مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 1-8

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شناسایی و کنترل گشتاور عملگر سری الاستیک در ربات پوشیدنی اندام تحتانی

علی طاهری‌فر[1]، غلامرضا وثوقی[2*]، علی سلک‌غفاری[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشگاه صنعتی شریف، جزیره کیش
* تهران، صندوق پستی 5439148137، vossough@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 اردیبهشت 1396
پذیرش: 28 خرداد 1396
ارائه در سایت: 14 مرداد 1396

کلید واژگان:
کنترل گشتاور
عملگر سری الاستیک
اگزواسکلتون
شناسایی سیستم

چکیده

امروزه ربات‌های پوشیدنی به‌عنوان یک ابزار کارآمد در تمرینات توان‌بخشی و کمک به بیماران کم‌توان توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. تعامل نرم و سازگار با بیمار یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های ربات‌های پوشیدنی است. استفاده از عملگرهای سری- الاستیک ضمن تحقق این ویژگی مهم، قابلیت‌های دیگری مانند اندازه‌گیری و کنترل گشتاور را نیز فراهم می‌کنند. روش‌های کنترل گشتاور پیشین بیشتر از یک حلقه داخلی موقعیت و یک حلقه بیرونی نیرو بهره می‌برند. در این تحقیق ضمن استفاده از این دو حلقه تو در تو، دینامیک موتور و سیستم انتقال قدرت نیز در طراحی کنترلر استفاده شده است. در این مقاله ابتدا پارامترهای فنر سری- الاستیک، عملگر و لینک‌های ربات شناسایی شده‌اند. بر این مبنا دو کنترلر گشتاور مدل- مبنا یکی بر مبنای فرمان سرعت و دیگری بر مبنای فرمان جریان طراحی و ارائه شده است. بر خلاف روش‌های پیشین، کنترلرهای پیشنهادی برای هر دو حالت خروجی آزاد (امپدانس صفر) و خروجی قفل استخراج شده و آنالیز پایداری سیستم برای دو حالت یاد شده به طور مجزا ارائه شده است. در نهایت نتایج مقایسه‌ای تست تجربی بر ربات پوشیدنی دانشگاه صنعتی شریف ارائه شده است. نتایج تست تجربی این دو کنترلر نشان می‌دهد دقت ردیابی گشتاور بر مبنای جریان و سرعت به ترتیب برابر 1.2 به 0.2 نیوتن متر است.

Identification and Torque Control of Series Elastic Actuator of Lower Limb Extremity Exoskeleton

Ali Taherifar[1], Gholamreza Vossoughi[1*], Ali Selk Ghafari[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, International Campus, Kish Island, Iran.
* P.O.B. 5439148137, Tehran, Iran, vossough@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 May 2017
Accepted 18 June 2017
Available Online 05 August 2017

Keywords:
Torque Control
Series Elastic Actuator
Exoskeleton
System Identification

ABSTRACT

Todays, the exoskeleton is known as a practical device for use in robotic rehabilitation and elderly assistance and has attracted the attention of many researchers. One of the most important features of the exoskeleton robots is the compliant interaction with patient. The Series Elastic Actuators (SEA) not only interacts with human compliantly but also provide several advantages such as torque measurement and torque control. Previous researches have used an inner position loop and an outer force loop. In this paper, the motor and power transmission model is integrated in the controller design. In this paper, the parameters of the SEA, motor and links are identified first. Then, two model-based torque controls is designed and introduced based on the velocity and current commands. In contrast to previous research, the controller is proposed for the locked and free condition and the Lyapunov stability analysis is presented. Finally, the experimental validation test on the Sharif lower limb exoskeleton is presented for this controller. The experimental results of the controller show that the accuracy of torque control based on the current and velocity is 1.2 and 0.2 Nm, respectively.

1- مقدمه

استفاده از ربات‌های پوشیدنی جهت کمک به بیماران کم‌توان نیازمند یک تعامل نرم و هوشمندانه بین ربات و انسان است. به همین دلیل در ربات‌های پوشیدنی عمدتاً از عملگرهای سری الاستیک استفاده می‌شود. سیستم‌های کنترل گشتاور متنوعی برای عملگرهای سری الاستیک توسط محققین ارائه شده است. دسته نخست با اندازه‌گیری نیروی فنر و تنظیم نیروی موتور توسط انواع کنترلرهای مبتنی بر پی-آی-دی کنترل گشتاور را پیاده می‌کند [2,1]. از آن‌جایی که با افزایش اصطکاک و لقی سیستم استفاده از یک حلقه کنترلی منجر به ناپایداری خواهد شد لازم است از حلقه‌های داخلی موقعیت و سرعت و حلقه بیرونی گشتاور استفاده شود. این روش‌ها در دسته دوم جای می‌گیرد و توسط تعدادی از محققین مورد استفاده قرار گرفته است [3-5]. یت و همکاران از یک کنترلر پی-آی سرعت در حلقه داخلی استفاده کردند و نشان دادند که بسیاری از اثرات غیرخطی سیستم با این روش حذف می‌شود [6]. تورسون و همکاران نیز از روشی مشابه برای جبران اثرات غیرخطی سیستم استفاده کردند [7].

دسته سوم از دینامیک سیستم در کنار کنترلر پی-آی-دی برای بهبود

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Taherifar, Gh. Vossoughi, A. Selk Ghafari, Identification and Torque Control of Series Elastic Actuator of Lower Limb Extremity Exoskeleton, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 1-8, 2017 (in Persian)

پاسخ زمانی و فرکانسی سیستم کنترلی استفاده می‌کند [2]. پرت و ویلیامسون روشی برای کنترل گشتاور معرفی کردند که از معکوس دینامیک سیستم و کنترلر PID استفاده می‌کند [8]. روش پیشنهاد شده توسط این محققین با فرمان جریان و فیدبک موقعیت و مشتقات آن عمل می‌کند. ایراد این روش آن است که گشتاور داخلی ایجاد شده در اثر اصطکاک و دمپینگ سیستم انتقال قدرت ناچیز فرض شده است. این فرض منجر به کاهش پهنای باند سیستم می‌شود.

