# **مقدمه**

اتوماسیون در بخش‌های مختلف صنعت و کارهای تولیدی در چند دهه اخیر ظهور پیدا کرده است و روزبه‌روز نیز در حال توسعه می‌باشد. روبات‌ها، جديدترين مرحله‌ی تلاش انسان جهت صنايع خودکار به شمار می‌روند. روبات‌ها آن دسته از ماشین‌های ساخت بشر هستند که لزوماً حرکت‌های شبیه انسان ندارند ولی توان تصمیم‌گیری، ايجاد و کنترل فعالیت‌های از پیش تعیین شده را دارند. يکی از پرکاربردترين ربات‌های صنعتی بازوهای مکانیکی ماهر هستند. بازوهای مکانیکی شامل چند عضو است که با مفصل به یکدیگر متصل شده‌اند. توجه به صرفه‌جويی در مصرف مواد و انرژی منجر به گسترش تلاش‌هايی برای تولید ربات‌های سبکتر در جهت کاهش هزینه‌ها شده‌است. نتیجه‌ی اين تلاش‌ها تولید بازوهای ربات با وزن کمتر می‌باشد. به دلیل کاربردهای بالقوه ربات‌های بازویی انعطاف‌پذیر در زیست پزشکی [1] و صنعت فضانوردی [2]، مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. مانند فعالیت‌های مروبط به جابجایی، جراحی، و عملیات نجات. با توجه به وزن سبک ، مصرف انرژی کم، عملیات انعطاف پذیر و پاسخ سریع، ربات های انعطاف پذیر یک مورد ایده آل برای استفاده در برنامه های کاربردی هستند.

کم شدن وزن ربات‌ها مشکلاتی ايجاد کرده‌است، از جمله این مشکلات ایجاد لرزش در بازوی ربات پس از به انجام رساندن یک فعالیت می‌باشد و این امر موجب تاخیر در انجام فعالیت بعدی می‌شود، بنابراین سرکوب لرزش(میرایی لرزش) روبات‌های انعطاف‌پذیر هدف اصلی کنترل سیستم ربات انعطاف‌پذیر جهت دستیابی به موقعیت‌ دقیق است.

ديناميک چنين بازوهايي پيچيده است، کمینه فاز بوده و غيرخطي‌‌گری‌هاي موجود در روابط ديناميکي قابل صرف‌نظرکردن‌ نمی باشد این بازوها تحت تاثیر عدم قطعيت‌هاي ساختاري و غيرساختاري هستند.

ربات‌های بازویی انعطاف‌پذیر به عنوان سیستم‌های با پارامتر توزیع شده[[1]](#footnote-1) شناخته شده‌اند و به طور کلی با معادلات دیفرانسیل جزئی[[2]](#footnote-2)(PDE) نمایش داده می‌شوند. این امر همچنین باعث پیچیدگی و دشواری طراحی کنترل لرزش بر اساس مدل PDE شده است، به ویژه زمانیکه عدم قطعیت مدل وجود دارد، به دلیل همبسته بودن پارامترهای توزیع شده سیستم، تنها یکسری راه حل‌های خاص در دسترس هستند (به‌عنوان مثال: برای مورد سیستم‌های توزیع شده نامتناهی بینهایت بعدی، کاهش ابعاد و تقرب زنی می‌تواند برای این کار مفید باشد). [3]

هدف از کنترل ربات‌های انعطاف‌پذیر رسیدن به یک نقطه‌ی مطلوب در صفحه در کمترین زمان ممکن با حداقل لرزش می‌باشد، تا بتوان با سرعت بیشتری فعالیت بعدی را به اجرا نمود.

