طراحی الگوریتم NMPC برون-خط توسط روش سری مودال توسعه­یافته

**چکیده: در این مقاله رویکردی جدید برای کنترل مدل پیش بین غیرخطی (NMPC) برون-خط سیستم­های غیرخطی پیوسته در زمان با ورودی افاین ارائه می­شود. در این رویکرد، مسأله مقدارمرزی دونقطه­ایغیرخطی در هر گام NMPC، حاصل از اصل حداکثریابی پونتریاگین، توسط روش سری مودال تعمیم­یافته حل می­گردد. قانون کنترل زیربهینه حاصل به طور صریح به شرایط اولیه وابسته است و در لحظه­های نمونه­گیری بعدیِ NMPC با جایگذاری حالت جدید اندازه­گیری شده به عنوان شرایط اولیه جدید، به روز می­شود. از آنجا که قابلیت اجرایMPC عموماً توسط محاسبات بهینه­سازی بر-خط در هر گام MPC محدود می­شود، ما در این مقاله رویکرد جدیدی را برای NMPC معرفی می­کنیم که نه تنها در آن بار محاسباتی حاصل از بهینه­سازی بر-خط به شکل چشم­گیری کاهش می­یابد، بلکه همچنین قابلیت پیاده­سازی با یک افق پیش­بین کوچک برای سیستم­های دارای دینامیک سریع را نیز دارد. یک الگوریتم نیز برای تخمین مرتبه سری مودال در قانون کنترل زیر بهینه تقریب زده شده به گونه­ای ارائه می­شود که شدنی بودن مسأله بهینه­سازی تضمین گردد. با استفاده از یک مثال قابلیت اجرا و اثربخشی روش مطرح شده نشان داده خواهد شد.**

­کلید واژه: اصل حداکثریابی پونتریاگین، روش سری مودال تعمیم­یافته، کنترل مدل پیش­بین غیرخطی، مسأله مقدار مرزی دونقطه­ای.

سمانه سادات سجادی1، علی کریم­پور2، ناصر پریز2 و امین جاجرمی3

1دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده فنی مهندسی، گروه برق sssajjadi@gmail,com

2دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه برق، آزمایشگاه هایبرید و غیرخطی

3دانشگاه بجنورد، دانشکده برق

1. **مقدمه**

کنترل مدل پیش­بین[[1]](#footnote-1) (MPC) که کنترل افق پس­رفت[[2]](#footnote-2) (RHC) و یا کنترل افق متحرک[[3]](#footnote-3) (MHC) نیز نامیده می­شود، به عنوان یکی از موضوعات برجسته تحقیقاتی در علم کنترل در دو دهه اخیر مطرح بوده است. MPC استاندارد مسأله کنترل بهینه بر-خط[[4]](#footnote-4)(OCPs) در هر لحظه نمونه­گیری را حل کرده و یک مسیر ورودی بهینه را تعریف می­کند. سپس این ورودی بهینه حلقه باز حاصل تا لحظه نمونه­گیری بعدی- لحظه­ای که بهینه­سازی باید تکرار شود- به سیستم اعمال می­گردد]2و1[. بنابراین محبوبیت MPC ناشی از این حقیقت است که در آن کنترل از طریق بهینه­سازی پیرامون یک افق محدود به دست می­آید ]3[. اکثر کارهای تحقیقاتی و نتایج بدست آمده روی MPC، بر اساس مدل­های دینامیکی خطی و یا خطی شده بنا نهاده شده­اند ]4[. فرض خطی بودن، بار محاسبات بر-خط در روش­های برنامه­ریزی غیرخطی را به طور چشم­گیری کاهش می­دهد ]6و5[. این در حالی است که در کاربردهای عملی دنیای واقعی، تقریباً تمام فرآیندها ذاتاً غیرخطی هستند. علاوه بر این، بار زیاد محاسبات بر-خط در MPC ها، کاربرد آنها را به فرآیندهای دینامیکی کند محدود کرده است. در سال­های اخیر تحقیقات گسترده­ای روی کاهش بار محاسباتی کنترل­کننده­های مدل پیش­بین غیرخطی (NMPC)، به خصوص برای سیستم­هایی با دینامیک سریع انجام شده است ]8و7[.

