



کنترل راه رفتن ربات نائو بر اساس کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل

حدیثه نصیری¹، حمید قدیری^{2*}، محمدرضا جاهد مطلق³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین

2- استادیار، مهندسی برق کنترل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین

3- دانشیار، مهندسی برق کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* قزوین، 3416636452، h.ghadiri@qiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 مهر 1395

پذیرش: 23 آبان 1395

ارائه در سایت: 26 دی 1395

کلید واژگان:

ربات انسان نمای نائو

شناسایی سیستم

کنترل پیش بین مبتنی بر مدل

ردیابی مسیر

چکیده

در این مقاله یک کنترل کننده بر اساس کنترل پیش بین برای هدایت و کنترل ربات دوپای نائو پیشنهاد شده است. یکی از چالش های موجود بر سر راه اعمال عملی این نوع کنترل کننده ها بار محاسباتی آن ها و زمان بر بودن عملیات کنترلی آن در هر گام زمانی می باشد، که به منظور کاهش بار محاسباتی کنترل کننده پیش بین، استفاده از توابع لاگر پیشنهاد شده است. در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش های مرسوم شناسایی با استفاده از داده های واقعی به دست آمده از ربات نائو موجود در مرکز تحقیقات مکترونیک دانشگاه آزاد قزوین، یک مدل مناسب برای راه رفتن ربات نائو که به صورت یک حرکت دوبعدی در صفحه در نظر گرفته شده است، پیشنهاد می شود. سپس با استفاده از کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل به طراحی کنترل کننده برای حرکت ربات پرداخته خواهد شد. هدف از این رویکرد کنترلی، در گام نخست پایداری سازی راه رفتن ربات و پس از آن، هدایت ربات و سپس حفظ آن بر روی مسیر مطلوب مورد نظر است، به طوری که تا جایی که امکان دارد این ردیابی مسیر به خوبی انجام شود. علاوه بر این به منظور ارزیابی کارایی کنترل کننده پیشنهادی، این کنترل کننده را با کنترل کننده تناسبی، مشتق گیر و انتگرالی مقایسه کرده و به بررسی آن پرداخته خواهد شد. نتایج شبیه سازی، مؤثر بودن عملکرد کنترلی پیشنهادی را در ردیابی مسیر ربات نشان می دهد، که در انتها مقایسه ی نتایج حاصل از هر دو رویکرد کنترلی، گویای کارایی و قابلیت های متعدد روش پیشنهادی در این پژوهش می باشد.

Control of nao robot walking on the basis of model-based predictive controller

Hadiseh Nasiri¹, Hamid Ghadiri^{2*}, Mohammad Reza Jahed-Motlagh³

1,2- Department of Electrical, Biomedical and Mechatronics Engineering, Qazvin

Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

3- Computer Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 3416636452, Qazvin, Iran h.ghadiri@qiau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 16 October 2016

Accepted 13 November 2016

Available Online 15 January 2017

Keywords:

Nao Humanoid Robot

System identification

Model based Predictive Control

Trajectory tracking

ABSTRACT

In this paper a controller has been presented based on the predictive control to drive and control the bipedal Nao robot. One of the challenges in the practical application of these types of controllers is their high computational loading and the time-consuming control operations in each time step, in which it is suggested to use Laguerre Functions to reduce the computational loading of the predictive controller. In this study, first using the conventional methods for the identification, and via the real data obtained from the Nao robot in Mechatronics Research Center of Qazvin Azad University, a proper model is proposed for walking the Nao robot which is considered as a two-dimensional motion in the plane. Then a controller is designed to control the robot motion using the model based predictive controller. The purpose of this control approach in the first place is to stabilize the walking of the robot and then to guide and keep it on the desired trajectory, so that this trajectory tracking can be performed well, as much as possible. Moreover, in order to evaluate the efficiency of the proposed controller, this controller has been compared with a proportional-integral-derivative controller and will be studied. The simulation results show the effectiveness of the proposed controller performance in the robot trajectory tracking, which by comparing the obtained results from both of the control approaches, indicates the efficiency and different capabilities of the proposed method in this study.

1- مقدمه

تمام تیم ها یکسان بوده و رقابت تنها بر روی کنترل و برنامه ریزی است. ربات نائو ترکیبی از سخت افزار و نرم افزار است و شامل سنسورها، موتورها و نرم افزاری است به نام نائوکی³ که سیستم عامل اختصاص یافته به این ربات است، که بر روی ربات اجرا می شود و امکان کنترل آن را می دهد. این

ربات نائو، ربات دوپای انسان نمایی است با 21 درجه آزادی، ساخت شرکت الدبران¹ فرانسه، که برای مسابقات روبوکاپ در لیگ ربات های استاندارد² طراحی شده است [1]. در این لیگ ربات ها و شرایط مکانیکی آن برای

³ NAOqi¹ Aldebaran² Standard Platform League

Please cite this article using:

H. Nasiri, H. Ghadiri, M. R. Jahed-Motlagh, Control of nao robot walking on the basis of model-based predictive controller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 229-2400, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مسلماً کنترل سیستم راه رفتن ربات به شیوه‌های مرسوم از طریق به دست آوردن معادلات و مدل دقیق آن و تلاش برای بهبود پاسخ امکان پذیر است، اما هزینه‌های محاسباتی گزاف و مشکلاتی را به دلیل توان محدود پردازشگرهای ربات، در کاربرد عملی به ما تحمیل می‌کند. بنابراین سرعت و سادگی محاسبات، اولویت‌های بالاتری دارند و همچنین با توجه به نوع محیط و تغییر سریع با زمان نقطه هدف، برای راهبری مناسب ربات در زمین لازم نیست مدل مورد نظر برای فواصل طولانی به طور کامل با سیستم حرکت ربات تطابق داشته باشد. از نگاه مدل‌سازی داشتن مدل ساده‌ای که حرکت ربات را در بازه‌های کوتاه به خوبی پوشش دهد و در عوض به دلیل سادگی، حجم محاسبات کمتری داشته باشد، توانمندتر خواهد بود. واضح است که سیستم راه رفتن یک ربات انسان‌نما مانند ربات نائو از منظر مفاصل یا فرمان فعال‌سازهای هر مفصل یک سیستم غیرخطی است، ولی در مدل‌سازی برای سادگی محاسبات، آن را به صورت خطی فرض نموده و از میانگین نتایج برای جلوگیری از عدم تطابق میان داده‌ها استفاده شده است.

بنابراین در گام نخست در این تحقیق ابتدا با استفاده از داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده در مرکز تحقیقات دانشگاه آزاد قزوین و با انتخاب یکی از روش‌های مرسوم شناسایی، مدلی مناسب برای راه رفتن ربات نائو که نائوکی نامیده می‌شود، استخراج خواهد شد. سپس سعی خواهد شد با به کارگیری روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل ردیابی مسیرهایی را که ربات در زمین فوتبال طی کند، انجام گیرد. در انتها کنترل کننده تناسبی انتگرالی و مشتق گیر را، به دلیل استفاده گسترده از این کنترل کننده و همچنین سادگی در پیاده‌سازی و کارایی بالا به عنوان یک رویکرد دیگر در نظر گرفته و به مقایسه آن با کنترل پیش بین پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است که مراجع [4-9] از این عملکرد کنترلی برای مقایسه با روش پیشنهادی خود استفاده نموده‌اند. مرجع [10] یک مدل خطی چند جمله‌ای آرمکس⁵ شناسایی شده را برای حرکت ربات نائو پیشنهاد کرده است. در این تحقیق نیز با انتخاب تابع تبدیل (معادله تفاضلی) به عنوان ساختار سیستم و تخمین پارامترهای آن با استفاده از روش حداقل مربعات خطی، مدل دیگری از حرکت ربات نائو استخراج گردیده است که با توجه به نتایج به دست آمده از فاز اعتبارسنجی، مدل استخراج شده قابل اطمینان‌تر و دقیق‌تر می‌باشد، و درصد انطباق مدل، حداقل 5 درصد بهبود وجود داشته است.

روش‌های کنترلی گوناگونی برای کنترل راه رفتن ربات‌های دوبا پیشنهاد شده است، یکی از اولین و شناخته شده‌ترین رویکردها، برای مواجه شدن با مشکلات حرکت ربات دوبا نقطه ممان صفر⁶ نامیده می‌شود[11]. نقطه ZMP نقطه‌ای روی زمین است که در آن برآیند نیروهای وزن و اینرسی برابر صفر است. مفهوم ZMP روی انواع گوناگونی از ربات‌ها از جمله ربات نائو پیاده سازی شده است، که مقاله [2] یک الگوریتم راه رفتن پایدار مبتنی بر نقطه ممان صفر به منظور محاسبه مسیر مرکز جرم ربات و به دست آوردن راه رفتن پایدار و مقاوم برای ربات نائو را پیشنهاد می‌کند. در مرجع [3] با استفاده از کنترل کننده موقعیتی سطح پایین⁷ سرعت، پایداری و کارایی راه رفتن ربات نائو را بهبود بخشیدند. با استفاده از مدل پاندول معکوس و کنترل پیش‌نمایش⁸ یک راه رفتن چند

قالب نائوکی اجازه می‌دهد یک ارتباطی بین ماژول‌های متفاوت (حرکت، صدا، فیلم و غیره) که در آن تعریف شده وجود داشته باشد. ربات نائو از یک مدل دینامیکی ساده (پاندول معکوس خطی¹) و برنامه‌ریزی درجه دوم² برای راه رفتن استفاده می‌کند. همچنین بازخورد از سنسورهای مفصل، باعث می‌شود راه رفتن مقاوم و پایدار نسبت به اغتشاش‌های کوچک داشته باشد. بنابراین به منظور راه رفتن ربات نائو کافی است با استفاده از این نرم‌افزار و انتخاب یکی از توابع که مختص ماژول حرکتی³ ربات است، به این امر دست یافت [2]. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، برای کنترل موقعیت ربات نائو، از یک کنترل کننده سطح پایین⁴ استفاده می‌شود تا با تنظیم مقدار مناسب ولتاژ که به موتور هر مفصل اعمال می‌شود، ربات در هر لحظه در موقعیت دلخواه قرار بگیرد که این کار توسط تنظیم کردن مقادیر ورودی در توابع مختص راه رفتن ربات صورت می‌گیرد [3].