# **هدف پروژه**

تا کنون مطالعات بسیاری بر روی کنترل لرزش ربات‌های بازویی انعطاف‌پذیر انجام شده‌است. کنترل‌کننده‌های متفاوتی به منظور میرایی لرزش‌های ربات بازویی انعطاف ‌پذیر اعمال شده‌اند. برای مثال در کنترل‌کننده تناسبی – انتگرالی – مشتق‌گیر (PID) مرسوم یک عدم هماهنگی بین «سرعت[[3]](#footnote-3)» و «بالازدگی[[4]](#footnote-4) » در سیستم حلقه بسته وجود دارد. علاوه بر این، ویژگی‌های دینامیکی حلقه بسته به تغییرات ضرایب PID حساس هستند [4]. تمامي روش‌ها و استراتژي‌هاي متعدد کنترلي، نظير کنترل تطبيقي، کنترل خود تنظيم، کنتـرل پيشخورد نيازمند مدل دقيقي از بازوهاي رباتيك قابـل انعطـاف مـي‌باشند. در سال 2004بنوسمن[[5]](#footnote-5) [5]، در سال 2014 چانگ تای و آندرو اسپاوج و چان کان[[6]](#footnote-6) [6]و در سال 2016 لوچان ، روی و سوبادهی[[7]](#footnote-7) [7] تاريخچه‌ي کاملي از فعاليت‌هـاي انجام شده در زمينه مدل‌سازي و نيز کنترل بازوهاي رباتيك قابل انعطاف ارائه نموده‌اند. از الگوریتم‌های کنترل هوشمند که نیاز به مدل ندارند برای سرکوب لرزش در ربات‌های انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود [8]. مودگال[[8]](#footnote-8) یک پایگاه قواعد فازی برای کنترل‌کننده یادگیری مدل مرجع به منظور کنترل موقعیت نوک ربات و سرکوب لرزش پیشنهاد کرد اگرچه این روش پاسخ داد اما اشکال اصلی آن این است که ایجاد قوانین کنترل فازی بسیار وابسته به تجربه و دستیابی به یک پاسخ کنترل نرم است. بنابراین، تعداد قواعد بصورت نمایی افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش مشکل در طراحی خواهد شد. استفاده از رویکردهای کنترلی مقاوم از جمله کنترل مد لغزشی مرتبه دو منتج به نتایج بسیار خوبی شده اما نیاز به مدل دقیقی از دینامیک ربات داریم که به دست آوردن آن کار دشواری است. استفاده از رویکرد کنترلی بهینه‌ی مرسوم می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی و همچنین کمینه کردن خطای ردیابی مسیر شود، اما حاصل شدن پاسخ بهینه در این حالت توسط الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات به‌صورت آفلاین انجام می پذیرد که عملا به‌صورت زمان واقعی قابل پیاده‌سازی نیست.

# **2 -1** **روش کنترلی یادگیری تقویتی**

در علم مهندسی کنترل، یادگیری تقویتی[[9]](#footnote-9) پلی است که شکاف بین الگوریتم‌های کنترل بهینه مرسوم و کنترل تطبیقی را از بین می برد. هدف، یادگیری سیاست بهینه و تابع ارزش[[10]](#footnote-10) برای یک سیستم فیزیکی بالقوه نامعین است. برخلاف کنترل بهینه‌ی مرسوم، یادگیری تقویتی پاسخ معادله‌ی HJB را به‌صورت آنلاین در زمان واقعی پیدا می‌کند. از طرف دیگر، برخلاف کنترل‌کننده های تطبیقی مرسوم که معمولا طراحی نمی‌شوند تا از لحاظ کمینه کردن توابع هزینه بهینه شوند، الگوریتم‌های یادگیری تقویتی بهینه هستند. این مسئله محققان سیستم های کنترل را تشویق کرده تا بوسیله ی توسعه کنترل‌کننده های یادگیری تقویتی، خودگردانی تطبیقی را در یک رویکرد بهینه ممکن سازند [9]. یکی از انواع رویکردهای یادگیری تقویتی، روش یادگیری Q [[11]](#footnote-11) نام دارد که همچنین با عنوان برنامه نویسی پویای اکتشافی عمل محور[[12]](#footnote-12) نیز شناخته می‌شود، ترکیبی از روشهای منتقد تطبیقی[[13]](#footnote-13)، تکنیک های یادگیری تقویتی و برنامه نویسی پویا را برای حل مسائل کنترل بهینه استفاده میکند. از مهم‌ترین مزایای یادگیری Q توانایی ارزیابی کارایی و به‌روز کردن سیاست کنترلی بدون نیاز به مدل محیط می‌باشد [10].

از مطالعات قبلی، یادگیری Q به عنوان رویکرد کنترل بهینه‌ی بدون نیاز به مدل برای سیستم‌های غیرخطی غیر همبسته[[14]](#footnote-14) به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است [10]. از آنجایی که ربات ما نیز یک سیستم غیرخطی محسوب می‌شود و همچنین این روش تنها به داده‌های ورودی نیاز دارد و احتیاجی به مدل دینامیکی ربات نیست، می تواند انگیزه‌ای مناسب برای استفاده از این روش و بررسی بهتر آن باشد.