در سال­های اخیر روش جدیدی به نام روش سری مودال در زمینه تحلیل سیستم­های غیرخطی معرفی شده است ]11-9[. در این روش حل سیستم­های غیرخطی خودگردان[[5]](#footnote-5) بر حسب مُدهای اساسی و مُدهای تداخلی سیستم به دست می­آید. از دیدگاه فیزیکی این روش ایده خوبی را جهت تحلیل رفتار سیستم ارائه می­دهد. در ]10[ روش سری مودال تعمیم یافته[[6]](#footnote-6) (EMSM) برای حل مسأله کنترل بهینه (OCP) غیرخطی با افق زمانی متناهی در سیستم­های غیرخطی با ورودی افاین پیشنهاد شده است. از دیدگاه محاسباتی در مقایسه با سایر رویکردهای تحلیلی، EMSM در حل مسائل بهینه­سازی غیرخطی مربوط به NMPC می­تواند کارآمدتر عمل کند. برای مثال روش معادله ریکاتی وابسته به حالت[[7]](#footnote-7)(SDRE) یا روش دنباله تقریبی معادلات ریکاتی[[8]](#footnote-8)(ASREs) به ترتیب بر پایه حل دنباله­ای از معادلات جبری ریکاتی ماتریسی یا حل دنباله­ای از معادلات دیفرانسیل ریکاتی ماتریسی متغیر با زمان بنا نهاده شده­اند. در حالی که EMSM قانون کنترل بهینه را بر اساس حل دنباله­ای از معادلات دیفرانسل معمولی خطی نامتغیر با زمان ارایه می­دهد.

در این مقاله رویکرد جدیدی برای طراحی یک NMPC صریح برون-خط برای سیستم غیرخطی پیوسته در زمان با ورودی افاین، بر اساس EMSM ارائه می­شود. مسأله مقدار مرزی دو نقطه­ای در NMPC، ناشی از اصل حداکثریابی پونتریاگین، با استفاده از EMSM حل می­گردد. قانون کنترلی حاصل فرم بسته[[9]](#footnote-9) صریحی به شکل سری همگرای یکنواخت دارد که صریحاً به شرایط اولیه وابسته است. قانون کنترل در هر لحظه نمونه­گیری با جایگذاری حالت اندازه گرفته شده جدید به جای شرایط اولیه به روز می­شود و بنابراین هیچ نیازی به تکرار فرآیند برگشتی بهینه­سازی بر-خط در هر لحظه نمونه­گیری در NMPC وجود ندارد. از آنجا که پیاده­سازی NMPC های بر-خط در کاربردهای عملی نیازمند محاسبات بالایی است، هدف این مقاله این است که یک NMPC با تقاضای محاسباتی بسیار کم که بیشتر محاسبات آن به صورت برون-خط انجام شود ارائه نماید. مزیت این رویکرد در این است که یک قانون کنترل پایدارساز از طریق حل دنباله­ای از مسائل مقدار مرزی دونقطه­ای نامتغیر با زمان خطی ارائه می­دهد. این قانون کنترلی پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته را مستقل از طول افق پیش­بین تضمین کرده و بنابراین این روش قابل پیاده­سازی به سیستم­های دینامیکی سریع با طول افق پیش­بین کوچک می­باشد. از آنجا که در این رویکرد هیچ نیازی به محاسبات بر-خط نیست، بار محاسبات به طور چشم­گیری کاهش یافته و در مقایسه با رویکرد NMPC بر-خط ارائه شده در ]15[ زمان CPU بسیار کمتری نیاز دارد. بنابراین مزیت اصلی این روش جذابیت محاسباتی آن است. در مقایسه با رویکردهای دیگر صریح NMPC مانند رویکردmpLP برای تابعی هدف PWA، رویکرد mpQP برای تابعی هدف درجه دوم و رویکرد SOS برای نمایش سیستم به صورت PPV، روش پیشنهادی از یافتن چندوجهی­ها و توابع افاین مربوطه، یا حل LMI ها برای یافتن مجموعه­های نامتغیر آشیانه­ای و قوانین کنترلی صریح مربوطه دوری می­کند. بنابراین در روش ارائه شده مسأله افزایش نمایی تعداد چند وجهی­ها و مجموعه­های آشیانه­ای که به دلیل افزایش اندازه مسأله بهینه­سازی در سیستم­های مرتبه بالا اتفاق می­افتد و ایراد بزرگ روش­های قبلی است، برطرف می­گردد. از آنجا که در رویکرد پیشنهادی برای حل مسأله مقدار مرزی دو نقطه­ای در NMPC تنها به حل دنباله­ای از معادلات دیفرانسیل معمولی خطی نیاز است، این رویکرد از دیدگاه پیچیدگی­های محاسباتی بسیار کاربردی­تر از روش­های تقریبی SDRE ]13[ و ASRE ]14[ می­باشد