هدف اصلی این تحقیق، در گام اول طراحی یک موتور حرکتی (راه رفتن) برای ربات انسان‌نمای نائو می‌باشد، تا توانایی راه رفتن پایدار را برای ربات ایجاد کند. به راستی حفظ و کنترل ربات بر روی مسیر مطلوب، یکی از اساسی‌ترین اهداف در کنترل حرکت ربات در حین بازی فوتبال است و در گام دوم تمایل بر این است که ربات از نقطه A به نقطه B برسد و در عین حال در یک مسیر دلخواه گام بردارد. از آنجایی که برای کنترل یک سیستم نیاز به مدل آن سیستم است، بنابراین در قدم نخست برای انجام این تحقیق به یافتن مدل حرکت ربات با استفاده از روش‌های مرسوم شناسایی پرداخته خواهد شد، جایی که اطلاعاتی از رابطه‌ی سیستم وجود ندارد و تنها می‌توان از طریق آزمون سیستم با ورودی‌های مختلف و اندازه‌گیری نتایج (خروجی) آن به روش‌های محاسباتی گوناگونی، مدل راه رفتن ربات نائو را استخراج نمود. سپس با مشخص شدن مدل مناسبی از حرکت ربات، به طراحی کنترل کننده با استفاده از روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل برای دستیابی به هدف مورد نظر، پرداخته خواهد شد. از آنجایی که سیستم مورد بررسی یک سیستم چند متغیره، ناپایدار و ورودی‌های سیستم دارای قیود می‌باشند، بنابراین لزوم استفاده از کنترل پیش بین به دلیل توانایی در مواجهه با این گونه مسائل برگزیده شده است. بلوک دیاگرام کلی سیستم کنترلی در شکل 2 نشان داده شده است.

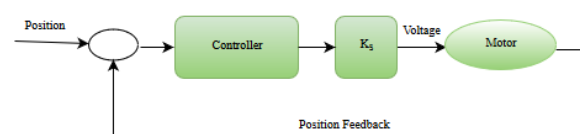


Fig. 1 A block diagram of the low-level positional control used by the Nao

شکل 1 بلوک دیاگرام کنترل موقعیت سطح پایین استفاده شده در ربات نائو

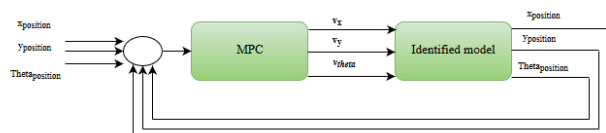


Fig. 2 The block diagram of Nao motion control by using predictive control

شکل 2 نمای بلوکی سیستم کنترل راه رفتن ربات نائو به روش کنترل پیش بین

⁵ Auto Regressive Moving Average (ARMAX)

⁶ Zero moment point (zmp)

⁷ low-level positional controller

⁸ Preview control

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1

¹ Linear inverse pendulum

² Quadratic programming

³ NAOqi Motion

⁴ low-level positional controller

2- مدل سازی راه رفتن ربات نانو

به منظور به دست آوردن مدل راه رفتن ربات، با در نظر گرفتن این نکته، مسیرهایی که لازم است هر کدام از مفاصل ربات برای راه رفتن طی کند و همچنین به دست آوردن روابط ربات در معیارهای پایداری استفاده شده در این نوع راه رفتن، مورد بررسی قرار نگرفته است. حال آن که کل فرایند راه رفتن ربات به شکل یک سیستم واحد در نظر گرفته شده و آنچه که در این تحقیق انجام شده است این است که حرکت (جابه جایی) ربات در صفحه $x-y$ به چه شکل انجام می پذیرد. گام اول در این بخش به منظور شناسایی یک مدل مناسب، انجام آزمایش های مکرر برای دست یابی به دسته ای از داده های ورودی و خروجی از سیستم است. آنچه برای فرمان دادن به ربات نانو در دسترس می باشد، پارامترهایی است در برنامه ای که بر روی ربات اجرا می شود. برای اجرای تابع نرم افزاری⁸ نانوکی می توان از توابع گوناگونی که در مازول مربوط به راه رفتن ربات وجود دارد، استفاده کرد در این میان به دلیل دقت و کارایی بالاتر در این تحقیق، از تابع $\text{SetWalkTargetVelocity}$ استفاده شده است [24]. این تابع شامل 4 آرگومان است: سه آرگومان سرعت (دو سرعت خطی در راستای محور x, y ، و دیگری سرعت زاویه ای حول محور z دستگاه مختصات استاندارد ربات) که اعداد نرمال شده ای بین صفر و یک هستند و یک مشخصه برای فرکانس گام برداشتن. بنابراین با انتخاب یک مقدار سرعت مناسب برای ربات در تابع مربوطه، آن را به حرکت واداشته و موقعیت ربات را در هر لحظه با استفاده از دوربینی که در بالای سر ربات نصب شده است و در مسابقات روبوکاپ در لیگ ربات های فوتبالیست سائز کوچک⁹ استفاده می شود و کلاهی که بر روی سر ربات قرار دارد اندازه گیری می گردد (شکل 3). بنابراین سه پارامتر به عنوان سیگنال خروجی انتخاب می شوند. دو پارامتر اول، موقعیت در راستای محورهای x و y و پارامتر سوم زاویه (میزان چرخش) ربات حول محور z دستگاه مختصاتی آن، یا به عبارت دیگر مقدار زاویه yaw است. بنابراین بردار حاصل از مختصات موقعیت ربات (دو پارامتر اول) در یک بازه زمانی، مشخص کننده مسیر طی شده توسط ربات در صفحه است. سپس در گام دوم یک ساختار¹⁰ یا مدل مناسب را برای سیستم تحت مطالعه انتخاب نموده، و با انتخاب یک روش شناسایی مناسب، که در این تحقیق روش حداقل مربعات خطا می باشد به تخمین پارامترها پرداخته خواهد شد. در گام سوم با ارزیابی¹¹ مدل استخراج شده از درستی و دقت مدل اطمینان حاصل خواهد شد.



Fig. 3 The NAO robot having SSL cap

شکل 3 کلاهک SSL، نصب شده بر روی ربات

جهته¹ مبتنی بر ZMP در مرجع [12] پیشنهاد شده است، که این روش کنترلی برای تولید مسیر مرکز ثقل² اعمال می شود. مرجع [13] یک سیستم کنترلی مشاهده گر را برای راه رفتن دینامیکی ربات دوپا پیشنهاد می کند، این روش پیشنهادی یک کنترل کننده بازخورد را با الگوی پای تولید شده به صورت آنلاین ترکیب می کند تا یک راه رفتن پایدار را ایجاد کند. مرجع [14] یک راه رفتن حلقه بسته مقاوم مبتنی بر مرکز ثقل ربات نانو را معرفی کرده و همچنین یک راه حل تحلیلی برای سینماتیک معکوس ربات نانو ارائه کرده است. در حالی که راه حل های زیادی برای راه رفتن پویا و پایدار وجود دارد، مرجع [15] یک رویکرد جدیدی به منظور راه رفتن پایدار و کارا برای ربات نانو در محیط شبیه ساز ربات های فوتبالیست پیشنهاد می کند. [16] یک شبکه ژنراتور الگوی مرکزی بهینه³ برای کنترل راه رفتن ربات نانو ارائه کرده است، که کنترل کننده CPG سه مفصل از هر پا را در نظر دارد و علاوه بر این استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بدست آوردن پارامترهای بهینه تا حد زیادی پیچیدگی الگوریتم را کاهش داده است. یک کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل پاندول معکوس، با ارائه یک راه حل بهینه سازی شده برای مسائل درجه دوم⁴ در مرجع [17] پیشنهاد گردید. از دیگر موارد استفاده از کنترل پیش بین در کنترل ربات نانو می توان از مرجع [18] نام برد. در این مقاله با استفاده از مدل کارت تبیل⁵ یک مدل دینامیکی برای ربات نانو تخمین زده می شود و سپس از کنترل پیش بین تحت قیود تعریف شده در مسئله به منظور بهبود پایداری استفاده شده است. در [19] برای یک ربات زیردریایی از کنترل پیش بین برای پیش بینی و بی اثر کردن اغتشاشات وارده از امواج اقیانوس استفاده شده است. در [20] از سه الگوریتم متفاوت کنترل پیش بین مبتنی بر مدل غیر خطی برای یک بازوی دولینکی در شبیه سازی تست شده است. متیو و همکاران با استفاده از کنترل پیش بین، راه حلی برای کنترل راه رفتن ربات های دوپای زیرفعال⁶ در حضور اشباع گشتاور محرک ها پیشنهاد کردند [21]. مرجع [22] یک کنترل کننده پیش بین غیرخطی به منظور بالا رفتن از پله برای ربات دوپا با 5 درجه آزادی در حالی که از عرض و پهنای پله اطلاعی ندارد پیشنهاد کرده است در حالی که محدودیت محیط و پایداری در مسئله وجود دارد. مرجع [23] یک راه رفتن دوپا مبتنی بر سه مرکز جرم با مدل حرکت زاویه ای با استفاده از کنترل پیش بین را معرفی کرده است. این رویکرد به دنبال کاهش خطای مدل و کاهش افق نقطه ممان صفر است و همچنین دقت ردیابی نقطه ممان صفر را بهبود بخشیده است.

در ادامه مقاله به صورت زیر تنظیم شده است: در بخش دوم مدل سازی راه رفتن ربات نانو که برای آن کنترل پیش بین طراحی می شود، معرفی خواهد شد. در بخش سوم به فرمول بندی کنترل پیش بین با استفاده از توابع لاگر پرداخته خواهد شد. نتایج شبیه سازی حاصل از شناسایی و مدل استخراج شده و ارزیابی مدل به ترتیب در بخش چهارم، پنجم و ششم مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج شبیه سازی حاصل از اعمال کنترل کننده طراحی شده و کنترل کننده تناسبی انتگرالی و مشتق گیر⁷ و مقایسه انجام شده بین این دو، در بخش هفتم، هشتم و نهم آورده شده است. در پایان در بخش دهم نتیجه گیری حاصل از مقاله ارائه خواهد شد.