در این میان دسته چهارمی نیز وجود دارد که به کنترل گشتاور از طریق مشاهده‌گر اغتشاش می‌پردازند [9]. پاین و همکاران اثرات دینامیک مدل نشده را با پیاده‌سازی این روش حذف کردند. آن‌ها دقت ردیابی گشتاور، پهنای باند و مصرف انرژی را با اجرای این روش بر یک عملگر مطالعه کردند [11,10]. کونگ و همکاران طراحی و کنترل عملگر سری الاستیک را به روش مشاهده‌گر اغتشاش انجام دادند. آن‌ها مقاوم بودن سیستم را با تحلیل سیستم کنترل در حضور انسان به عنوان یک اغتشاش خارجی نشان دادند [12]. ونگ و همکاران یک مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی با استفاده از کنترل مود لغزشی در کنار مشاهده‌گر اغتشاش پیشنهاد کردند [13].

طبیعی است روش‌های دسته چهارم دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به سایر روش‌های کنترلی است.

کنترلر ارائه شده در این مقاله ترکیبی از روش‌های دسته دوم و سوم را به کار می‌گیرد. در این تحقیق ابتدا مدلی کامل از دینامیک موتور و سیستم انتقال قدرت ارائه شده، سپس پارامترهای این مدل با انجام تست‌های تجربی شناسایی شده است. این مدل شامل فنر سری- الاستیک، دینامیک سیستم انتقال قدرت و دینامیک لینک‌های ربات می‌شود. پس از آن دو کنترلر گشتاور مدل- مبنا با در نظر گرفتن دینامیک شناسایی شده سیستم طراحی و ارائه شده‌اند. یکی از این کنترلرها بر مبنای فرمان سرعت و دیگری فرمان جریان است. تفاوت دیگر این مقاله با تحقیقات گذشته در آن است که کنترلر پیشنهادی در دو حالت خروجی آزاد (امپدانس صفر) و خروجی قفل ارزیابی و تست‌های تجربی بر آن ارائه شده است، همچنین آنالیز پایداری سیستم برای دو حالت یادشده ارائه شده است. آنالیز پایداری ارائه شده بر مبنای تعریف یک تابع لیاپانوف صورت گرفته و با استفاده از این تابع لیاپانوف، صفر شدن خطای ردیابی سیستم تضمین شده است.

2- مشخصات ربات پوشیدنی شریف

از آن‌جایی که در سیستم‌های تعاملی با انسان امکان دستیابی به نتایج مورد اطمینان صرفاً با انجام شبیه‌سازی مسیر نیست، لازم است بستر تستی برای صحه‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی ایجاد شود. ربات پوشیدنی اندام تحتانی با این هدف در دانشگاه صنعتی شریف طراحی و ساخته شده است. مشخصات کلی ربات پوشیدنی دانشگاه شریف عبارت است از:

- امکان استفاده از ربات جهت کمک به افراد کم‌توان و همچنین افزایش قدرت در افراد سالم
- قابلیت اندازه‌گیری و کنترل گشتاور در مفاصل
- طراحی سبک و بدون لقی در سیستم انتقال قدرت
- ایجاد درجات آزادی غیرفعال برای کاهش نیروها و گشتاورهای تعاملی
- توانایی استفاده برای افراد با حداکثر وزن 85 کیلوگرم و قد 190 سانتی‌متر
- قابلیت تنظیم طول لینک‌ها و عرض لگن برای افراد مختلف
- قابلیت بالارفتن و پایین آمدن از پله و شیب، قابلیت نشستن و دور زدن

در این تحقیق با طراحی یک عملگر سری- الاستیک و ارائه یک روش نوین در کنترل گشتاور آن عملگر به تحقق هدف دوم پرداخته شده است.

2-1- ساختار سینماتیکی ربات

شکل 1 طرح نهایی و نمونه ساخته شده از ربات پوشیدنی شریف را نشان می‌دهد. در این شکل نحوه جانمایی عملگرهای زانو و لگن نشان داده شده است. درجات آزادی غیرفعال جهت افزایش تطابق سینماتیکی ربات و انسان و راحتی انسان در راه رفتن به ربات اضافه شده است. این ربات دارای دو درجه آزادی در مفصل لگن، یک درجه آزادی در مفصل زانو، دو درجه آزادی در مفصل مچ و یک درجه آزادی در پنجه است. علاوه‌بر این ربات دارای دو درجه آزادی قابل قفل شدن بر تنظیم فاصله بین مفصل مچ تا زانو و فاصله بین مفصل زانو تا لگن، دو درجه آزادی قابل قفل شدن برای تنظیم عرض و عمق لگن است.

محور فلکشن/ اکستنش لگن و زانو در میان این درجات آزادی فعال بوده و سایر مفاصل غیرفعال است؛ بنابراین در مجموع ربات دارای 16 درجه آزادی بوده که 4 درجه آن فعال، 8 درجه آن غیرفعال و 4 درجه آن برای تنظیم فواصل است.

2-2- سخت‌افزار و سنسورها

ساختار کلی سنسورینگ و نحوه ارتباط سخت‌افزار و نرم‌افزار ربات پوشیدنی در شکل 2 نشان داده شده است.