1. **بیان صورت مسأله**

در این مقاله سیستم دینامیکی غیرخطی با ورودی افاین با دینامیک زیر در نظر گرفته می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

 و  به ترتیب بردارهای حالت و کنترل هستند.  یک تابع برداری غیرخطی هموار است که  و بنابراین  نقطه تعادل سیستم است.  یک نگاشت غیرخطی هموار و  بردار حالت اولیه معین و معلوم هستند. هدف مسأله تنظیم­کننده غیرخطی یافتن قانون کنترل  برای سیستم غیرخطی به گونه­ای است که تابعی هدف درجه دوم زیر حداقل شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

 و  به ترتیب ماتریس­های نیمه-معین مثبت[[10]](#footnote-10) و معین مثبت[[11]](#footnote-11) هستند.

* 1. **ایده اصلی MPC**

MPC مسأله تنظیم­کننده غیرخطی را جهت یافتن ورودی کنترلی بهینه با توجه به تابعی عملکرد درجه دوم حل می­کند. در این روش کنترلی مسأله کنترل بهینه شروع­شده از حالت اندازه گرفته شده جاری[[12]](#footnote-12) از طریق محاسبات بر-خط به صورت تکرار شونده حل می­شود. به عبارتی کنترل در زمان  و حالت اولیه  از حل بر-خط مسأله کنترل بهینه زیر حول بازه  (در فاصله یک افق پیش­بینی) به دست می­آید.

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |
| (4) |  |
| (5) |  |

با حل مسأله کنترل بهینه - در هر لحظه نمونه­گیری ، ورودی حلقه باز  که قسمت اول سیگنال کنترل بهینه  است به سیستم تا لحظه نمونه­گیری بعدی  که  اعمال می­شود.  زمان نمونه­گیری[[13]](#footnote-13) و  افق پیش­بین متناهی را نشان می­دهند.  مسیر حالت شروع شده از حالت  در زمان  و کنترل شده توسط ورودی  است. شرایط اولیه  بیان می­کند که مسأله کنترل بهینه - با حالت سیستم واقعی یعنی  در زمان واقعی  مقدار دهی اولیه می­شود. در این مقاله از رویکرد NMPC با افق شبه-نامتناهی ]15[ برای محاسبه برون-خط ناحیه نهایی و ماتریس متقارن و مثبت معین جریمه نهایی  استفاده می­شود. در این روش هزینه نهایی  به شکل تابع درجه دوم  می­باشد.

1. **استراتژی NMPC برون-خط با استفاده از EMSM**

بر اساس اصل حداکثریابی پونتریاگین، شرایط بهینگی برای حل مسأله کنترل بهینه افق متناهی حلقه باز - در MPC از مسأله مقدار مرزی دو نقطه­ای (TPBVP) غیرخطی زیر به دست می­آید.

|  |  |
| --- | --- |
| (6) |  |

که  بردار کمک حالت[[14]](#footnote-14) و  درایه ام بردار حالت  هستند. قانون کنترل بهینه با رابطه زیر داده می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (7) |  |

متأسفانه مسأله یک TPBVP غیرخطی است که به جز در چند مورد ساده نمی­تواند به طور کلی به صورت تحلیلی حل شود. در این مقاله از EMSM برای حل مسأله استفاده و یک الگوریتم MPC غیرخطی برون-خط پایدارساز با قیود حالت و هزینه نهایی درجه دوم طراحی می­شود. به این منظور، ابتدا  و  به صورت زیر تعریف می­گردد.

|  |  |
| --- | --- |
| (8) |  |

از آنجا که  و  توابع تحلیلی هستند،  و  نیز توابع برداری تحلیلی غیرخطی می­باشند. بر اساس تعریف مسأله می­تواند به شکل فشرده زیر بازنویسی شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (9) |  |

در حالتی­که  و  چند جمله­ای نباشند، بسط تیلور آنها حول نقطه تعادل  منجر به معادلات زیر می­گردد.

|  |  |
| --- | --- |
| (10) |  |

ضرایب به صورت زیر تعریف می­گردند.

|  |  |
| --- | --- |
| (11) |  |

 و  به ترتیب مؤلفه­های ام توابع برداری  و  هستند.