¹ Omni directional walking

² Center of mass trajectories

³ optimized central pattern generator(CPG)

⁴ Quadratic problem

⁵ Cart and table model

⁶ Underactuated

⁷ Proportional, integral and derivative (PID)

⁸ Walk Engine

⁹ Small Size League Vision(SSL)

¹⁰ Structure or Model

¹¹ Validation

به طوری که $y(k+i|k)$ نشان دهنده خروجی در لحظه زمانی $k+i$ بر اساس حالت در لحظه زمانی k یعنی $x(k)$ است. بر اساس مدل فضای حالت جدید به دست آمده، بردار متغیر خروجی به فرم ماتریسی (5) نمایش داده می شود:

$$Y = Fx(k_i) + \varphi \Delta U \quad (5)$$

به طوری که:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad \varphi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \dots & CA^{N_p-N_e}B \end{bmatrix} \quad (6)$$

هدف کنترل پیش بین آن است که خروجی پیش بینی شده در لحظه زمانی $k+i$ بر اساس مدل را تا حد ممکن به مقدار مرجع از پیش تعیین شده برساند. فرض کنید که بردار خروجی مرجع به صورت (7) باشد:

$$R_s^T = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}}_{N_p} r(k) \quad (7)$$

و تابع هزینه نیز به صورت رابطه (8) باشد:

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (8)$$

به طوری که بخش اول این تابع هزینه برای کمینه سازی خطا بین خروجی پیش بینی شده و مقدار مرجع است، و بخش دوم برای کمینه سازی حداکثر تلاش در این مسیر می باشد. همچنین R ماتریس وزن روی ورودی است، که ماتریس قطری می باشد. پاسخ بهینه یک دنباله از ورودی هاست اما تنها المان اول از این دنباله به سیستم اعمال می گردد، بنابراین:

$$\Delta U = (\varphi^T \varphi + \bar{R})^{-1} \varphi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i))$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_s = \underbrace{[111 \dots 1]^T}_{N_p} r(k_i) = \bar{R}_s r(k_i) \\ \bar{R}_s = \underbrace{[111 \dots 1]^T}_{N_p} \end{array} \right\} \quad (9)$$

2-3- کنترل پیش بین همراه با قیود

در دنیای واقعی سیستم ها دارای محدودیت یا قیود متعددی هستند. با توجه به این که در سیستم مورد بررسی نیز برای به حرکت درآوردن ربات، انتخاب سرعت در محدوده یک و منهای یک مجاز است و همچنین با توجه به این که تغییر ناگهانی سرعت، ممکن است که منجر به ناپایداری و در نتیجه واژگونی ربات گردد، بنابراین چنین محدودیت هایی در طراحی کنترل کننده باید رعایت گردد. با اضافه شدن قیود و عدم قطعیت ها نقش کنترل پیش بین برجسته می شود. در کنترل پیش بین در هر گام نمونه برداری مسئله بهینه سازی باید به پاسخ بهینه برسد، در نتیجه سرعت انجام محاسبات مسئله بهینه سازی اهمیت ویژه ای دارد. بنابراین با بهره گیری از توابع لاگر می توان تعداد قیود در افق پیش بینی را کاهش داد و در نتیجه از بار محاسبات کاست [26]. محدودیت ها در اندازه و نرخ تغییرات سیگنال کنترلی و محدودیت در خروجی به صورت (10) در نظر گرفته می شود.

$$\begin{aligned} u_{\min} &\leq u(k) \leq u_{\max} \\ \Delta u_{\min} &\leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{\max} \\ y_{\min} &\leq y(k) \leq y_{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

با اضافه نمودن این سه محدودیت به تابع هدف، مسئله کمینه سازی

1-2- شناسایی با استفاده از روش حداقل مربعات خطا

در روش حداقل مربعات این واقعیت در نظر گرفته می شود که هرگونه اندازه گیری از اطلاعات، همراه با خطا و نویز می باشد. از طرفی حتی با فرض بدون خطا بودن اندازه گیری ها، معمولاً ساختار در نظر گرفته شده برای مدل سازی سیستم نیز با واقعیت سیستم اختلاف دارد [25]. اگر مجموعه و برآیند این دو نوع خطا (خطای ناشی از تعریف ساختار و خطای ناشی از اندازه گیری) با سیگنال y_e نشان داده شود، در روش حداقل مربعات هدف این است که، پارامترها طوری تخمین زده شوند، که مجموع مربعات خطا $\sum e_i^2$ حداقل گردد. در مرجع [25] به طور مفصل به این مبحث پرداخته شده است.

3- الگوریتم کنترل پیش بین

در این بخش به معرفی و بیان ریاضی کنترل پیش بین و نحوه بدست آوردن معادلات حاکم بر آن پرداخته می شود. نکته قابل تذکر این که ایده استفاده از توابع لاگر در طراحی کنترل پیش بین اولین بار توسط ونگ در [26] و [27] معرفی شده است.

1-3- فرمول بندی کلی کنترل پیش بین

اساس این روش کنترلی بر حل یک مسئله کنترل بهینه در هر فاصله نمونه برداری استوار است. بدین شکل که ابتدا با استفاده از یک مدل پیش بینی، خروجی های آینده را برای یک افق محدود پیش بینی می کند. و با استفاده از کمینه سازی یک تابع معیار، ورودی های آینده را بر روی افق پیش بین به دست می آورد و تنها عنصر اول از این سری را به عنوان ورودی به سیستم اعمال می کند. در دوره نمونه برداری بعدی یک مسئله کنترل بهینه جدید بر اساس اندازه گیری های جدید فرموله و حل می گردد. این استراتژی که به استراتژی افق کاهنده معروف است به طور تکراری در هر لحظه نمونه برداری اجرا می گردد. در روش های کنترل بهینه بر اساس دینامیک شناخته شده از سیستم و با استفاده از معادلات دینامیک موجود، مقادیر کنترل به گونه ای به دست می آید که یک معیار عملکرد مفروض بهینه گردد. این مبحث و روابط ریاضی مربوطه به طور مفصل در مرجع [26] مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم با معادلات گسسته فضای حالت (1) دارای m ورودی و q خروجی و تعداد حالت های آن برابر n می باشد. هدف آن است که بتوان خطای حالت ماندگار هر یک از خروجی ها را به صفر رساند [26].

$$\begin{aligned} x_m(k+1) &= A_m x_m(k) + B_m u(k) \\ y(k) &= C_m x_m(k) \end{aligned} \quad (1)$$

به طوری که u بردار ورودی کنترلی، y بردار خروجی سیستم و $\Delta x_m(k)$ بردار حالت سیستم را نشان می دهد. برای مرتبط کردن $y(k)$ و $\Delta x_m(k)$ بردار حالت جدید به صورت رابطه (2) تعریف می شود:

$$x(k) = [\Delta x_m(k)^T \quad y(k)^T]^T \quad (2)$$

بعد از تفاضل گیری و ترکیب روابط بالا، فضای حالت جدید به صورت رابطه (3) خواهد بود.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ C_m A_m & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

ماتریس o_m به صورت (4) تعریف می شود:

$$o_m = \begin{bmatrix} n_1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

که رابطه بازگشتی آن به صورت (13) خواهد شد:

$$\begin{aligned} L(k+1) &= A_L L(k) \\ \Gamma_k(z) &= \Gamma_{k-1}(z) \frac{z^{-1} - 1}{1 - az^{-1}} \\ \Gamma_1 &= \frac{\sqrt{1-a^2}}{1-az^{-1}} \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن شرایط اولیه به صورت (14) خواهد بود:

$$L(0)^T = \sqrt{\beta} [1 \quad -a^2 \quad -a^3 \quad \dots \quad (-1)^{N-1} \quad a^{N-1}] \quad (14)$$

ماتریس A_L یک ماتریس $n \times n$ است، که تابع دو پارامتر β, α است. همان قطب توابع و β برحسب α به صورت رابطه (15) قابل تعریف است:

$$\beta = (1 - \alpha^2) \quad (15)$$

4- نتایج شبیه سازی شناسایی مدل در فاز جابه جایی

در این بخش با داشتن دو ورودی (سرعت در جهت های x, y) و دو خروجی (موقعیت ربات در جهت محورهای x, y) ابعاد ماتریس مزبور 2×2 خواهد بود. با شناسایی هر چهار تابع تبدیل ماتریس G به فرم (16) دست می آید:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}, \quad G_{11} = \frac{x}{V_x} \text{ if } V_y = 0 \\ G_{21} &= \frac{y}{V_x} \text{ if } V_y \neq 0, \quad G_{12} = \frac{x}{V_y} \text{ if } V_x = 0 \\ G_{22} &= \frac{y}{V_y} \text{ if } V_x \neq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

همان طور که پیش تر ملاحظه شد، هر بار تنها یک ورودی به سیستم اعمال می شود، بنابراین لازم است هنگام محاسبه هر درایه از ماتریس، ورودی دیگر صفر باشد و چون ورودی ها سرعت هستند، هر بار تنها در یکی از جهت های x و y سرعت خواهیم داشت و ربات تنها دو مسیر، مستقیم (در جهت x) و به پهلو (در جهت y) را خواهد پیمود.

برای انتخاب مناسب بردار مراتب، اندکی آزمون و خطا ما را به مقصد می رساند. هر چند بهره جستن از اطلاعات کلی به عنوان قیودی که باعث می شود تعداد آزمون ها کاسته شود مفید خواهد بود. برای مثال در این جا این واقعیت به عنوان کران بالا برای تست مراتب مختلف در نظر گرفته شده است، که مرتبه سیستم های مکانیکی عموماً کمتر از 3 است.

مطابق جدول های 1 و 2 در میان سه انتخاب موجود برای مراتب توابع تبدیل، پس از آزمون هر سه و مقایسه نتایج آنها نهایتاً تابع تبدیل مرتبه اول انتخاب گردید. زیرا میزان بهبود آنها در تطابق با سیستم افزایش چشمگیری نداشته و به همین دلیل توجیه مناسبی برای افزایش مرتبه سیستم وجود نخواهد داشت.

بنابراین مدل به دست آمده نهایی با استفاده از روش حداقل مربعات خطا برای فاز جابه جایی (راه بری) ربات نانو در قالب چهار تابع تبدیل در جدول 3 و جدول 4 ارائه شده است. ماتریس کواریانس تخمین بیان

جدول 1 مقایسه نتایج هم خوانی توابع تبدیل با مرتبه های یک، دو و سه

Table 1 The comparison of first, second and third order transfer function

زمان نمونه برداری: 0.04 ثانیه		فرکانس ورودی: 1 هرتز		سرعت ربات: 0.8 سانتی متر بر ثانیه	
مدل	G_{21}	G_{11}	مرتبه	درصد انطباق	
1	2	3	1	2	3
89.2%	89.4%	89.9%	96.08%	96.3%	96.5%

پیشیده تر خواهد شد و بنابراین حل آن نمی تواند به وضوح و روشنی حالت بدون قید به دست آید. بنابراین کنترل پیش بین با در نظر گرفتن قیود نیاز به بهینه سازی بلادرنگ با استفاده از مسئله برنامه ریزی درجه دوم¹ دارد که در مرجع [26] به طور کامل به آن پرداخته شده است.