Fig. 1 Sharif powered exoskeleton robot for lower limb

شکل 1 تصویر ربات پوشیدنی اندام تحتانی شریف

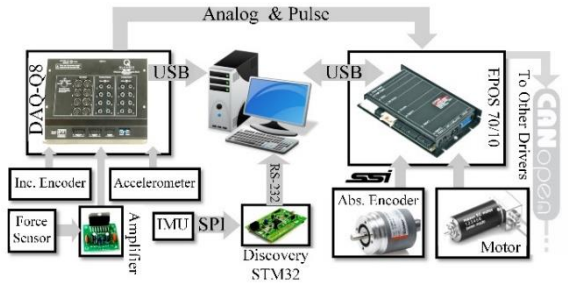

Fig. 2 Overview of the sensors and hardware of the control system

شکل 2 ساختار کلی سنسورها و سخت‌افزار کنترلی ربات

کارت اخذ اطلاعات کوانسر-USB-Q8، دارای 8 خروجی و ورودی آنالوگ، 8 خروجی و ورودی دیجیتال و 8 ورودی انکودر افزایشی است. این کارت سیگنال آنالوگ دریافتی از سنسورهای نیرو را با دقت 16 بیت به دیجیتال تبدیل می‌کند. در این ربات چهار نیروسنج کششی- فشاری مدل UMMA ساخت شرکت داسل، هر یک به ظرفیت 20 کیلوگرم در محل‌های اتصال انسان به ربات نصب شده‌اند. قرائت انکودر افزایشی (نصب شده در خروجی عملگر) از طریق کارت اخذ اطلاعات، و قرائت انکودر مطلق (نصب شده در پشت موتور) از طریق درایو 70/10 ایپوز) انجام می‌شود. انکودر افزایشی مدل EC35 و ساخت شرکت یواس دیجیتال و دارای رزولوشن 40 هزار پالس در هر دور است. انکودر مطلق مدل F3663 ساخت شرکت کوبلر و دارای رزولوشن 14 بیت است.

ارتباط رایانه با کارت اخذ اطلاعات از طریق USB با سرعت 8 کیلوهرتز است. این سرعت معادل حداقل زمان نمونه برداری 0.125 میلی‌ثانیه خواهد بود. ارتباط بین درایور موتورها از طریق شبکه CAN انجام شده است.

ارسال داده‌های مورد نیاز از درایور به رایانه از طریق USB و ارسال فرامین کنترلی از طریق سیگنال آنالوگ صورت می‌پذیرد.

علاوه‌بر این سیمولینک متلب به عنوان نرم‌افزار ارسال و دریافت اطلاعات است. نرم‌افزار کوآرک به عنوان یک افزونه در سیمولینک اضافه شده و امکان قرائت داده‌های کارت و ارسال فرامین به کارت را به راحتی فراهم می‌کند. امکان تنظیم دقیق زمان نمونه‌برداری از طریق تایمر کارت اخذ اطلاعات با استفاده از بلوک‌های زمان واقعی این افزونه فراهم خواهد شد.

3- مدل عملگر و سیستم انتقال قدرت

مدل عملگر و سیستم انتقال قدرت مفصل لگن ربات در شکل 3 نمایش داده شده است. از این شماتیک برای بیان پارامترها و توضیح استراتژی‌های کنترلی در بخش‌های آتی استفاده خواهد شد. در این شماتیک D نماد درایور، E نماد انکودر، M نماد موتور، L نماد بار و F نماد نیروسنج است. زاویه ورودی فنر با θ_m و زاویه خروجی آن با θ_l نام‌گذاری شده‌اند. ضریب سختی فنر پیچشی با K نشان داده شده و ضریب سختی تسمه تایم با K_{belt} نام‌گذاری شده است. به دلیل بالا بودن ضریب سفتی تسمه تایم می‌توان از وجود آن صرف‌نظر کرد. طبق اندازه‌گیری‌های صورت گرفته ضریب سختی تسمه تایم 3 برابر ضریب سختی فنر پیچشی است. نسبت تبدیل گیربکس هارمونیک درایو با N_1 و نسبت تبدیل تسمه تایم با N_2 نشان داده شده که در این ربات این دو پارامتر به ترتیب برابر 100 و 2 است.

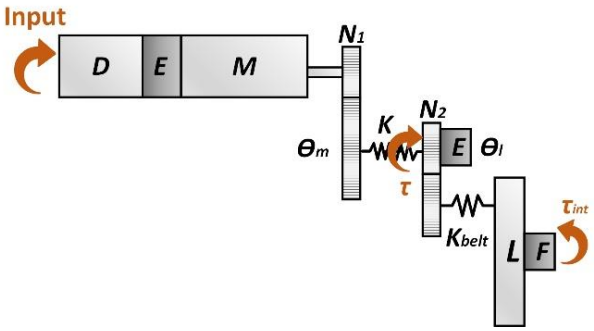

Fig. 3 Exoskeleton actuator and power train model, D is the symbol of Driver, E is the symbol of Encoder, M is the symbol of Motor, L is the symbol of Load and F is the symbol of Force sensor.

شکل 3 مدل عملگر و سیستم انتقال قدرت ربات پوشیدنی، D نماد درایـور، E نماد انکودر، M نماد موتور، L نماد بار و F نماد نیروسنج

در این شماتیک منظور از بار، اینرسی و اصطکاک لینک ربات است. چنان‌چه انسان نیز به ربات متصل شود، اینرسی انسان نیز به آن اضافه خواهد شد که در این مقاله موضوع بحث نیست.

4- شناسایی پارامترهای ربات پوشیدنی

4-1- شناسایی ضریب سختی فنر

فنر پیچشی در هر عملگر سری الاستیک قرار دارد. قرار دادن فنر در مسیر انتقال نیرو، شوک ناشی از ضربات را جذب کرده و امکان اندازه‌گیری گشتاور را فراهم می‌سازد. این فنر پیچشی در شکل 4 نمایش داده شده است. ضخامت این فنر پیچشی برابر 12 میلی‌متر، قطر آن 80 میلی‌متر و جنس آن فولاد VCN سخت‌کاری شده تا 45 راکول-C و میزان گشتاور قابل تحمل این فنر 33 نیوتن متر است.