با استفاده از قضیه 3.1 در ]10[، حل مسأله مقدار مرزی دو نقطه­ای غیرخطی می­تواند به صورت سری­های  و  بیان شود که در آن  و  برای  از حل بازگشتی[[15]](#footnote-15) دنباله­ای از مسائل مقدار مرزی دو نقطه­ای نامتغیر با زمان خطی زیر تعریف می­شوند.

|  |  |
| --- | --- |
| (12) |  |
| (13) |  |
|  |  |

نکته قابل توجه اینکه یک دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی نامتغیر با زمان خطی همگن می­باشد و از حل آن  و  به سادگی به دست می­آیند. فرض کنید در گام اول،  و  با حل به دست آمده­اند، آنگاه  و  می­توانند در گام دوم با حل دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی نامتغیر با زمان خطی غیرهمگن به دست آیند. توجه کنید که جملات غیرهمگن در تنها با استفاده از پاسخ­های دستگاه معادلات محاسبه می­شوند. با ادامه این روند، در گام ام  و  برای  تنها با حل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی نامتغیر با زمان خطی غیرهمگن به سادگی قابل محاسبه هستند. علاوه بر این در هر گام جملات غیرهمگن تنها با استفاده از اطلاعات به دست آمده در گام­های قبلی محاسبه می­شوند. بنابراین دنباله مذکور به راحتی و طی یک فرآیند بازگشتی قابل حل است.

شرایط مرزی در به صورت  و  هستند.

|  |  |
| --- | --- |
| (14) |  |

بر اساس مطالب بیان شده فوق نتایج زیر قابل بیان است:

نتیجه 1: برای مسأله کنترل بهینه غیرخطی -، قانون کنترل بهینه به صورت زیر قابل بیان است:

|  |  |
| --- | --- |
| (15) |  |

که در آن جملات مرتبه ام  و  برای  تنها از حل بازگشتی دنباله مسائل مقدار مرزی دو نقطه­ای نامتغیر با زمان خطی و با شرایط مرزی به دست می­آیند. قضیه 1 در ادامه نشان می­دهد که سری به طور یکنواخت به حل بهینه همگراست.

قضیه 1: ]10[ دنباله­های ،  و  را به صورت زیر در نظر بگیرید:

|  |  |
| --- | --- |
| (16) |  |

آنگاه برای مسأله کنترل بهینه غیرخطی -، دنباله­های  و  به ترتیب به مسیر حالت بهینه حلقه باز و به قانون کنترل بهینه به طور یکنواخت همگرا هستند.

1. **حل تقریبی و شدنی بودن مسأله بهینه­سازی**

حل مسأله مقدار مرزی دو نقطه­ای غیرخطی توسط EMSM، شامل سری­های نامحدود  و  می­باشد. در نتیجه به دست آوردن قانون کنترل بهینه­ای مشابه تقریبا غیر ممکن است. برای کاربردهای عملی، با جایگذاری عدد صحیح محدود و مثبت  به جای در سری­های نامحدود، حل تقریبی مرتبه ام به شکل زیر به دست می­آید.

|  |  |
| --- | --- |
| (17) |  |

از آنجا که در MPC با هر اندازه­گیری حالت جدید  مسأله بهینه­سازی - به صورت تکرار شونده حل می­شود، شدنی بودن مسأله در هر زمان  ضروری است. شدنی بودن مسأله بهینه­سازی به این معنی است که حداقل یک ورودی (نه لزوماً بهینه)  وجود داشته باشد به گونه­ای که مسیر حالت سیستم قید نامساوی نهایی را برآورده کرده و تابعی هدف درجه دوم محدود شود ]15[. در حقیقت حل تقریبی مرتبه ام و قانون کنترل زیربهینه مرتبه ام مربوطه به صورت زیر

|  |  |
| --- | --- |
| (18) |  |

باید به گونه­ای یافت شود که NMPC شدنی باشد. لازم به ذکر است که  قانون کنترلی را نشان می­دهد که از حل مسأله کنترل بهینه - با استفاده از EMSM مرتبهام به دست می­آید. علاوه بر تضمین شدنی بودن مسأله بهینه­سازی، پایداری سیستم حلقه بسته کنترل شده توسط قانون کنترلی زیربهینه نیز باید تضمین شود. در این بخش ابتدا دامنه اعتبار برای یک  داده شده معرفی و سپس  به گونه­ای یافت می­شود که شرایط شدنی بودن برآورده گردد. در نهایت به کمک نتایج به دست آمده نشان داده می­شود که قانون کنترلی زیربهینه مرتبه ام، پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین می­کند.