در این پایان‌نامه تلاش بر این است که با استفاده از یادگیری تقویتی از نوع یادگیری Qبه عنوان کنترل کننده‌ی بهینه‌ی غیرخطی، ارتعاشات ربات بازویی انعطاف‌پذیر را حداقل نماییم و از طرفی ربات بتواند یک مسیر از پیش تعیین شده را به خوب دنبال نماید.

به‌طور کلی اگر بخواهیم مزیت های استفاده از یادگیری تقویتی نوع یادگیری Q به‌عنوان کنترل‌کننده دنبال کننده مسیر در ربات را بگوییم، عبارت است از:

1. عدم نیاز به مدل دینامیک و سینماتیک ربات
2. پیدا کردن سیاست ردیابی مسیر بهینه به‌صورت آنلاین
3. تاثیر ناپذیری از نامعینی‌ها و تغییرات ناگهانی در سیستم به دلیل خاصیت تطبیق پذیری
4. کاهش میزان مصرف انرژی

عدم نیاز به مدل یک مزیت بسیار مهم در این روش به‌حساب می‌آید. زیرا به دست آوردن مدل دقیق این نوع از ربات‌ها با توجه به ساختار پیچیده‌ی بازوهای انعطاف‌پذیر و خاصیت الاستیک آنها، اگر مدل ما نیز دقیق نباشد می‌تواند نامعینی‌هایی را به سیستم و طراحی کنترل‌کننده موردنظر وارد کند و در عملکرد سیستم تاثیر به سزایی بگذارد.

همچنین با توجه به اینکه یادگیری تقویتی، به‌صورت آنلاین پاسخ بهینه را پیدا می‌کند لذا یک رویکرد تطبیقی حساب می‌شود که تغییراتی که در بازوهای انعطاف‌پذیر در حین کار، در مدل ربات بوجود می‌آید را می‌تواند در بر بگیرد و بدون اینکه مدل سیستم را بدانیم، ربات به شکل بهینه مسیر را دنبال کند.

# **تاریخچه**

ربات‌های انعطاف‌پذير به ربات‌هايی اطلاق می‌شوند که يک عضو يا چند عضو آن‌ها به ‌صورت الاستیک باشند. البته اين عنوان برای ربات‌هايی که دارای مفاصل الاستیک هستند نیز به کار می‌رود. از سال 1970 تا 1980 مطالعه بر روی ربات‌های انعطاف‌پذیر و بازوی‌های انعطاف‌پذیر یکی از زمینه‌های مورد علاقه دانشمندان و مهندسین بوده است. در ابتدای کار نتایج رضایت بخشی در این موضوع حاصل نشد. اما کاربردهای جدیدی که برای این گونه از ربات‌ها به وجود آمد و پیشرفت تکنولوژی باعث شده که دوباره محققین به سمت این موضوع پیچیده که همچنان به عنوان یک مسئله باز شناخته می‌شود بروند تا بتوانند مشکل آن را حل کنند.

در سال‌های اخیر محققان به تحقیقاتی در زمینه‌ی مدل کردن، طراحی و کنترل حرکت ربات‌ها با بازوی انعطاف‌پذير پرداخته‌اند. علل مختلفی برای تمرکز تحقیقات در اين زمینه‌ی علمی وجود دارد برای نمونه در کاربردهای فضايی بازوهای رباتی، به‌منظور اقتصادی‌تر کردن مصرف سوخت و تسهیل در رسیدن به سرعت پرتاب، نیاز به طراحی بر اساس جرم کم، اهمیت يافته است. در سال 1979 ناسا[[15]](#footnote-15) مطالعه بر روی ربات‌های انعطاف‌پذير به صورت بخشی از تحقیقات ربات‌های فضايی به منظور کاهش هزينه‌های پرتاب را آغاز کرد. در سال 1981ربات کند آرم 1[[16]](#footnote-16) به ايستگاه فضايی بین‌الملل فرستاده شد.‌ وظیفه‌ی اين ربات تخلیه‌ی بار از شاتل فضايی و جابه‌جا کردن فضانوردها بود. در سال 1996ربات کند آرم 2[[17]](#footnote-17) که از مدل قبلی خود پیچید‌ه‌تر و کارآمدتر بوده به ايستگاه فضايی فرستاده و بر روی آن نصب شد. اين ربات هفت درجه آزادی دارد و توان حمل بار بیشتری نسبت به کندآرم1 دارد. اين ربات بر روی يک پايه‌ی متحرک نصب شده که به آن اجازه می‌دهد در ايستگاه حرکت کند و برد عملکرد بالايی داشته باشد.