همان طور که اشاره شد برای اندازه‌گیری زاویه پیچش فنر، در ورودی و خروجی آن از دو دورسنج استفاده شده است. به کمک این دو دورسنج میزان تغییر زاویه فنر به راحتی محاسبه شده و با ضرب این اختلاف دوران در ضریب سفتی فنر، مقدار گشتاور عبوری از فنر به صورت رابطه (1) به دست خواهد آمد.

$$\tau = K(\theta_m - \theta_l) \tag{1}$$

مشتق جزئی رابطه (1) به صورت رابطه (2) خواهد شد.

$$\delta\tau = K(\delta\theta_m - \delta\theta_l) \tag{2}$$

دقت انکودر مطلق پشت موتور برابر 0.22 میلی درجه (ورودی فنر) و دقت انکودر افزایشی برابر 9 میلی درجه (خروجی فنر) است. با در نظر گرفتن ضریب سختی به دست آمده از المان محدود، دقت اندازه‌گیری گشتاور این المان فنری برابر 0.0362 نیوتن متر خواهد شد که دقت مناسبی برای این کاربرد است. برای شناسایی دقیق ضریب سختی فنر و برازش یک چندجمله‌ای بر آن لازم است به میزان مشخص و قابل اندازه‌گیری به فنر گشتاور وارد شود. این کار با استفاده از یک نیروی افقی به لینک ربات و اندازه‌گیری آن توسط نیروسنج مطابق شکل 5 انجام شده است.

در این آزمایش موتور مفصل لگن قفل شده و در نتیجه زاویه قرائت شده از انکودر نسبی (θ_l) مشخص‌کننده میزان پیچش فنر بوده و گشتاور وارد شده به فنر نیز دقیقاً همان گشتاور نشان داده شده در شکل 5 است، زیرا نیروهای ناشی از اصطکاک ویسکوز به دلیل سرعت پایین بسیار ناچیز است. انعطاف‌پذیری تسمه تایم تأثیری در نتیجه آزمایش انجام شده ندارد.

بهترین برازش بر این نمودار یک چند جمله‌ای مرتبه 3 مطابق رابطه (3) است. پارامترهای این چند جمله‌ای در جدول 1 آورده شده است.

Fig. 4 Series Elastic Actuator (SEA) torsional spring

شکل 4 فنر پیچشی عملگر سری الاستیک

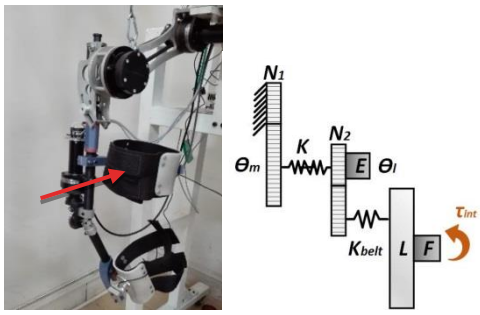

Fig. 5 Series Elastic Actuator torsional spring identification

شکل 5 آزمایش شناسایی ضریب سختی فنر پیچشی

$$\tau = a_1\Delta\theta^3 + a_2\Delta\theta^2 + a_3\Delta\theta + a_4 \quad (3)$$

شکل 6 نمودار گشتاور- موقعیت فنر پیچشی برای داده‌های واقعی و مقادیر شناسایی شده را نشان می‌دهد. هیسترزیس نمودار برای داده‌های واقعی ناشی از اصطکاک خشک مفصل و تسمه است.

معکوس رابطه (3) نیز به صورت تحلیلی قابل محاسبه است و منجر به یک رابطه غیرخطی خواهد شد. در معکوس این رابطه اختلاف زاویه دو سمت فنر به عنوان ورودی داده و گشتاور محاسبه می‌شود.

بدین ترتیب روشی برای شناسایی سختی فنر سری- الاستیک پیشنهاد و پارامترهای شناسایی شده برای فنر ربات پوشیدنی شریف ارائه شده است.

4-2- شناسایی پارامترهای عملگر سری الاستیک

از آن‌جایی که عملگر سهم قابل توجهی از گشتاور تولید شده را صرف غلبه بر اینرسی و اصطکاک خود می‌کند، شناسایی دقیق پارامترهای آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. یکی از مرسوم‌ترین روش‌های شناسایی پارامتری حداقل مربعات خطاست.

بخش عمده دینامیک عملگر، از 3 ترم اصلی اینرسی، اصطکاک ویسکوز و اصطکاک خشک مطابق رابطه (4) تشکیل شده است.

$$\tau_m - \frac{\tau}{N_1} = \tau_n = J_m\ddot{\theta}_m + b_m\dot{\theta}_m + c_m\mathrm{sign}(\dot{\theta}_m) \quad (4)$$

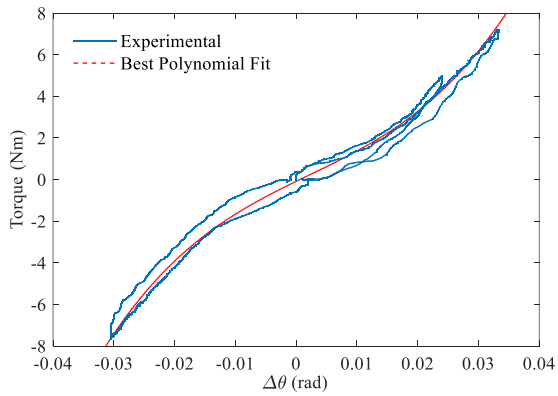

Fig. 6 Torque-position diagram of the torsional spring

شکل 6 نمودار گشتاور- موقعیت فنر پیچشی

جدول 1 پارامترهای چند جمله‌ای مرتبه 3 برای ضریب سختی فنر

Table 1 The parameters of the third order polynomial of spring stiffness

a_1	a_2	a_3	a_4
93484	596.85	142.41	-0.087556

در آن c_m, b_m, J_m به ترتیب اینرسی، ضریب اصطکاک ویسکوز و ضریب اصطکاک خشک عملگر بوده و گشتاور موتور برابر $\tau_m = K_t\eta i$ بوده که در آن η, K_t به ترتیب ثابت گشتاور و بازدهی موتور و همچنین τ گشتاور فنر است.

در یک آزمایش بر عملگر مفصل ران، ورودی سرعت شامل سیگنال جاروی فرکانسی، پله و سینوسی با دامنه‌های مختلف مطابق شکل 7 به سیستم داده شده است. به طور هم زمان موقعیت، سرعت و گشتاور موتور با نرخ نمونه برداری 5 میلی‌ثانیه ذخیره و نتایج این آزمایش در شکل 7 نشان داده شده است. گشتاور موتور نشان داده شده در این شکل همان τ_n است. این آزمایش بازه سرعتی 1500- تا 1500 دور بر دقیقه سمت موتور و بازه موقعیتی 40- تا 60 درجه در خروجی عملگر را پوشش می‌دهد. غنی بودن سیگنال ورودی در این شناسایی منجر به کاهش میانگین مربعات خطا به کمتر از 0.03 نیوتن متر شده است.