* 1. **شدنی بودن مسأله بهینه­سازی**

در مرجع {خودم} برای شدنی بودن مسأله بهینه­سازی - با قانون کنترلی ، یک شرط کافی برای هر  فرض شده و نشان داده شده که اگر شرایط شدنی بودن برآورده شود،  یک مجموعه نامتغیر برای سیستم حلقه بسته است.

لم 1 ]16[: اگر برای هر  و برای یک زمان نمونه­گیری به اندازه کافی کوچک ، مسأله کنترل بهینه حلقه باز - با قانون کنترل زیربهینه مرتبه ام  در زمان  شدنی باشد، آنگاه برای همه زمان­های  شدنی است.

نتیجه 2: از لم 1 نتیجه می­شود که ، مرتبه قانون کنترل زیربهینه ، باید به گونه­ای انتخاب شود که مسأله کنترل بهینه حلقه باز - با افق پیش­بین متناهی  و حل شده توسط EMSM، در  شدنی باشد. علاوه بر این در این روش نیازی نیست که  به عنوان یک پارامتر تنظیم[[16]](#footnote-16) در نظر گرفته شود. برای فرآیندهای سریع کافی است که  یک مقدار به اندازه کافی کوچک باشد.

1. **الگوریتم NMPC برون-خط**

در این بخش یک رویکرد NMPC برون-خط با قانون کنترل زیربهینه صریح و تقاضای محاسباتی کم در قالب الگوریتم زیر ارایه می­شود.

الگوریتم1: طراحی NMPC برون-خط

بهینه­سازی برون-خط و قانون کنترل زیربهینه مرتبه ام صریح :

گام 1-0:  را به عنوان زمان شبیه­سازی در نظر گرفته و قرار دهید ، ،  و .

گام 2-0: جملات مرتبه ام  و  را از حل دنباله مسائل مقدارمرزی دو نقطه­ای خطی نامتغیر با زمان به دست آمده از EMSM محاسبه کنید.

گام 3-0: قرار دهید  و از قانون کنترل زیربهینه مرتبه ام  را به دست آورید. سپس آنرا در بازه زمانی  به سیستم غیرخطی اعمال کرده و حالت نهایی  را محاسبه کنید.

گام 4-0: اگر قید ناحیه نهایی  برقرار است به گام 1-1 بروید، در غیر اینصورت به اندیس  یک واحد افزوده () و به گام 2-0 بروید.

NMPC با قانون کنترل زیربهینه مرتبه ام صریح :

گام 1-1:  را در بازه زمانی  به عنوان قانون کنترل زیربهینه در نظر گرفته و آنرا به سیستم غیرخطی در بازه زمانی  اعمال کنید.

گام 2-1: لحظه نمونه­گیری بعدی را  قرار داده و حالت جاری  را اندازه بگیرید (نمونه­گیری حالت).

گام 3-1: قانون کنترلی  را با جایگزینی شرایط اولیه با  به روز کرده، و آن را برای بازه زمانی  در نظر بگیرید.

گام 4-1:  را در بازه زمانی  به سیستم غیرخطی اعمال کنید.

گام 5-1: اگر  الگوریتم را متوقف سازید، در غیر اینصورت به گام 2-1 بروید. □

لازم به ذکر است که ناحیه نهایی  و ماتریس جریمه نهایی  برای مسأله کنترل بهینه حلقه باز -، از روش افق شبه-نامتناهی محاسبه می­شوند.

قضیه 2 ]16[: فرض کنید که مسأله کنترل بهینه حلقه باز - با قانون کنترل زیربهینه مرتبه ام  در زمان  شدنی است. برای هر  و برای یک زمان نمونه­گیری به اندازه کافی کوچک ، رویکرد NMPC برون-خط ارائه شده در قالب الگوریتم 1 سیستم حلقه بسته  را به صورت مجانبی پایدار می­کند.

1. **مثال عددی**

در این بخش با استفاده از یک مثال عددی، به بررسی قابلیت و کارایی روش پیشنهادی پرداخته می­شود.

