Niemeyer; E. Slotine; "Using Wave Variables for System Analysis and Robot Control;" *Proceeding of IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*; 1997.
- [9] J. Park; H.Cho; "Sliding Mode Controller for Bilateral Teleoperation with Varing Time Delay;" *Proceeding of IEEE /ASME*; 1999.
- [10] I. Elhajj; N. Xi; "Real time Control of Internet based Teleoperation with force reflection;" *International Conf. On*



شکل ۱۸ (a) زمان تأخیر موجود در سیستم (b) موقعیت در

سیستم فرمانبر و فرمانده (c) سرعت در سیستم فرمانده و فرمانبر (d) خطا بین موقعیت فرمانده و فرمانبر

۱۰- نتیجه‌گیری

به دلیل وجود فاصله بین سیستم فرمانده و فرمانبر، در سیستمهای حرکت از راه دور، امکان وجود خطا در مدل سیستم نسبت به سیستمهای معمولی بیشتر است، اما در این حالت با رعایت شرط به دست آمده در بخش سوم پراحتی می‌توان از پایداری سیستم مطمئن شود. با کار ارائه شده در بخش چهارم این مقاله، با توجه به اختلافی که بین زمان تأخیر و زمان پیش‌بینی در روش ترکیبی [۱۲] ممکن است وجود داشته باشد، می‌توان مطمئن شد که پیش‌بینی کننده اسمیت حتی با وجود خطا، همواره نقش مثبتی داشته و عملکرد سیستم را بهبود می‌دهد. در ادامه کار می‌توان اثر همزمان خطای مدلسازی و زمان تأخیر را بر پایداری و عملکرد سیستم در نظر گرفت. با توجه به اینکه در ساختار ارائه شده، زمان تأخیر کانال توسط یک فیلتر پیش‌بینی می‌شود، حساسیت سیستم نسبت به تغییرات زمانی تأخیر کاهش پیدا کرده است. در شبیه‌سازی ترکیب جدید به دلیل پیش‌بینی زمان تأخیر خطای حالت دائم در پاسخ به‌طور کامل از بین رفته است. در این روش زمان تأخیر سیستم به