پارامترهای شناسایی شده عملگر و لینک‌های ربات در جدول 2 نشان داده شده است.

4-3- شناسایی پارامترهای لینک ربات

برای شناسایی لینک‌های ربات از داده‌های آزمایش مربوط به شناسایی عملگر

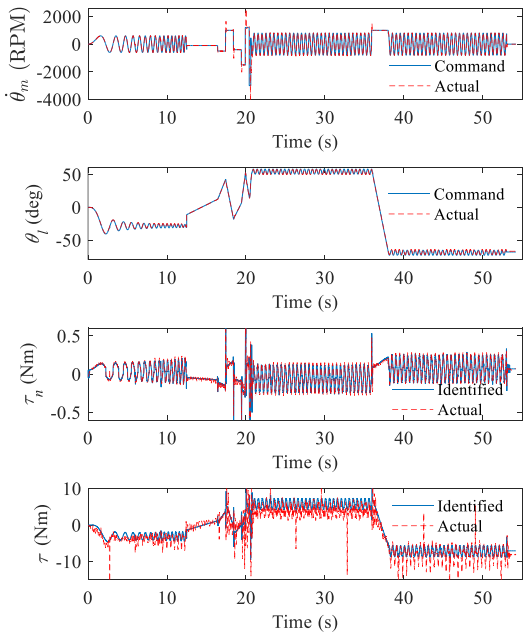

Fig. 7 The command and actual value of the velocity, position, motor torque and load torque

شکل 7 نمودار مقدار فرمان داده شده و واقعی سرعت موتور، موقعیت خروجی، گشتاور موتور و گشتاور بار

جدول 2 پارامترهای شناسایی شده عملگر و لینک

Table 2 Identified parameters of the actuator and link

پارامتر	مقدار
J_m (kgm^2)	0.0000892
b_m (Nm/s)	0.000899
c_m (Nm)	0.05048
J_l (kgm^2)	0.22624
b_l (Nm/s)	3.1546
m_l (kg)	5.9357

استفاده می‌کنیم. دینامیک لینک‌های ربات مطابق رابطه (5) از سه بخش اینرسی، اصطکاک ویسکوز و گرانش به صورت رابطه (5) تشکیل شده است.

$$\tau = J_l \frac{\ddot{\theta}_l}{N_2^2} + b_l \frac{\dot{\theta}_l}{N_2^2} + \frac{m_l g l}{N_2} \sin(\frac{\theta_l}{N_2}) \tag{5}$$

در آن τ گشتاور فنر بوده و از رابطه (1) به دست می‌آید. در این رابطه m_l, b_l, J_l به ترتیب ضریب اینرسی لینک، ضریب ویسکوز لینک و جرم لینک است. پارامترهای شناسایی شده در جدول 2 نشان داده شده است. پارامتر اینرسی محاسبه شده با مقادیر به دست آمده از مدل‌سازی مکانیکی لینک ربات مطابقت دارد.

5- کنترل گشتاور

یکی از اصلی‌ترین مزایای عملگرهای سری- الاستیک امکان کنترل گشتاور در خروجی است. دلیل ایجاد این مزیت وجود فنر پیچشی است که با اندازه‌گیری پیچش آن می‌توان فیدبک گشتاور را در خروجی به دست آورد. در صورتی که این فنر پیچشی وجود نداشته باشد، کنترل گشتاور تنها از طریق فیدبک جریان امکان‌پذیر است که کیفیت کنترلی خوبی را به همراه نخواهد داشت.

بنیان و اساس بسیاری از حلقه‌های کنترلی موقعیت و سرعت، کنترل گشتاور بوده و طراحی یک کنترل‌کننده با دقت ردیابی بالا، پهنای باند بالا، پایدار و مقاوم منجر به دستیابی به نتایج بهتر در حلقه‌های بیرونی خواهد شد. ارزیابی کیفیت کنترل گشتاور در دو وضعیت صورت خواهد گرفت. این دو وضعیت عبارت است از:

- عملگر در حالت قفل
- عملگر در حالت امپدانس صفر

این دو وضعیت در شکل 8 نشان داده شده‌اند. در حالت قفل خروجی عمگر ثابت شده و دو پارامتر کیفیت ردیابی و پهنای باند مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. در این حالت ورودی مطلوب کنترلی، یک سیگنال جاروی فرکانسی با دامنه ثابت 1 نیوتن- متر و فرکانس بین 0.1-20 هرتز است. مزید سیگنال جاروی فرکانسی آن است که در نهایت منجر به تعیین پهنای باند سیستم کنترلی خواهد شد. در حالت امپدانس صفر، خروجی عملگر باز و مقدار مطلوب حلقه گشتاور، بر صفر تنظیم شده است. در این حالت ورودی مطلوب کنترلی برابر صفر است و کنترلر سعی می‌کند که گشتاور عملگر را در حضور اغتشاشات خارجی صفر نگه دارد. در امپدانس صفر کاربر لینک ربات را حرکت داده و ربات بدون مقاومت با کاربر همراهی می‌کند. نکته نهایی که لازم است در این‌جا اشاره شود آن است که در استخراج معادلات و قانون کنترلی، فنر پیچشی به صورت خطی فرض می‌شود، اما در تست‌های آزمایشگاهی بر ربات و در محاسبه فیدبک گشتاور، از رابطه غیرخطی (3) استفاده شده است.

5-1- کنترل گشتاور با سرعت (نوع 1)

کنترل گشتاور از طریق فرمان سرعت روشی قابل اعتماد است. چرا که حلقه کنترل سرعت در درایور بسته شده و سرعت اجرای این حلقه در درایور بسیار بالاست. یک ایراد اصلی که متوجه این روش است که ترم‌های پیشخور تعریف شده در حلقه کنترل سرعت درایور، نمی‌توانند به طور کامل جبران‌کننده اصطکاک خشک سیستم باشند.