3-3- فرمول بندی دوباره کنترل پیش بین با استفاده از بسط توابع لاگر

یکی از مهم ترین چالش هایی که بر سر راه پیاده سازی عملی کنترل پیش بین وجود دارد و اعمال آن را محدود کرده است، بار محاسباتی برخط² این کنترل کننده می باشد [27]. یکی از روش هایی که برای کاهش حجم محاسباتی کنترل کننده پیش بین استفاده می شود آن است که سیگنال کنترل به صورت تابعی از شرایط اولیه به صورت خارج از خط³ محاسبه شده و در یک جدول مراجعه ای قرار می گیرد، تا کنترل کننده به صورت برخط، با توجه به شرایط اولیه سیستم به این جدول مراجعه نموده و ورودی کنترلی را برای سیستم محاسبه کند. این روش توانسته است در سیستم های کوچک سرعت را تا 100 برابر افزایش دهد [28]. اما در این روش با افزایش پارامترهایی چون افق پیش بینی، افق کنترل، تعداد حالت ها و ورودی ها، تعداد المان های این جدول افزایش می یابد. بنابراین در سیستم های بزرگ اجرای این روش عملی نیست. یکی از رویکردهای بسیار مناسب برای کاهش بار محاسباتی این کنترل کننده استفاده از توابع لاگر در طراحی آن می باشد. با پارامتری کردن دنباله سیگنال کنترل می توان به طور مؤثری تعداد قیود موجود در افق پیش بینی و در نتیجه تعداد پارامترهایی که در هر گام کنترل کننده با آن سرو کار دارد را کاهش داده و بار محاسباتی این کنترل کننده برای سیستم های با ابعاد وسیع و یا دینامیک سریع را کم کرد. علاوه بر این یک عامل کاهش نمای در توابع لاگر وجود دارد که تضمین کننده همگرایی تفاضل سیگنال کنترل به سمت صفر، بعد از یک مدت زمان گذار می باشد. بنابراین در بیشتر موارد می توان تعداد قیود موجود در مسئله کنترل پیش بین را نیز کاهش داد [26].

برای فرمول بندی دوباره ی کنترل پیش بین و ساده سازی پاسخ آن، توابع لاگر جهت بیان مسئله اصلی مورد استفاده قرار می گیرد. علاوه بر این با استفاده از این توابع می توان پارامترهای زیادی که در افق های پیش بینی طولانی وجود دارد را با تعداد کمتری پارامتر جایگزین نمود.

توابع لاگر یک مجموعه از توابع گسسته با پایه ی متعامد هستند که تبدیل z آنها به صورت روابط (11) بیان می شوند:

$$\begin{aligned} \Gamma_1(z) &= \frac{\sqrt{1-a^2}}{1-az^{-1}} \\ \Gamma_1(z) &= \frac{\sqrt{1-a^2}}{1-az^{-1}} \frac{z^{-1}-a}{1-az^{-1}} \\ &\vdots \\ \Gamma_N(z) &= \frac{\sqrt{1-a^2}}{1-az^{-1}} \left(\frac{z^{-1}-a}{1-az^{-1}} \right)^{N-1} \end{aligned} \quad (11)$$

به طوری که پارامتر a قطب توابع لاگر است که به آن فاکتور مقیاس⁴ نیز گفته می شود. برای پایداری باید $-1 \leq a \leq 0$ باشد. با توجه به بخش مشترکی که در همه ترم های توابع لاگر وجود دارد، می توان جملات را به صورت بازگشتی نوشت. فرم زمانی توابع لاگر به صورت (12) است:

$$L(k) = [l_1(k) \quad l_2(k) \quad \dots \quad l_N(k)]^T \quad (12)$$

¹ Quadratic Programming Problem (QP)

² On line

³ Off line

⁴ Scaling factor

استخراج شده در فاز چرخش، در بخش بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین مطابق شکل 4 می‌توان مشاهده نمود که تفاوت بین خروجی واقعی سیستم (موقعیت ربات در x و y) و خروجی حاصل از مدل بسیار ناچیز می‌باشد.

5- نتایج شبیه‌سازی شناسایی مدل در فاز چرخش

در این قسمت هدف این است که چرخش ربات را در قالب یک تابع تبدیل مدل گردد. از آنجایی که به طور کلی در این تحقیق ورودی سرعت و خروجی موقعیت، در نظر گرفته شده است. در این جا نیز مدل گسسته‌ای که سرعت زاویه‌ای (ورودی) را به زاویه ربات (خروجی) بر حسب درجه در هر لحظه مربوط می‌کند مدل چرخش ربات نامیده می‌شود که رابطه (17) این مدل را نشان می‌دهد.

$$\theta = G_{\theta}(q)V_{\theta} \quad (17)$$

بنابراین در این فاز با توجه به نحوه تعریف متغیرها و فرض مستقل بودن کانال‌ها، مدل استخراج شده، تک ورودی-تک خروجی می‌باشد. مدل به‌دست آمده نهایی در قالب یک تابع تبدیل گسسته، در جدول 5 ارائه شده است.

مشابه فاز جابه‌جایی در این قسمت نیز نتایج برای توابع تبدیل با هر سه مرتبه محاسبه گردید و نتایج آن‌ها در جدول 6 مقایسه شد. در این بخش نیز به دلیل تشابه در میزان هم‌خوانی در هر سه مرتبه، در نهایت تابع تبدیل مرتبه اول انتخاب گردید. شکل 6 توانایی مدل شناسایی شده را با خروجی واقعی مقایسه می‌کند به وضوح مشخص است که مدل استخراج شده در فاز چرخش نیز به خوبی مدل در فاز جابه‌جایی می‌باشد.

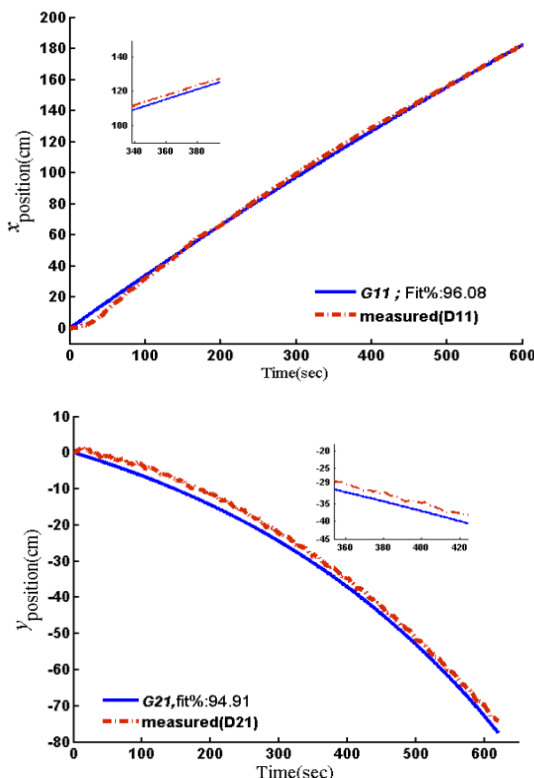


Fig. 4 The Comparison of real and model output in forward path

شکل 4 مقایسه خروجی واقعی و خروجی حاصل از در حرکت رو به جلو

جدول 2 مقایسه نتایج هم‌خوانی توابع تبدیل با مرتبه‌های یک، دو و سه

Table 2 The comparison of first, second and third order

مدل		فرکانس ورودی: 1 هرتز		سرعت ربات: 0.8 سانتی‌متر بر ثانیه		زمان نمونه برداری: 0.04 ثانیه		داده‌های آموزش: 600	
مرتبه		G_{12}		G_{22}					
3		2	1	3	2	1			
درصد انطباق		88%	87.9%	95.7%	95.6%	95.3%			

می‌کند که بردار پارامترهای تخمین زده شده، چقدر قابل اعتماد است. در این خصوص فقط درایه‌های روی قطر اصلی ماتریس کواریانس، بررسی می‌شوند. اگر به درایه‌های قطر اصلی ماتریس کواریانس هر چهار تابع تبدیل در جداول مربوط به هر یک توجه شود، مشاهده می‌گردد که اعداد بسیار کوچکی هستند بنابراین می‌توان ادعا کرد تخمین پارامترها به‌خوبی انجام گرفته است. جدول‌های 3 و 4 به ترتیب مشخصات مدل به‌دست آمده در حرکت مستقیم و به پهلو را نشان می‌دهد که با درصد قابل قبولی با داده‌های واقعی هم‌خوانی دارد و همچنین درایه‌های قطر اصلی ماتریس کواریانس به لحاظ عددی، کوچک می‌باشند. یعنی تخمین پارامترها به‌خوبی انجام شده است.

به‌منظور قابل لمس بودن و حصول اطمینان بیشتر خروجی واقعی با خروجی حاصل از مدل استخراج شده در قالب شکل 4 و شکل 5 مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل 4 مقایسه خروجی حاصل از مدل بدست آمده در حرکت مستقیم را با خروجی واقعی نمایش می‌دهد، به عبارت دیگر در حرکت مستقیم با اعمال سرعت در راستای x با استفاده از تابع تبدیل G_{11} و G_{21} می‌توان موقعیت ربات را در محور مختصات به ترتیب در محور x و y محاسبه نمود.