مثال 8-1: در این مثال اسیلاتور غیرخطی دو بعدی زیر در نظر گرفته شده است:

|  |  |
| --- | --- |
| (19) |  |

ماتریس­های وزنی به صورت  و  هستند. از روش NMPC با افق شبه-نامتناهی ناحیه نهایی مثبت نامتغیر  است. افق پیش­بین  و زمان نمونه­گیری  در نظر گرفته می­شوند. شرایط اولیه  و  هستند. ورودی کنترلی زیربهینه مرتبه دوم به شکل رابطه زیر باعث می­شود که مسیرهای حالت حلقه بسته با شروع از شرایط اولیه  و  در انتهای افق پیش­بینِ  وارد ناحیه نهایی  شده و در نتیجه شدنی بودن مسأله بهینه­سازی NMPC توسط این ورودی تضمین گردد.

|  |  |
| --- | --- |
| (20) |  |

 و  به ترتیب المان­های ام بردارهای  و  هستند و از حل دنباله­ای از مسائل TPBVP نامتغیر با زمان خطی به دست می­آیند. شکل 1 نتایج حاصل از شبیه­سازی را در یک زمان شبیه­سازی  ثانیه برای هر دو رویکرد NMPC برون­خطِ پیشنهادی بر مبنای EMSM و رویکرد NMPC برخطِ بر مبنای افق شبه-نامتناهی [15]، نشان می­دهد. برای حل TPBVP در رویکرد NMPC برخط از روش کولوکیشن استفاده شده است. مشاهده می­شود که مسیرهای حالت در رویکرد NMPC برون­خطِ پیشنهادی در این رساله با ورودی کنترلی زیربهینه مرتبه دوم ، سریعتر از رویکرد NMPC برخط به نقطه تعادل نزدیک می­شوند. به عبارتی نرخ همگرایی NMPC برون­خط سریع­تر است. علاوه بر این محاسبات بهینه­سازی برخط در روش NMPC برخط  ثانیه از زمان CPU طول می­کشد، در حالی که برای یک افق پیش­بین یکسان، NMPC برون­خطِ پیشنهادی در زمان CPU به مراتب کمتری (حدود  ثانیه) اجرا می­شود. همانطور که اشاره شد در رویکرد پیشنهادی به دلیل اینکه هیچ نیازی به محاسبات برخط در هر لحظه نمونه­گیری نمی­باشد زمان اجرای NMPC، مستقل از طول افق پیش­بین، به مراتب کمتر است.

figurefive.tif

شکل 1: مقایسه مسیرهای حالت حلقه بسته و ورودی­ها در دو رویکرد NMPC: رویکرد برون­خط (نمودار پیوسته) و رویکرد برخط(نمودار نقطه­ای)، با شرایط اولیه  و .

1. **جمع­بندی و پیشنهادات**

در این مقاله یک رویکرد NMPC برون-خط توسط EMSM برای سیستم­های غیرخطی پیوسته در زمان با ورودی افاین پیشنهاد شده است. مزیت روش پیشنهادی در این است که یک قانون کنترل صریح پایدارساز را از طریق حل دنباله­ای از دنباله­ای از مسائل مقدار مرزی دونقطه­ای نامتغیر با زمان خطی ارائه می­دهد. از آنجا که در این رویکرد هیچ نیازی به محاسبات بر-خط نیست، بار محاسبات به طور چشم­گیری کاهش یافته و در مقایسه با رویکرد NMPC بر-خط ارائه شده در ]15[ زمان CPU بسیار کمتری نیاز دارد. بنابراین مزیت اصلی این روش جذابیت محاسباتی آن است. در این مقاله، هیچ عدم تطابق مدل[[17]](#footnote-17) و هیچ اغتشاشی در نظر گرفته نشده است و همه حالت­های در NMPC مستقیم اندازه­گیری می­شوند. تحقیقات آینده می­توانند روی گسترش روش سری مودال برای طراحی یک NMPC برون-خط مقاوم برای فرآیندهایی با اغتشاش­های محدود، تمرکز کنند. پیاده­سازی NMPC برای سیستم­های غیرخطی دارای تأخیر زمانی نیز می­تواند به عنوان زمینه تحقیقاتی دیگری در نظر گرفته شود.