ابتدا فرض می‌کنیم که تابع تبدیل بین سرعت فرمان داده شده به موتور و سرعت خروجی موتور برابر $1/(\tau_a s + 1)$ باشد. این بدان معنی است که تا

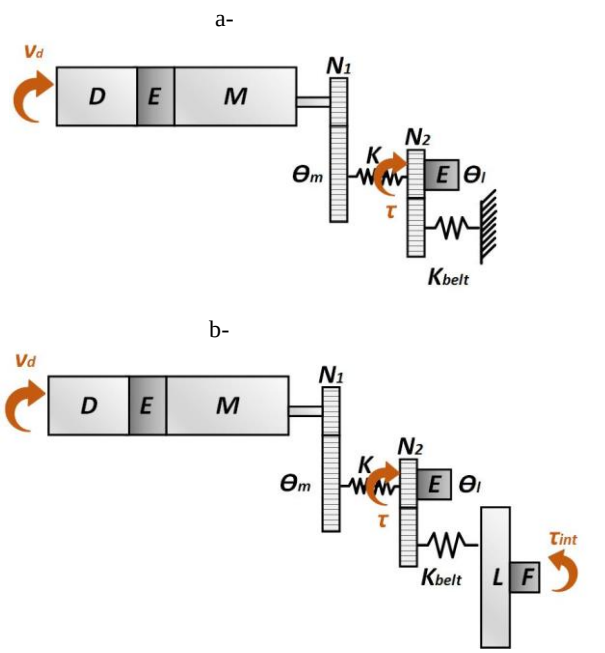

Fig. 8 a- Actuator locked configuration, b- Actuator unlocked configuration

شکل 8 الف- وضعیت عملگر در حالت قفل، ب- وضعیت عملگر در حالت امپدانس صفر

زمانی که به اشباع سرعت و شتاب موتور نرسیده‌ایم سرعت موتور در مدت زمان τ_a ثانیه به 66% سرعت فرمان داده شده می‌رسد و در نهایت برابر آن خواهد شد. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته، مقدار پارامتر τ_a در سیستم حاضر برابر 0.08 ثانیه است.

چنان‌چه در حالت قفل (شکل 8-a) معادلات سیستم را بنویسیم به صورت رابطه (6) خواهیم داشت.

$$\begin{Bmatrix} \tau_a \dot{v} + v = v_d \\ v = N_1 \dot{\theta}_m \\ K\theta_m = \tau \end{Bmatrix} \rightarrow \frac{N_1}{K}\tau_a \ddot{\tau} + \frac{N_1}{K}\dot{\tau} = v_d \tag{6}$$

در آن v_d, v به ترتیب سرعت واقعی موتور و سرعت فرمان به موتور است. K نیز ضریب سختی فنر پیچشی است. چنان‌چه متغیرهای حالت را به صورت $x_1 = \tau_d - \tau$ و $x_2 = \dot{\tau}_d - \dot{\tau}$ انتخاب کنیم رابطه (7) را خواهیم داشت.

$$\dot{x}_1 = x_2$$
$$\dot{x}_2 = \ddot{\tau}_d + \frac{\dot{\tau}_d}{\tau_a} - \frac{x_2}{\tau_a} - \frac{K}{N_1 \tau_a} v_d \tag{7}$$

با انتخاب تابع لیاپانوف $V = (1/2)x_1^2 + (1/2)x_2^2$ و مشتق‌گیری از آن سرعت فرمان به موتورها به صورت رابطه (8) به دست می‌آیند.

$$v_d = \frac{N_1 \tau_a}{K} x_1 + \Omega x_2 + \frac{N_1}{K}\dot{\tau}_d + \frac{N_1 \tau_a}{K}\ddot{\tau}_d \tag{8}$$

قانون کنترلی به دست آمده در رابطه (8) شامل دو عبارت تناسبی-مشتق‌گیر و دو عبارت پیشخور است. ترم اول پیشخور به میزان گشتاور تقسیم بر ضریب سختی، به موقعیت موتور اضافه می‌کند و ترم دوم پیشخور جبران‌کننده زمان پاسخ سیستم خواهد بود. دیاگرام بلوکی حلقه کنترل گشتاور با سرعت (نوع 1) در شکل 9 نمایش داده شده است.

چنان‌چه از ترم دو پیشخور صرف‌نظر شود، تابع تبدیل حلقه بسته سیستم به صورت رابطه (9) خواهد شد (در صورتی که صرف‌نظر نشود، تابع تبدیل برابر 1 خواهد شد).

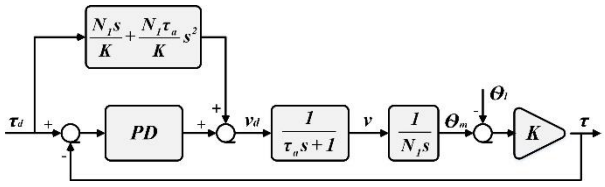

Fig. 9 The block diagram of the torque controller with velocity (Type1)

شکل 9 دیاگرام بلوکی حلقه کنترل گشتاور با سرعت (نوع 1)

$$\frac{\tau}{\tau_d}=\frac{(KK_d+N_1)s+KK_p}{N_1\tau_a s^2+(KK_d+N_1)s+KK_p} \tag{9}$$

در آن K_d, K_p ضریب تناسبی و مشتق‌گیر کنترلر PD است. در این حالت $\theta_l=0$ است، زیرا خروجی فنر قفل شده و ضریب سختی تسمه بی‌نهایت فرض شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود این سیستم نیازی به کنترلر انتگرالی نداشته و خطای حالت ماندگار آن برابر صفر است. حال برای تنظیم ضرایب کنترلر، مخرج تابع تبدیل سیستم مدار بسته (9) را برابر $s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2$ قرار داده و ضرایب تناسبی و مشتق‌گیر را براساس انتخابی که روی ξ و ω_n انجام می‌دهیم، تعیین می‌کنیم.