به همین ترتیب شکل 5 نیز مقایسه خروجی حاصل از مدل (G_{12}) و (G_{22}) در حرکت به پهلو را با خروجی واقعی نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود خطای بین این دو بسیار ناچیز می‌باشد. بنابراین در فاز جا به جایی، هر چهار تابع تبدیل به لحاظ دقت مورد تأیید بوده و خطای ناچیز بین خروجی واقعی و خروجی حاصل از مدل بیانگر تخمین خوب با

جدول 3 مشخصات تابع تبدیل G_{21}, G_{11}

Table 3 The transfer function of G_{11}, G_{21}

ورودی: حرکت مستقیم (Vx)		خروجی: مؤلفه x مختصات	
G_{11}	$cov_{thtathat} = 1.0e - 04 \times$	$fit_{vector} = 96.0837$	
$= z^{-5} \times \frac{0.4327}{1 - z^{-1}}$	$\begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0009 \\ 0.0009 & 0.1475 \end{bmatrix}$		
ورودی: حرکت مستقیم (Vx)		خروجی: مؤلفه y مختصات	
G_{21}	$cov_{thtathat} = 1.0e - 04 \times$	$fit_{vector} = 94.9125$	
$= z^{-5} \times \frac{-0.07153}{1 - 1.002z^{-1}}$	$\begin{bmatrix} 0.0001 & -0.0022 \\ -0.0022 & 0.1271 \end{bmatrix}$		

جدول 4 مشخصات تابع تبدیل G_{22}, G_{12}

Table 4 The transfer function of G_{22}, G_{12}

ورودی: حرکت به پهلو (Vy)		خروجی: مؤلفه x مختصات	
G_{12}	$cov_{thtathat} = 1.0e - 06 \times$	$fit_{vector} = 87.9526$	
$= z^{-5} \times \frac{0.06861}{1 - 1.001z^{-1}}$	$\begin{bmatrix} 0.0004 & 0.0114 \\ 0.0114 & 0.5075 \end{bmatrix}$		
ورودی: حرکت به پهلو (Vy)		خروجی: مؤلفه y مختصات	
G_{22}	$cov_{thtathat} = 1.0e - 06 \times$	$fit_{vector} = 95.3521$	
$= z^{-5} \times \frac{0.1726}{1 - 1.001z^{-1}}$	$\begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0033 \\ 0.0033 & 0.2853 \end{bmatrix}$		

استفاده از روش حداقل مربعات خطا می‌باشد. به همین ترتیب نیز مدل

6- ارزیابی مدل

در شناسایی مدل مورد نظر، یکی از فرض‌های ساده کننده این بود که سیستم تحت مطالعه خطی است، به همین دلیل مدل به دست آمده حتماً باید ارزیابی گردد. اگر نتیجه ارزیابی مدل مثبت باشد در آن صورت از مدل استفاده می‌شود، ولی اگر نتیجه ارزیابی منفی باشد باید به کلیه مراحل قبل بازگشته تا ریشه مشکل مورد بررسی قرار گیرد [25].

یکی از روش‌های ارزیابی مدل، مقایسه خروجی واقعی و خروجی مدل شبیه‌سازی شده یا به عبارت دیگر محاسبه خطای مانده ($\hat{e}$) می‌باشد. مبنای این روش به صورت نموداری است و عموماً با نگاه به نمونه منحنی خطا می‌توان در مورد میزان قابل اعتماد بودن مدل اظهار نظر کرد [25].

با توجه به شکل‌های 7 و 8 که خطای حاصل از خروجی واقعی و خروجی شبیه‌سازی شده، برای هر چهار تابع تبدیل در فاز جابه‌جایی را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل به دست آمده قابل اطمینان می‌باشد و آنچه اهمیت دارد آن است که مدل به دست آمده با این شیوه برای نوع کاربردی که از ابتدا برای آن در نظر گرفته شده بود، مناسب بوده و جوابگوی نیاز مسئله می‌باشد.

توجه به این نکته ضروری است که داده‌های به دست آمده در مرحله شناسایی مدل، همگی حاصل آزمایش‌هایی بوده‌اند، که برای بخش مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در حالی‌که برای انجام فرآیند صحت‌گذاری مدل، سری دیگری از آزمایش‌ها با انجام تغییرات مورد نظر در پارامترها و یا ترکیبی از موارد پیشین در یک آزمایش برای هر فاز انجام شده است. بنابراین برای ارزیابی نهایی، مدل استخراج شده با سایر مقادیر ورودی (سرعت‌های متفاوت) مورد بررسی قرار گرفته و نتایجی که

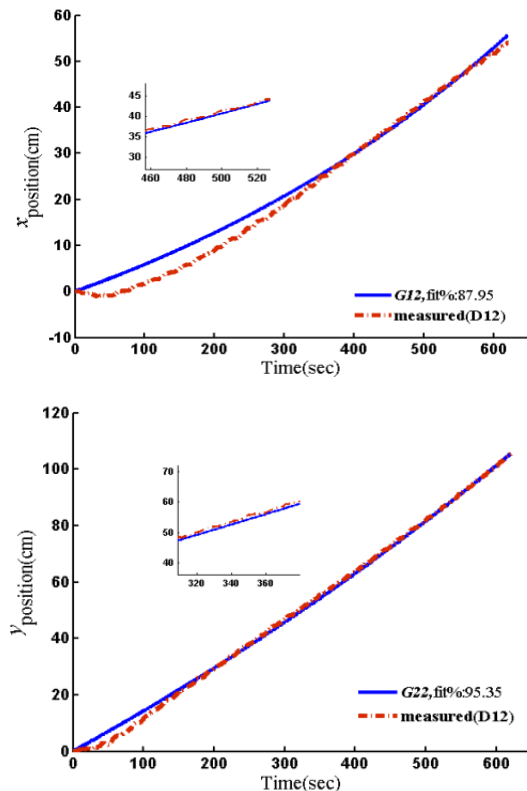


Fig. 5 The Comparison of real and model output in side walk path

شکل 5 مقایسه خروجی واقعی و خروجی حاصل از مدل در حرکت به پهلو ربات

جدول 5 مشخصات تابع تبدیل G_{33}

Table 5 The transfer function of G_{33}

ورودی: چرخش (V_{thta})	خروجی: زاویه چرخش
$G_{33} = z^{-5} \times \frac{1.745}{1 - 1.001z^{-1}}$	$fit_{vector} = 97.3322$ $cov_{thtata} = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0006 \\ 0.0006 & 0.1866 \end{bmatrix}$

جدول 6 مقایسه نتایج هم‌خوانی توابع تبدیل با مرتبه‌های یک، دو و سه

Table 6 The comparison of first, second and third order transfer function

مدل	مرتبه	درصد انطباق
زمان نمونه برداری: 0.04 ثانیه فرکانس ورودی: 1 هرتز	3	97.3%
داده‌های آموزش: 600 سرعت ربات: 0.8 سانتی‌متر بر ثانیه	2	96.7%
	1	97.3%

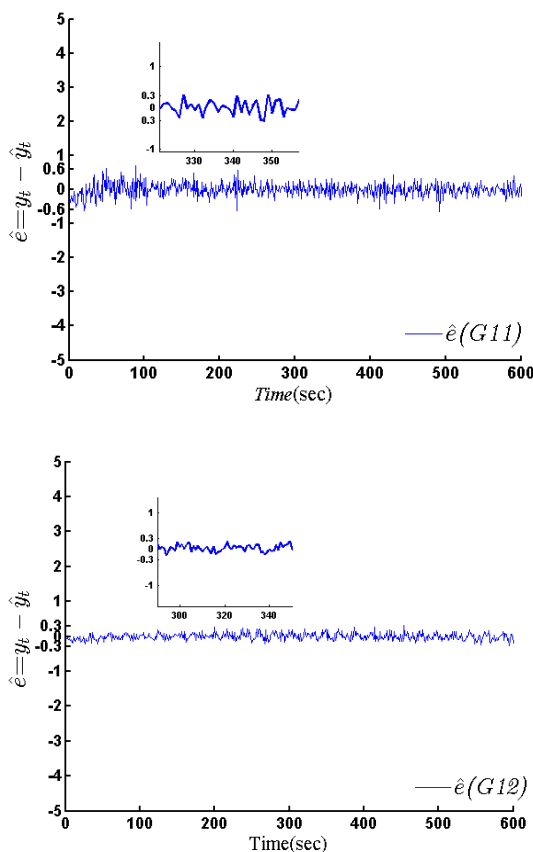


Fig.7 The error diagram after identification G_{11} , G_{12}

شکل 7 نمودار خطا پس از شناسایی G_{11} , G_{12}

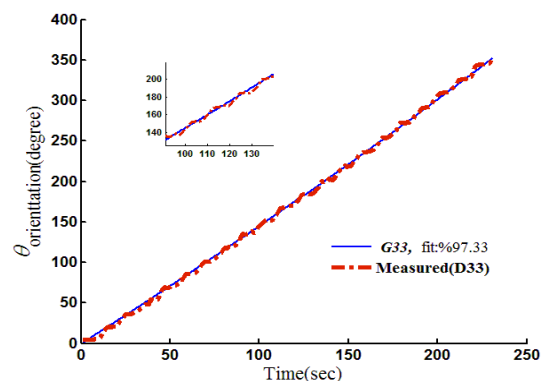


Fig. 6 The comparison of real and model output

شکل 6 مقایسه خروجی واقعی و مدل در فاز چرخش

را انجام بدهد. بنابراین با ساختن یک دایره با شعاع یک، به عنوان مسیر مرجع، هدف ردیابی تمام نقاط آن توسط ربات خواهد بود. همان طور که در نمای دوبعدی شکل 9 واضح است، کنترل کننده پیش بین با وجود شرایط آغازین در ردیابی مسیر، عملکرد موفقی داشته است. ربات پس از حدود 5 ثانیه روی مسیر هدف مستقر شده است و خطای حالت ماندگار صفر است. شکل 10 سیگنال کنترلی و نرخ تغییرات تحت قیود تعریف شده را، برای ردیابی مسیر دایره نمایش می دهد، که از حدود تعیین شده تجاوز نکرده و تحت قیود موجود در مسئله که برای سرعت ربات ($-1 \leq u \leq 1$) و نرخ تغییرات سرعت ($-0.5 \leq \Delta u \leq 0.5$) وجود دارد این ردیابی مسیر را به خوبی انجام می دهد.

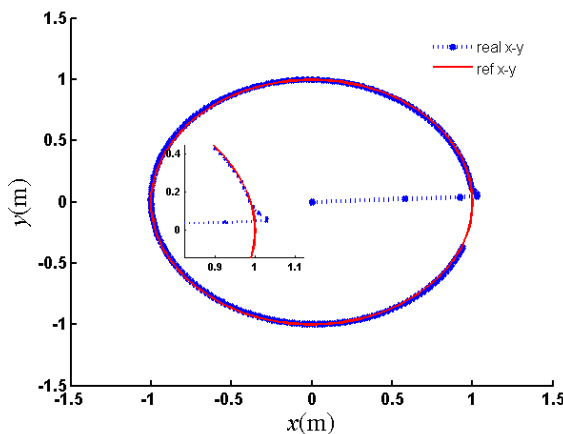


Fig. 9 The circular trajectory tracking with constraint

شکل 9 ردیابی مسیر مرجع دایره با در نظر گرفتن قیود

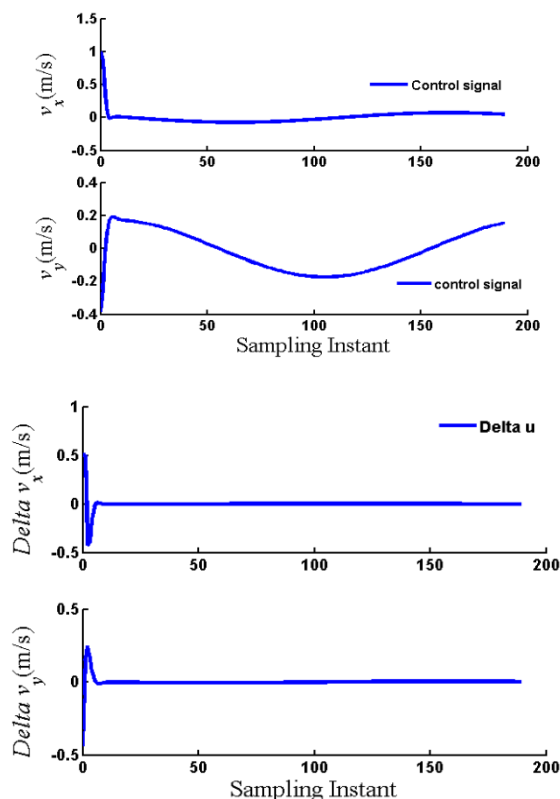


Fig. 10 The slew rate and control signal of circular tracking

شکل 10 نرخ تغییرات $-0.5 \leq \Delta u \leq 0.5$ و سیگنال کنترلی $-1 \leq u \leq 1$ در ردیابی مسیر دایره