مراجع

1. Michalska, H., Mayne, D.Q.: Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems. IEEE Trans. Autom. Control 38, 1623–1633 (1993)
2. Rawlings, J.B., Mayne, D.Q.: Model Predictive Control: Theory and Design. Nob Hill Publishing, Madison, WI, USA (2009)
3. Yoo, H.W., Lee, Y.S., Han, S.: Constrained receding horizon controls for nonlinear time-delay systems. Nonlinear Dyn. 69, 149–158 (2012)
4. Mayne, D.Q., Rawlings, J.B., Rao, C.V., Scokaert, P.O.M.: Constrained model predictive control: Stability and optimality. Automatica 36, 789–814, (2000)
5. Allgöwer, F., Badgwell, T.A., Qin, J.S., Rawlings, J.B., Wright, S.J.: Nonlinear predictive control and moving horizon estimation an introductory overview. In: Frank, P.M. (eds.) Advances in Control, Highlights of ECC99, pp. 391–449. Springer, Berlin (1999)
6. Magni, L., De Nicolao, G., Magnani, L., Scattolini, R.: A stabilizing model-based predictive control for nonlinear systems. Automatica 37, 1351–1362 (2001)
7. Diehl, M., Ferreau, H.J., Haverbeke, N.,: Efficient numerical methods for nonlinear MPC and moving horizon estimation. In: Magni, L., Raimondo, D., Allgöwer, F., (eds.) Nonlinear model predictive control, Lecture Notes in Control and Information Sciences, pp. 391–417. Springer, Heidelberg (2009)
8. Ellis, M., Heidarinejad, M., Christofides, P.D.: Economic model predictive control of nonlinear singularly perturbed systems. J. Process Control 23, 743–754 (2013)
9. Khatibi, M., Shanechi, H.M.: Using modal series to analyze the transient response of oscillators. Int. J. Circuit Theory Appl. 39, 127–134 (2011)
10. Jajarmi, A., Pariz, N., Kamyad, A.V., Effati, S.: A novel modal series representation approach to solve a class of nonlinear optimal control problems. Int. J. Innovative Comput. Inform. Control 7, 1413–1425 (2011)
11. Jajarmi, A., Pariz, N., Effati, S., Kamyad, A.V.: Solving infinite horizon nonlinear optimal control problems using an extended modal series method. J. Zhejiang Univ. Sc. C (Comput & Electron). 12, 667–677 (2011)
12. A. Jajarmi, Pariz, N., Effati, S., Kamyad, A.V.: Infinite horizon optimal control for nonlinear interconnected large-scale dynamical systems with an application to optimal attitude control. Asian J. Control 14, 1239–1250 (2012)
13. Çimen, T.: State-dependent Riccati equation (SDRE) control: A survey. In: Proceedings of the 17th IFAC World Congress, Seoul, South Korea, pp. 3761–3775 (2008)
14. Banks, S. P., Dinesh, K.: Approximate optimal control and stability of nonlinear finite- and infinite-dimensional systems. Ann. Oper. Res. 98, 19–44 (2000)
15. Chen, H., Allgӧwer, F.: A quasi-infinite horizon nonlinear model predictive control scheme with guaranteed stability. Automatica 34, 1205–1218 (1998)
16. Samaneh Sadat Sajjadi, Naser Pariz, Ali karimpour, Amin Jajarmi “An off-line NMPC strategy for continuous-time nonlinear systems using an extended modal series method”, Springer, Nonlinear Dynamics, Volume 78, Issue 4, pp 2651-2674.

1. Model Predictive Control [↑](#footnote-ref-1)
2. Receding Horizon Control [↑](#footnote-ref-2)
3. Moving Horizon Control [↑](#footnote-ref-3)
4. Optimal Control Problems [↑](#footnote-ref-4)
5. Autonomous [↑](#footnote-ref-5)
6. Extended Modal Series Method [↑](#footnote-ref-6)
7. State-Dependent Riccati Equation [↑](#footnote-ref-7)
8. Approximate Sequence of Riccati Equations [↑](#footnote-ref-8)
9. Closed-form [↑](#footnote-ref-9)
10. Positive semi-definite [↑](#footnote-ref-10)
11. Positive definite [↑](#footnote-ref-11)
12. Current measured state [↑](#footnote-ref-12)
13. Sampling time [↑](#footnote-ref-13)
14. Co-state [↑](#footnote-ref-14)
15. Recursively solving [↑](#footnote-ref-15)
16. Tuning parameter [↑](#footnote-ref-16)
17. Model mismatch [↑](#footnote-ref-17)