بازوهای صلب به صورت وسیعی در تولیدات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ربات‌های معمولی ظرفیت حمل بار محدود، بین پنج تا ده درصد وزن خود را دارند. به اين علت که بتوان پايداری مدار بسته‌ی سیستم را تأمین کرد. طراحان ربات‌های متصل به زمین مشکل عدم کنترل را با حجیم کردن و سنگین کردن بازوها به منظور جلوگیری از رفتار انعطاف‌پذير حل کرده‌اند.

## **1-3 مزایا و معایب ربات بازویی انعطاف‌پذیر**

مزایا ربات‌های بازویی انعطاف پذیر نسبت به ربات‌های بازویی صلب :

1. وزن کمتر که موجب مصرف انرژی کمتر برای به حرکت درآوردن ربات می‌شود
2. سرعت بیشتر
3. هزینه کمتر
4. قابلیت حمل راحت‌تر
5. عملیات مطمئن تر به دلیل لختی کمتر در برخورد با اجسام و نیروی انسانی آسیب کمتری می‌رساند
6. ساخت راحت‌تر آن‌ها و قابلیت تعویض راحت بخشی از این گونه ربات‌ها
7. امکان دسترسی به نقاط دوردست برای انجام کارهايی که توسط انسان امکان‌پذير نیست

درکنار مزیت‌هایی که اینگونه ربات‌ها دارند معایبی هم نسبت به نوع صلب دارند که به شرح زیر می‌باشد:

1. به وجود آمدن ارتعاش در عضو به علت انعطاف‌پذير بودن و درنتیجه عدم تعقیب مسیر پنجه به صورت دقیق
2. کم عملگر بودن ربات[[18]](#footnote-18)
3. عدم دسترسی به يک مدل دينامیکی دقیق و نزديک به واقعیت برای طراحی کنترل‌کننده‌ها
4. مشاهده ناپذيری متغیرهای ارتعاشی عضو مثل تغییر شکل‌های الاستیک و نبود امکان اندازه‌گیری آسان پارامترهای مذکور به منظور داشتن فیدبک از آنها

## 2-3 **کنترل‌کننده‌های اعمال شده**

کنترل ربات‌های بازویی انعطاف پذیر را می‌توان در دوکلاس دسته بندی کرد :

1. روش های مبتنی بر مدل سیستم[[19]](#footnote-19)
2. روش هایی که به مدل سیستم بستگی ندارند [[20]](#footnote-20)

روش‌های مبتنی بر مدل معمولا به صورت کنترل پیشخور هستند، در فاز طراحی این نوع کنترل‌کننده‌ها برای خنثی کردن ارتعاشات باید ویژگی‌های فیزیکی سیستم و تاثیر مربوط به ارتعاشات به خوبی در نظر گرفته شوند. معمولا در این روش از حسگر‌های بازخورد استفاده نمی‌شود.

مشکل عمده این نوع کنترل این است که خروجی کنترل‌کننده برای تغییرات در سیستم استفاده نمی‌شود.

روش‌های که به مدل سیستم بستگی ندارند ساده‌تر از روش‌های مبتنی بر مدل سیستم می‌باشند و پیاده سازی آن‌ها راحت‌تر است. این روش معمولا بر پایه کنترل‌کننده‌های بازخورد می‌باشد که تخمینی از حالات سیستم با بهره‌گیری از سیگنال خروجی حسگر‌ها انجام می‌شود تا بتوان ورودی کنترل‌کننده را تغذیه کرد و در نهایت کنترل‌کننده بتواند ارتعاشات بازو را حداقل کند. مشکل عمده این نوع کنترل، تاخیر ورودی در حلقه بازخورد است. در مرجع [11] از یک کنترل‌کننده پیش‌بین تطبیقی برای کنترل بازوی انعطاف‌پذیر استفاده شده است اما این در این مدل ورودی سیستم بهینه نمی‌باشد و به مدل سیستم بستگی دارد و نتایج این کنترل کننده را با کنترل‌کننده مرسوم PID و کنترل‌کننده تطبیقی غیر خطی مقایسه نموده است. در مرجع [12] کنترل کننده PID هوشمند به همراه با الگوریتم یادگیری تکراری را پیاده سازی نموده است که در این روش به مدل سیستم نیاز ندارد اما پارامترهای آن بهینه نمی‌باشند و به خوبی نمی‌تواند مسیری که برای آن تعریف شده است را دنبال کند. در مرجع [13]رویکرد کنترلی حداقل واریانس معمول را پیاده سازی کرده است این مدل به مدل نیار ندارد و قوام خوبی در برابر اغتشاشات خارجی از خود نشان می‌دهد، ولی نسبت به تعیین مقادیر اولیه حساس است. در مرجع [8] از کنترل‌کننده فازی عصبی برای کنترل بهره گرفته است که این کنترل‌کننده هم نیاز مدل ندارد اما ضرایب کنترل کننده بهینه نمی‌باشد و برای آموزش شبکه فازی نیاز به داده‌های کافی دارد.