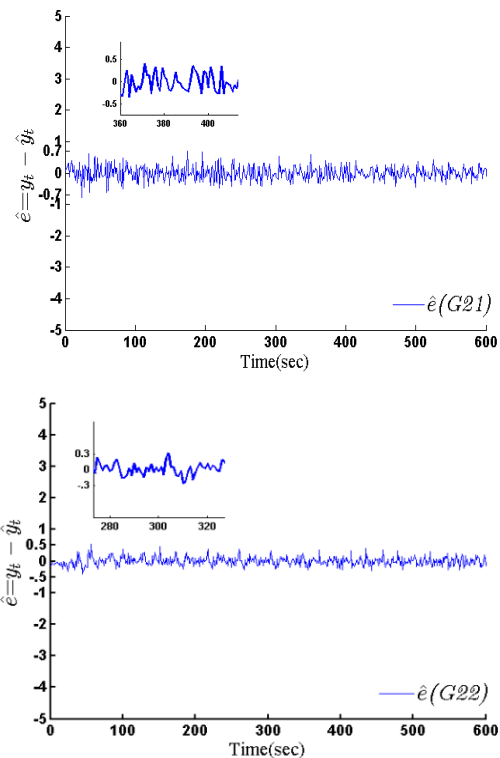


Fig. 8 The error diagram after identification G_{21}, G_{22}

شکل 8 نمودار خطا پس از شناسایی G_{21}, G_{22}

حاصل گردید قابل قبول بوده و رضایت بخش بوده است.

پس از ارزیابی مدل و حصول اطمینان از صحت مدل شناسایی شده، با بررسی صفر و قطب های مدل استخراج شده مشاهده می شود که به علت وجود سه قطب (1.001 و 1.001 و 1.002) و یک صفر سمت راست (1.0019)، مدل شناسایی شده ناپایدار است.

بنابراین لزوم به کارگیری روش کنترلی که قادر به مواجهه با سیستم های ناپایدار می باشد، به روشنی واضح می باشد. که در بخش آتی به توانایی کنترل کننده پیش بین در مواجهه با این نوع سیستم ها پرداخته خواهد شد.

پس از ارزیابی مدل و حصول اطمینان از صحت مدل شناسایی شده، با بررسی صفر و قطب های مدل استخراج شده خواهیم دید که به علت وجود سه قطب (1.001 و 1.001 و 1.002) و یک صفر سمت راست (1.0019)، مدل شناسایی شده ناپایدار است.

بنابراین لزوم به کارگیری روش کنترلی که قادر به مواجهه با سیستم های ناپایدار می باشد، به روشنی واضح می باشد. که در بخش آتی به توانایی کنترل کننده پیش بین در مواجهه با این نوع سیستم ها پرداخته خواهد شد.

7- نتایج شبیه سازی ردیابی مسیر با استفاده از کنترل پیش بین

در بحث مربوط به راهبری ربات مسیرهای وجود دارند که تمایل بر آن است ربات بر روی آنها طی مسیر کند تا به هدف خود یعنی توپ و یا دروازه حریف دسترسی پیدا کند در این بخش به ردیابی مسیرهای پرداخته خواهد شد که ردیابی آن توسط ربات مورد نیاز و در عین حال مشکل است.

مسیر اول مسیری است که تمایل بر آن است ربات حرکت بر روی دایره

ربات و تعادل آن دارد. هر چه سختی سطح بیشتر باشد (سطح غیر الاستیک)، به این معنی که پای ربات در هنگام راه رفتن کمتر در سطح فرو می‌رود و پایداری بیشتری به دست می‌آید، زیرا فرورفتگی پای ربات در سطح قابل توجهی بر پایداری ربات تأثیر می‌گذارد. بنابراین به عنوان چالشی برای آزمایش عملکرد کنترل کننده پیش بین، تغییر جنس موکت یا به عبارت دیگر تغییر ضریب اصطکاک را به عنوان اغتشاش بیرونی به سیستم در نظر گرفته و رویکرد کنترل کننده پیش بین برای حذف اثر اغتشاش در این بخش بررسی خواهد شد. در این شبیه سازی مسیر در نظر گرفته شده برای ربات دنبال نمودن مسیر دایره می‌باشد. شکل 13 عملیات ردیابی مسیر توسط ربات را در حضور عامل اغتشاش (تغییر جنس موکت) با نیروی ثابت 0.2 N را در زمان نمونه برداری 100 تا 300 نشان می‌دهد. همان طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود تغییر ضریب اصطکاک، مسیر طی شده توسط ربات را در راستای $x-y$ تحت تأثیر قرار می‌دهد و نسبت به مسیر اصلی دچار انحراف می‌شود ولی پس از طی مسیر کمتر از 0.1 متر دوباره به مسیر اصلی بازگشته و طی مسیر می‌کند، و پایداری کلی ربات حفظ می‌شود.

2-7- نتایج شبیه سازی روش کنترل پیش بین در حضور عامل نویز اندازه گیری

از آنجایی که خروجی سیستم (موقعیت ربات در هر لحظه) قابل اندازه گیری می‌باشد و هر سیگنالی که اندازه گیری شود همراه با نویز خواهد بود، بنابراین در این بخش عملکرد کنترل پیش بین در حضور نویز، مورد بررسی خواهد گرفت. برای شبیه سازی نویز اندازه گیری یک دنباله از نویز سفید با انحراف معیار 0.01 به خروجی اضافه می‌شود. شکل 14 عملکرد کنترل پیش بین را در حضور نویز اندازه گیری نمایش می‌دهد.

8- نتایج شبیه سازی ردیابی مسیر با استفاده از کنترل PID

شکل 15 بلوک دیاگرام سیستم ربات نانو به همراه کنترل کننده PID را نشان می‌دهد. در طراحی این کنترل کننده نیز هدف، ردیابی مسیری است که در بخش پیشین بررسی شد. بنابراین با طراحی سه کنترل کننده PID برای هر سه کانال خروجی مورد نظر، به بررسی مسیر دایره، که مسیر چالش برانگیزی می‌باشد، پرداخته خواهد شد. با توجه به این که سیستم مورد بررسی چندمتغیره می‌باشد، در نتیجه

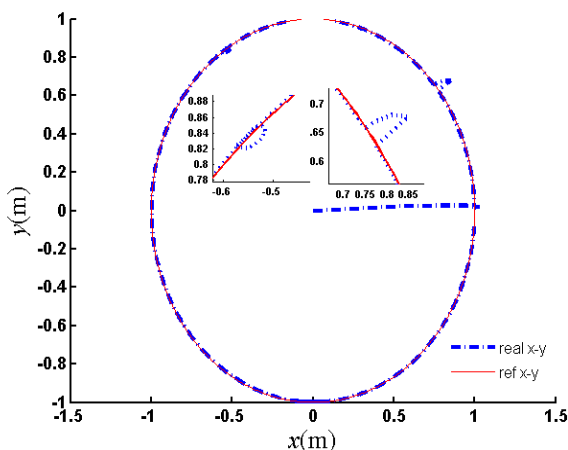


Fig.13 The circular trajectory tracking in the presence of disturbance
شکل 13 ردیابی مسیر دایره در حضور اغتشاش

شکل 11 در نمای دو بعدی توانایی کنترل پیش بین در ردیابی مسیر ترکیبی توسط ربات را نشان می‌دهد. شکل 12 نیز سیگنال کنترلی و نرخ تغییرات در ردیابی این مسیر را با در نظر گرفتن قیود نمایش می‌دهد.

1-7- نتایج شبیه سازی روش کنترل پیش بین در حضور عامل اغتشاش

سطحی که ربات بر روی آن راه می‌رود تأثیر فراوانی بر کیفیت راه رفتن

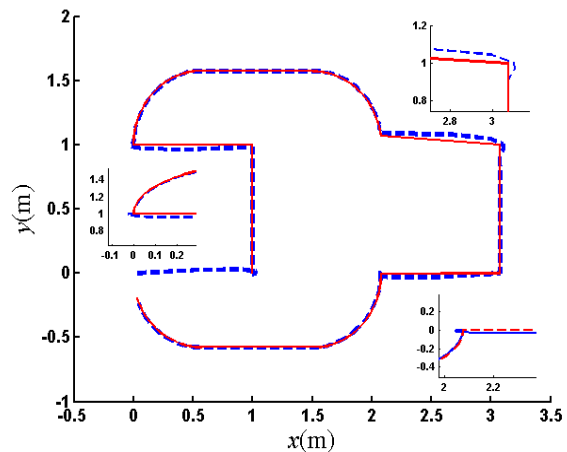


Fig. 11 The compound path with constraint

شکل 11 ردیابی مسیر ترکیبی با در نظر گرفتن قیود

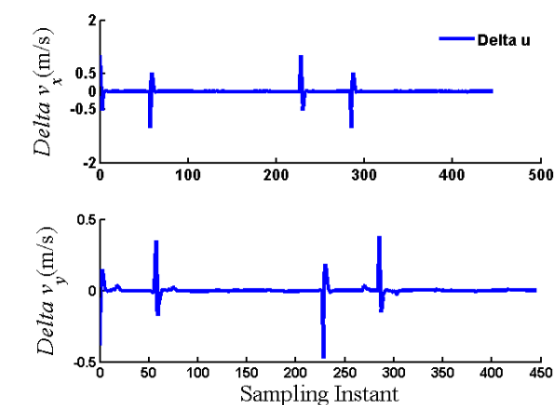
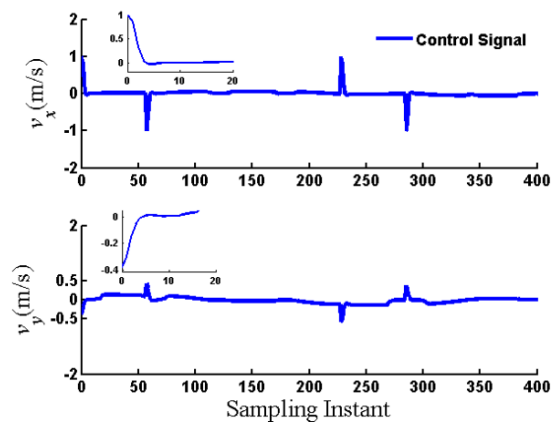