$$K_p=\frac{N_1\tau_a\omega_n^2}{K}$$
$$K_d=\frac{2\xi\sqrt{N_1\tau_a KK_p}-N_1}{K} \tag{10}$$

نتایج تست تجربی این قانون کنترلی در شکل 10 نشان داده شده است. ضریب کنترل تناسبی و مشتق‌گیر به ترتیب برابر 3700 و 18 قرار داده شده‌اند. سیگنال فرمان، یک سیگنال با دامنه ثابت 1 نیوتن- متر و فرکانس 0.1- 20 هرتز است. خطای ردیابی گشتاور در بالاترین فرکانس کمتر از 0.1 نیوتن- متر است. این بدان معنی است که پهنای باند سیستم کنترل مدارسته بالاتر از 20 هرتز است. با توجه به این‌که پهنای باند مفاصل انسان بین 4-8 هرتز این پهنای باند برای تعامل با انسان بسیار مناسب است [14].

چنان‌چه در حالت امپدانس صفر (شکل 8-b) معادلات سیستم را به صورت رابطه (11) بنویسیم.

$$\begin{Bmatrix}\tau_a\dot{v}+v=v_d\\ v=N_1\dot{\theta}_m\\ K(\theta_m-\theta_l)=\tau\end{Bmatrix}\rightarrow\frac{N_1\tau_a}{K}\ddot{\tau}+N_1\tau_a\ddot{\theta}_l+\frac{N_1}{K}\dot{\tau}+N_1\dot{\theta}_l=v_d \tag{11}$$

در این معادله فرض شده که ضریب سختی تسمه بی‌نهایت است. از طرفی معادله دینامیکی بعد از فنر به صورت رابطه (12) نوشته خواهد شد.

$$\tau=\frac{1}{N_2^2}(J_1\ddot{\theta}_l+b_l\dot{\theta}_l)+\frac{1}{N_2}(m_l gl\sin\left(\frac{\theta_l}{N_2}\right)+\tau_{int}) \tag{12}$$

در آن J_l, b_l به ترتیب ضریب دمپینگ و اینرسی لینک است. اگر رابطه (12) را برحسب $\ddot{\theta}_l$ بازنویسی کنیم رابطه (13) را به صورت زیر خواهیم داشت.

$$\ddot{\theta}_l=\frac{N_2^2}{J_l}\tau-\frac{b_l}{J_l}\dot{\theta}_l-\frac{N_2}{J_l}(m_l gl\sin\left(\frac{\theta_l}{N_2}\right)+\tau_{int}) \tag{13}$$

بدین ترتیب می‌توان با انتخاب متغیرهای حالت به صورت $x_1=\tau_d-\tau$ و $x_2=\dot{\tau}_d-\dot{\tau}$، $x_3=\theta_l$ و $x_4=\dot{\theta}_l$ و ترکیب معادلات (12,11) رابطه (14) را خواهیم داشت.

$$\dot{x}_1=x_2$$
$$\dot{x}_2=\ddot{\tau}_d+\frac{K}{\tau_a N_1}\left[-v_d+\frac{N_1}{K}(\dot{\tau}_d-x_2)+N_1x_4\right]+\frac{KN_2^2}{J_l}\left(\tau_d-x_1-\frac{b_l}{N_2^2}x_4-\frac{m_l gl}{N_2}\sin\left(\frac{x_3}{N_2}\right)-\frac{\tau_{int}}{N_2}\right)$$
$$\dot{x}_3=x_4$$
$$\dot{x}_4=\frac{N_2^2}{J_l}(\tau_d-x_1)-\frac{b_l}{J_l}x_4-\frac{N_2}{J_l}\left(m_l gl\sin\left(\frac{x_3}{N_2}\right)+\tau_{int}\right) \tag{14}$$

در نتیجه با انتخاب تابع لیاپانوف مثبت معین $V=(1/2)x_1^2+(1/2)\frac{1}{2}x_2^2+(1/2)\frac{1}{2}x_3^2+(1/2)x_4^2$ و مشتق‌گیری از آن، قانون کنترلی به صورت رابطه (15) خواهد شد.

$$v_d=\left(\frac{\tau_a N_1}{K}-\frac{\tau_a N_1 N_2^2}{J_l}\right)x_1+\frac{N_1}{K}(\tau_a\ddot{\tau}_d+\dot{\tau}_d-x_2)+\frac{\tau_a N_1 N_2^2}{J_l}\tau_d+\left(N_1-\frac{\tau_a N_1 b_l}{K}\right)x_4-\Omega\frac{x_1^2}{x_2}-\frac{\tau_a N_1 N_2}{J_l}-\frac{\tau_a N_1 N_2}{J_l}\left(m_l gl\sin\left(\frac{x_3}{N_2}\right)+\tau_{int}\right)+\frac{\tau_a N_1}{K}\frac{x_3x_4}{x_2}+\frac{\tau_a N_1}{Kx_2}\left(\frac{N_2^2}{J_l}(\tau_d-x_1)x_4-\frac{b_l}{J_l}x_4^2-\frac{N_2}{J_l}m_l glx_4\sin\left(\frac{x_3}{N_2}\right)-\frac{N_2}{J_l}x_4\tau_{int}\right) \tag{15}$$

با انتخاب این قانون کنترلی مشتق تابع لیاپانوف به صورت $\dot{V}=-\Omega x_1^2$ خواهد شد که نشان می‌دهد، $\dot{V}$ منفی نیمه معین است. در نتیجه با توجه به این‌که V نیز مثبت معین است می‌توان نتیجه گرفت که سیستم حلقه بسته پایدار است و متغیرهای حالت محدود باقی می‌مانند. حال برای این‌که نشان دهیم متغیر حالت x_1 به سمت صفر می‌روند، از لم باربالت استفاده می‌کنیم. در سیستم کنترلی کنونی، $\ddot{V}=-2\Omega x_1\dot{x}_1=-2\Omega x_1x_2$ و از آن‌جایی که متغیرهای حالت محدود است، تابع $\ddot{V}$ نیز محدود خواهد بود و در نتیجه $\dot{V}$ پیوسته یکنواخت است. در نتیجه $-\Omega x_1^2\rightarrow 0$ که این نشان‌دهنده آن است که $x_1\rightarrow 0$ و خطای ردیابی گشتاور برابر صفر خواهد شد.