# **ویژگی‌های پایان نامه**

همان‌طور که پیش‌تر گفتیم، هدف ما رسیدن به یک نقطه‌ی مطلوب و یا دنبال کردن یک مسیر مطلوب در صفحه در کمترین زمان ممکن با حداقل لرزش به شکل بهینه غیرخطی می‌باشد. در این پایان نامه هدف بهره مندی از یک کنترل‌کننده یادگیری تقویتی و استفاده از الگوریتم یادگیری Q می‌باشد که در این نوع از کنترل‌کننده به معادلات دینامیکی سیستم نیازی نیست، کنترل‌کننده باید مصرف انرژی را حداقل کند، نامعینی‌ها را جبران نماید و لرزش‌های ایجاد شده در بازوی ربات را به طور مطلوبی کاهش دهد. ثابت‌شده است که انواع مختلف الگوریتم‌های یادگیری تقویتی مانند تکرار سیاست و تکرار ارزش‌ها، می‌تواند یک راه‌حل مناسب و بهینه برای مسائل کنترل لرزش و ردیابی مسیر بهینه ایجاد کند. در این پایان‌نامه، مسیر موردنظر به‌صورت از پیش تعیین‌شده به ربات و کنترل‌کننده داده‌شده و همچنین اطلاعات میزان خمش ایجاد شده در بازوی ربات، سرعت و موقعیت ربات نیز از سنسورها خوانده‌شده و به کنترل‌کننده انتقال می‌یابند. که این اطلاعات دریافتی با تبدیلات لازم به موقعیت ربات تبدیل‌شده و با مسیر مطلوب مقایسه می‌شود تا کنترل‌کننده بتواند بهترین تصمیم را برای ادامه‌ی حرکت ربات بگیرد. بنابراین حرکت بعدی ربات با توجه به دو مورد زیر مشخص می‌شود:

* موقعیت فعلی ربات
* مسیر مطلوب داده‌شده به ربات

# **مراحل انجام پایان‌نامه و جدول‌بندی زمانی**

|  |  |
| --- | --- |
|  **زمان‌بندی** **مراحل کار** | ماه |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| تکمیل مطالعه موارد موردنیاز | ✓ | ✓ |  |  |  |  |
| طراحی کنترل‌کننده استفاده از یادگیری تقویتی |  | ✓ | ✓ |  |  |  |
| بررسی پایداری سیستم همراه با کنترل‌کننده به‌وسیله‌ی لیاپانف |  |  | ✓ | ✓ |  |  |
| اعمال روش پیشنهادی و مشاهده نتایج |  |  |  | ✓ | ✓ |  |
| نگارش پایان‌نامه |  |  |  |  | ✓ | ✓ |

# **امکانات مورد نیاز**

در راستای انجام این پروژه، امکاناتی چون رایانه، اینترنت و مراجع کتابخانه‌ای جهت پیشبرد مباحث نظری و امکاناتی همچون ربات بازوی انعطاف‌پذیر، ابزارهای اندازه‌گیری و سنسورها و موارد مرتبط با آن‌ها برای پیاده‌سازی عملی موردنیاز است.