Fig. 12 The slew rate and control signal of compound path

شکل 12 نرخ تغییرات و سیگنال کنترلی مسیر ترکیبی

که از یک سیستم کنترلی خوب مورد انتظار است. بنابراین مقایسه این دو رویکرد کنترلی نشان می‌دهد که کنترل پیش‌بین در مقایسه با کنترل PID روشی بسیار توانمندتر است زیرا:

1. ردیابی بهتر مسیر مرجع

با مقایسه خطای ردیابی در هر دو رویکرد کنترلی مشاهده می‌گردد که کنترل پیش‌بین در ردیابی مسیرهای مرجع و حداقل کردن اختلاف بین مقدار خروجی‌های آینده و مقادیر مرجع بسیار بهتر عمل می‌کند. بنابراین برای ارزیابی عملکرد هر دو رویکرد کنترلی از معیار انتگرالی خطا استفاده می‌شود. رابطه (18) انتگرال مربع خطا³ و رابطه (19) انتگرال مطلق خطا⁴ را نشان می‌دهد. جدول 7 این مقایسه را به خوبی نمایش می‌دهد، مطابق این جدول مقادیر ISE و IAE در حالت کنترل پیش‌بین کمتر از کنترل PID می‌باشد، که مبین عملکرد بهتر کنترل پیش‌بین است.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2 dt = \int_0^{\infty} (r_{\text{reference}} - y_{\text{output}})^2 dt \quad (18)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt = \int_0^{\infty} |r_{\text{reference}} - y_{\text{output}}| dt \quad (19)$$

2. دفع بهتر اثر اغتشاش

شکل 19 عملکرد ضعیف کنترل PID را در تطبیق سریع با تغییرات سیگنال مرجع در لحظه وقوع اغتشاش نمایش می‌دهد، که در مقایسه با کنترل پیش‌بین در مواجهه با اغتشاش بسیار ضعیف عمل می‌کند.

3. انتشار کمتر نویز اندازه‌گیری

شکل 20 عملکرد PID را در حضور نویز سفید با میانگین صفر و واریانس 0.01 نشان می‌دهد، که در مقایسه با کنترل پیش‌بین انتشار نویز در خروجی بسیار قابل توجه می‌باشد.

4. برای طراحی کنترل PID که در بخش پیشین به تفصیل به آن پرداخته شد، به دلیل ناپایدار بودن مدل استخراج شده و عدم توانایی این کنترل کننده در پایدارسازی، با استفاده از روش فیدبک حالت ابتدا سیستم حلقه باز را پایدار کرده و سپس به بررسی ردیابی مسیر توسط این کنترل کننده پرداخته شد. در مقابل توانایی کنترل پیش‌بین در پایدارسازی با استفاده از تنظیم افق‌های کنترلی و در نتیجه صرف هزینه و زمان به مراتب کمتر، قابلیت این روش کنترلی را به خوبی نمایش می‌دهد.

5. توانایی تطبیق کنترل پیش‌بین در مواجهه با قیود موجود در مسئله، یکی از مسایلی که در سیستم‌های دینامیکی همواره با آن مواجه خواهید بود، بسیار قابل توجه است. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت کنترل کننده پیش‌بین در مقایسه با PID عملکرد رضایت بخش‌تری داشته و در نتیجه انتخاب روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل مناسب‌ترین روش برای کنترل سیستم مورد بررسی می‌باشد.

جدول 7 مقادیر IAE و ISE در ردیابی مسیر دایره

Table 7 IAE and ISE for trajectory tracking				
y_1		y_2		روش کنترلی
IAE	ISE	IAE	ISE	
3.62	0.69	3.65	0.18	MPC
15.08	2.3	17.8	1.99	PID

³ Integral square error (ISE)

⁴ Integral absolute error (IAE)

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1

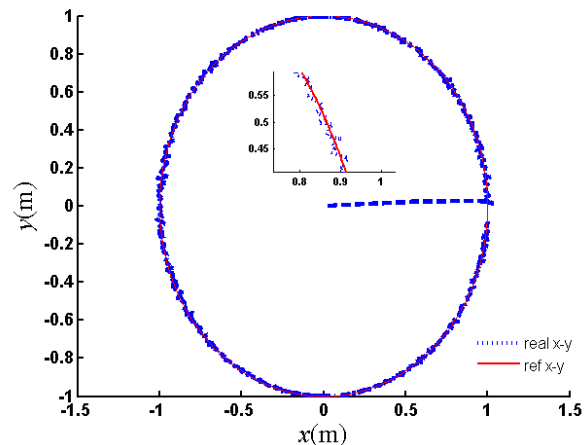


Fig. 14 The Circular path with measure noise

شکل 14 ردیابی مسیر دایره به همراه نویز اندازه‌گیری

مسئله تداخل¹ وجود دارد، بنابراین برای طراحی سیستم کنترل چند متغیره، از روش کنترل غیر متمرکز که در آن حلقه‌های کنترلی ارتباط مستقیمی با یکدیگر ندارند، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. به دلیل ناپایدار بودن سیستم حلقه باز و مشاهده پاسخ غیر قابل قبول از ردیابی مسیر توسط کنترل کننده PID برای این سیستم ناپایدار، در این بخش ابتدا با استفاده از فیدبک حالت قطب‌ها را در محل دلخواه قرار داده و سپس به طراحی کنترل کننده پرداخته خواهد شد. برای مقایسه عملکرد کنترل PID، حرکت بر روی دایره به عنوان مسیر مرجع در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل 16 مشاهده می‌شود که ردیابی مسیر با استفاده از کنترل کننده PID به خوبی MPC نمی‌باشد و نسبت به مسیر مرجع کمی انحراف دارد و در مقایسه با کنترل پیش‌بین زمان بیشتری طول می‌کشد تا در مسیر مطلوب قرار بگیرد. همچنین در کنترل پیش‌بین پاسخ سریع‌تری نسبت به کنترل PID وجود دارد. شکل 17 سیگنال کنترلی برای هر دو کانال خروجی را به‌طور جداگانه، بدون در نظر گرفتن محدودیت سیستم نمایش می‌دهد.

1-8- بررسی نتایج شبیه‌سازی کنترل PID با در نظر گرفتن

محدودیت سیستم

با توجه به این که سرعت مجاز برای حرکت ربات در محدوده $-1 \leq u \leq 1$ می‌باشد و مطابق شکل 18 در بخش پیشین سیگنال کنترلی مرتبط به ردیابی مسیر دایره از این محدوده تجاوز کرده، بنابراین برای اعمال این قید، مقدار خروجی کنترل کننده باید محدود شود. از آنجایی که اعمال این محدودیت بر روی کنترل کننده منجر به اثر جمع شوندگی² می‌شود که علی‌رغم اعمال یکی از روش‌های رایج برای جلوگیری از این پدیده نیز نتایج ناموفق بود. شکل 18 ردیابی ناموفق مسیر توسط کنترل کننده PID در حضور قیود موجود در مسئله را نمایش می‌دهد.

9- مقایسه کنترل پیش‌بین و کنترل PID

با بررسی نتایج شبیه‌سازی و عملکرد کنترل پیش‌بین و کنترل کلاسیک در بخش‌های پیشین، کاملاً مشخص است که روش کنترل پیش‌بین روشی بسیار کارآمد و توانمند در منطبق شدن با ورودی‌های مرجع است. همچنین توانایی تطبیق سریع با تغییرات سیگنال مرجع در لحظه وقوع اغتشاش برای سیستم مورد بررسی را دارا است، که این همان چیزی است

¹ Interaction

² Windup

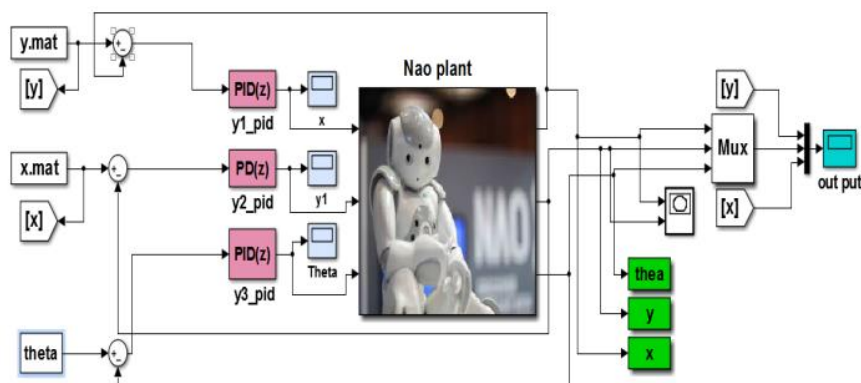


Fig. 15 The Nao robot control design in Closed loop

شكل 15 روش حلقه بستن ترتيبى در طراحى كنترل ربات ناو

مدلى معتبر استخراج گرديد. با بررسى سيستم بدون اعمال كنترل كننده و نتايج قابل قبول بدست آمده، نشان دهنده ماهيت سيستم به عنوان يك سيستم ناپايدار بوده است. كنترل كننده پيش بين مبتنى بر مدل پيشنهادهى در اين تحقيق اثبات كرده كه مى تواند يكي از بهترين روش هاى كنترلى براى كنترل موقعيت ربات و ردپايى مسير ربات باشد. بنابر اين با طراحى يك كنترل كننده پيش بين مبتنى بر مدل كه براى كاهش حجم محاسباتى آن از توابع لاگر استفاده شده و اعمال آن به سيستم مشاهده شد كه اين كنترل كننده به طور موفقيت آميزى توانسته است ضمن پايدارسازى سيستم،

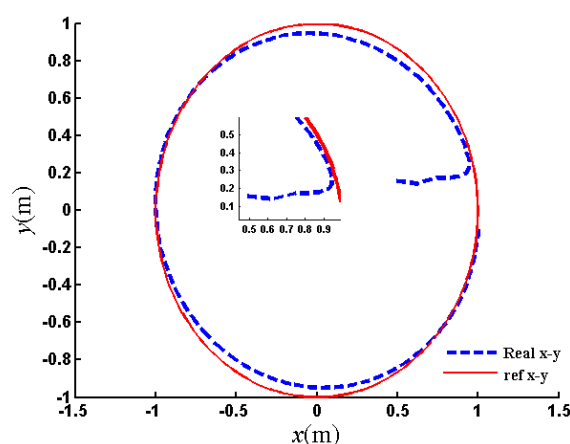


Fig.16 The Circular trajectory tracking with PID controller

شكل 16 ردپايى مسير دايره با استفاده از كنترل كننده PID

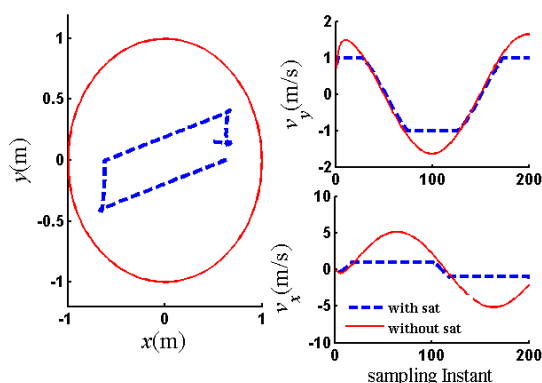


Fig. 18 The circular tracking and control signal with constraint in PID

شكل 18 ردپايى مسير دايره و سيگنال كنترلى محدود شده در كنترل PID

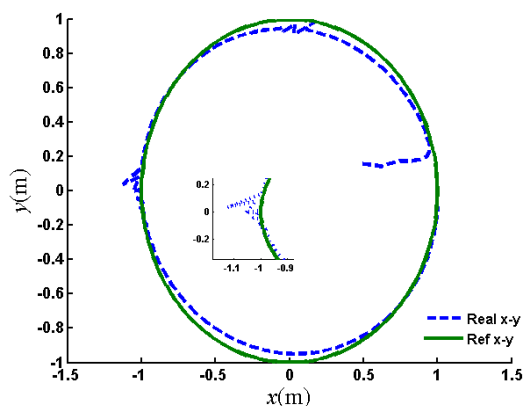


Fig. 19 The PID performance in Circle trajectory tracking in the presence of disturbance

شكل 19 عملکرد PID در ردپايى مسير دايره درحضور عامل اغتشاش

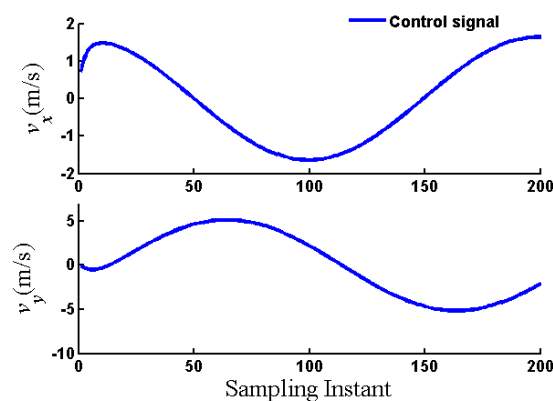


Fig.17 The control signal without constraint in PID controller

شكل 17 سيگنال كنترلى بدون قيد با استفاده از كنترل كننده PID

10- نتيجه گيرى

هر كنترل كننده اى در مرحله طراحى نياز به مدلى از فرايند دارد برخلاف بسيارى از انواع كنترل كننده ها كه بعد از انجام طراحى، مدل فرايند كنار گذاشته مى شود، در كنترل كننده هاى مبتنى بر مدل، اين مدل در درون كنترل كننده باقى مى ماند و براى پيش بينى رفتار آينده سيستم به كار مى رود. بنابر اين در اين تحقيق به دست آوردن مدل راه رفتن ربات انسان نماى ناو، با توجه به فرضيات در نظر گرفته شده، مورد بررسى قرار گرفته و در نهايت

- [6] A. Medina, et al. Outline of an Autonomy Framework for Space Mobile Robots, *Aerospace Robotics II*, Springer International Publishing, Switzerland, pp. 187-198, 2015
- [7] B. Cirak, Comparison of MPC and PID controls of sirnak water supply network system, Vol. 1, No. 2, pp. 28-36, 2015
- [8] A.Ramdani, S.Grouni, Y. Soufi, Application of predictive controller tuning and a comparison study in terms of PID controllers, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 29, pp. 12454-12464, 2016.
- [9] Y.A.Sha'aban, B.Lennox, D.Lauri, PID versus MPC performance for siso dead-time dominant processes, *10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems*, Vol. 46, No. 32, pp. 241-246, 2013.
- [10] S. Parsianmehr, A. Fakharian, S. S. Tabatabaei, An experimental LTI model for open loop Nao navigation, *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, pp. 1-6, 2013.
- [11] M. Vukobratović, J. Stepanenko, On the stability of anthropomorphic systems, *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-37, 1972
- [12] J. Strom, G. Slavov, E. Chown, Omnidirectional walking using zmp and preview control for the nao humanoid robot, *RoboCup Conference: Robot Soccer World Cup XII*, 2009.
- [13] S. Czarnetzki, S. Kerner, O. Urbann, Observer-based dynamic walking control for biped robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 57, No. 8, pp. 839-845, 2009.
- [14] C. Graf, A. Härtl, T. Röfer, T. Laue, A robust closed-loop gait for the standard platform league humanoid, *Proceedings of the Fourth Workshop on Humanoid Soccer Robots*, France, Paris, pp. 30-37, 2009.
- [15] I. Kapustik, J. Hudec, P. Navrat, Stabilized walking for Nao robot, *IEEE 13th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)*, pp. 115-118, 2015.
- [16] Q. Zhang, T. Tang, D. Zhang, S. Yang, Y. Shao, Optimized central pattern generator network for NAO humanoid walking control, *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, *International Conference on IEEE*, pp. 1486-1490, 2013
- [17] A. Sherikov, *Model predictive control of a walking bipedal robot using online optimization*, Master Dissertation, Orebro University, 2012
- [18] Piperakis, S., Orfanoudakis, E., Lagoudakis, M.G.: Predictive control for dynamic locomotion of real humanoid robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4036-404, 2014.
- [19] D. C. Fernández, G. A. Hollinger, *Model Predictive Control for Underwater Robots in Ocean Waves*, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 2, No. 0, pp. 88-95, 2017.
- [20] J. Wilson, M. Charest, R. Dubay, Non-linear model predictive control schemes with application on a 2 link vertical robot manipulator, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 41, No. 0, pp. 23-30, 2016.
- [21] M.J. Powell, E.A. Cousineau, A.D. Ames, Model predictive control of underactuated bipedal robotic walking, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5121-5126, 2015.
- [22] R. Heydari, M. Farrokhi, Model predictive control for biped robots in climbing stairs, *2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1209-1214, 2014
- [23] R.C Luo, C.C. Chen, Biped walking trajectory generator based on three-mass with angular momentum model using model predictive control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 63, No. 1, pp. 268-27, 2016 .
- [24] Monitoring NAOqi, Accessed on 17 october 2013, <http://www.aldebaranrobotics.com/documentation/dev/tools/naoqi.html>
- [25] Karrari Mehdi, *System Identification*, first edition, pp 10-300, Amirkabir university of technology- Tehran polytechnic, Iran, 16 March 2010. (in persian فارسی)
- [26] L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*, Springer Science & Business Media, first edition, Australia, pp. 28-220, 2009.
- [27] L. Wang, Discrete model predictive controller design using Laguerre functions, *Journal of Process Control*, Vol. 14, No. 2, pp. 131-142, 2004.
- [28] W. Yang, S. Boyd, Fast Model Predictive Control Using Online Optimization, *Control Systems Technology*, *IEEE Transactions on*, Vol. 18, No. 2, pp. 267-278, 2010.

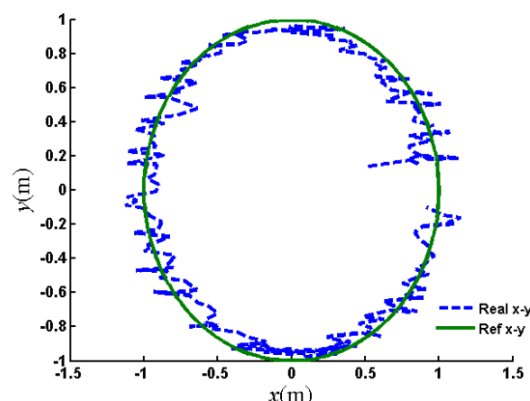


Fig. 20 The PID performance in Circle trajectory tracking with the measurement noise

شکل 20 عملکرد PID در حضور نویز اندازه گیری

به مقدار مطلوب برای خروجی دست یابد. اثر اغتشاش که یکی از بحرانی ترین عواملی است که در حین راه رفتن ربات را تحت تأثیر قرار می دهد. روش کنترل ارائه شده با حذف کامل اثر اغتشاش، موفقیت هدایت راه رفتن ربات را تضمین می کند. در گام بعدی برای اطمینان از انتخاب مناسب روش کنترلی این روش با یک روش کنترل کلاسیک مقایسه شده است. نتایج بدست آمده عملکرد روش مورد نظر را به اثبات می رساند.

11- قدردانی

از اعضای مرکز تحقیقات مکترونیک دانشگاه آزاد قزوین بابت همکاری بی دریغشان و فراهم کردن موقعیت و شرایط مناسب برای کار کردن بر روی ربات نانو قدردانی و سپاس فراوان می گردد.

12- مراجع

- [1] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, Safe knee landing of a human-size humanoid robot while falling forward, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vol. 1, No. 0, pp. 503-508, 2004
- [2] D. Gouaillier, V. Hugel, P. Blazevic, C. Kilner, J. Monceaux, P. Lafourcade B. Marnier, J. Serre, B. Maisonnier, The nao humanoid: a combination of performance and affordability, *Computing Research Repository (CoRR)*, Vol. abs/0807.3223, No. 0, 2008
- [3] J. Kulk, J. Welsh, A low power walk for the NAO robot, *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics & Automation (ACRA)*, Australia, pp. 1-7, 2008
- [4] Z. Šehić, Z. Šehić-Galić, Comparison study for PID and MPC controller based on orthonormal functions, *Proceedings in ARSA-Advanced Research in Scientific Areas*, Vol. 1, No. 1, pp. 1700-1703, 2012
- [5] L. Pacheco, N. Luo, Testing PID and MPC performance for mobile robot local path-following, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 12, No. 11, pp. 155-165, 2015