**فهرست مراجع**

|  |  |
| --- | --- |
| [1]  | Y. Yi, H. Lee و C. Byung-Ju, “Stackable 4-BAR Manipulators for Single Port Access Surgery.,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics,* جلد 17, p. 157–166, Feb. 2012.  |
| [2]  | R. J. Caverly and J. R. Forbes, ““Dynamic modeling, trajectory optimization, and control of a flexible kiteplane,”,” جلد 25, p. 1297–1306, Jul. 2017..  |
| [3]  | H. G. C. Z. Y. L. Wei He, “Reinforcement Learning Control of a Flexible Two-Link Manipulator: An Experimental Investigation,” *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS: SYSTEMS,* May 03,2020 .  |
| [4]  | C.-Y. S. Z. L. a. F. Y. X. Chen, ““Design of implementable adaptive control for micro/nano positioning system driven by piezoelectric actuator,”,” *IEEE Trans. Ind. Electron,* جلد %1 از %2 63, no. 10, pp.,, p. 6471–6481, Oct. 2016..  |
| [5]  | M. B. a. G. L. Vey, “Control of flexible manipulators: A survey,” جلد 22, شماره 05, October 2004.  |
| [6]  | A. S. .. C. K. Y. Chang Tai Kiang, “ "Review of Control and Sensor System of Flexible Manipulator,",” *Springer Science+Business Media Dordrecht ,* 2014.  |
| [7]  | B. R. a. B. S. b. K. L. a, “A review on two-link flexible manipulators,” *Annual Reviews in Control,* 26 September 2016.  |
| [8]  | K. P. S. Y. V. Moudgal, “Rule-based control for a flexible-link robot Technol,” *IEEE Trans. Control Syst,* pp. 392-405, 1994.  |
| [9]  | K. G. V. H. M. a. F. L. L. B. Kiumarsi, “Optimal and Autonomous Control Using Reinforcement Learning: A Survey,” *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS AND LEARNING SYSTEMS,* جلد 29, شماره 6, pp. 2042-2062 , 7 12 2017.  |
| [10]  | T. C. F. L. L. Z. D. a. Y. J. J. Li, “Off-Policy Interleaved Q-Learning: Optimal Control for Affine Nonlinear Discrete-Time Systems,” *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS AND LEARNING SYSTEMS,* جلد 30, شماره 5, pp. 1308-1320, 2019.  |
| [11]  | B. S. S. K. Pradhan, “Nonlinear Adaptive Model Predictive Controller for a Flexible Manipulator: An Experimental Study,” *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY,* pp. 1-15, 2014.  |
| [12]  | J. O. P. ∗. R. V. Smith, “Real-Time Hybrid PID/ILC Control of Two-Link Flexible Manipulators,” *IFAC PapersOnLine,* pp. 145-150, 2017.  |
| [13]  | C. L. X.-m. Z. Z.-c. Qiu, “Experimental study on active vibration control for a kind of two-link flexible manipulator,” *Mechanical Systems and Signal Processing,* pp. 623-644, 2019.  |
| [14]  | A. S. .. C. K. Y. Chang Tai Kiang, "Review of Control and Sensor System of Flexible Manipulator," Springer Science+Business Media Dordrecht , 2014. |
| [15]  | ∗. B. R. a. B. S. b. K. Lochan a, “A review on two-link flexible manipulators,” *Annual Reviews in Control,* 26 September 2016.  |
| [16]  | M.-T. H. a. Y.-W. Tu, “Position control of a single-link flexible manipulatorusing H∞-based PID control,” *IEE ProcControl Theory Appl,* 2004.  |
| [17]  | K. P. S. Y. V.G. Moudgal, “ Rule-based control for a flexible-link robot Technol,” *IEEE Trans. Control Syst.,* pp. 392-405, 1994.  |

1. distributed parameter systems [↑](#footnote-ref-1)
2. partial differential equations(PDE) [↑](#footnote-ref-2)
3. **speediness** [↑](#footnote-ref-3)
4. **overshoot** [↑](#footnote-ref-4)
5. **Benosman** [↑](#footnote-ref-5)
6. **Chang Tai Kiang & Andrew Spowage & Chan Kuan Yoong** [↑](#footnote-ref-6)
7. **K. Lochan ,B.K. Roy, B. Subudhi** [↑](#footnote-ref-7)
8. Moudgal [↑](#footnote-ref-8)
9. **Reinforcement learning** [↑](#footnote-ref-9)
10. **Value function** [↑](#footnote-ref-10)
11. **Q learning** [↑](#footnote-ref-11)
12. **Heuristic dynamic programming** [↑](#footnote-ref-12)
13. **Adaptive critics** [↑](#footnote-ref-13)
14. **Non-affined** [↑](#footnote-ref-14)
15. **NASA** [↑](#footnote-ref-15)
16. **Candarm 1** [↑](#footnote-ref-16)
17. **Candarm 2** [↑](#footnote-ref-17)
18. - علاوه بر درجات آزادی صلب ربات، مثل متغیرهای زاویه‌ای در مفاصل، درجات آزادی الاستیک نیز وجود دارند که ناشی از تغییر شکل‌های الاستیک می‌باشند در حالی که فقط امکان استفاده از عملگر در مفاصل وجود دارد. [↑](#footnote-ref-18)
19. **model based approach** [↑](#footnote-ref-19)
20. **non- model based approach** [↑](#footnote-ref-20)