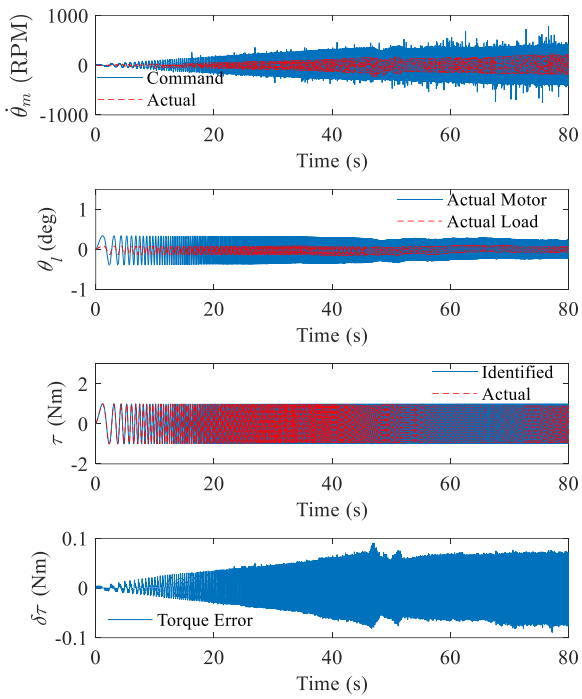

Fig. 10 The velocity, position, torque and torque error in experimental test of the torque controller with velocity (Type 1)-Locked

شکل 10 نمودار سرعت، موقعیت، گشتاور و خطای گشتاور در آزمایش تجربی کنترل گشتاور با سرعت (نوع 1) در حالت قفل

در این سیستم کنترلی سهم زیادی از قانون کنترلی را ترم‌های مربوط به گرانش تشکیل می‌دهند و امکان خطی‌سازی این ترم‌ها در محدوده گسترده حرکتی ربات وجود نداشته و نمی‌توان تابع تبدیل سیستم مدار بسته را در این حالت استخراج کرد.

نتایج تست تجربی قانون کنترلی (15) با در نظر گرفتن ترم N_1x_4 و با استفاده از کنترل تناسبی- مشتق‌گیر بر ربات در شکل 11 نشان داده شده است. ضرایب کنترل تناسبی و مشتق‌گیر به ترتیب 293 و 3.7 قرار داده شده‌اند.

این آزمایش با سرعت 500 هرتز (نرخ نمونه برداری 2 میلی‌ثانیه) انجام شده است. در حرکت دلخواهی که به ربات داده شده است، سرعت موتور تا 1200 دور بر دقیقه افزایش یافته است در حالی که جذر میانگین خطای ردیابی گشتاور برابر 0.13 نیوتن- متر و پیک آن در حدود 1.5 نیوتن متر است. این پیک‌ها زمانی دیده می‌شوند که سرعت به پیک لحظه‌ای خود رسیده و تغییر جهت می‌دهد. دلیل این موضوع را می‌توان در دقیق نبودن مدل مرتبه اول در نظر گرفته شده برای سیستم کنترل سرعت دانست.

5-2- کنترل گشتاور با جریان (نوع 2)

در این بخش گشتاور خروجی با ارسال فرمان جریان به موتور کنترل شده است. ابتدا معادلات سیستم را در حالت قفل به صورت رابطه (16) می‌نویسیم.

$$J_mN_1^2\ddot{\theta}_m + b_mN_1^2\dot{\theta}_m + c_m\mathrm{sign}(\dot{\theta}_m) + K\theta_m = \beta i$$
$$\tau = K\theta_m \tag{16}$$

در آن $\beta = K_t\eta i$ و J_m، b_m و c_m به ترتیب اینرسی، ضریب دمپینگ ویسکوز و خشک موتور و گیربکس است. در استخراج این معادلات فرض شده ضریب سختی تسمه بی‌نهایت است. اگر معادلات را برحسب گشتاور بنویسیم رابطه (17) را خواهیم داشت.

$$J_mN_1^2\ddot{\tau} + b_mN_1^2\dot{\tau} + c_mK\mathrm{sign}\left(\frac{\tau}{K}\right) + K\tau = \beta iK \tag{17}$$

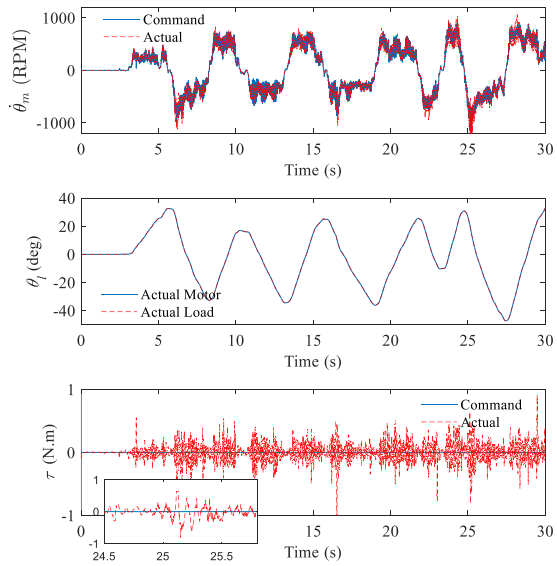

Fig. 11 The velocity, position, torque and torque error in experimental test of the torque controller with velocity (Type 1)-Zero impedance

شکل 11 نمودار سرعت، موقعیت، گشتاور و خطای گشتاور در آزمایش تجربی کنترل گشتاور با سرعت (نوع1) در حالت امپدانس صفر

چنان‌چه این معادله را برحسب متغیرهای حالت $x_1 = \tau_d - \tau$ و $x_2 = \dot{\tau}_d - \dot{\tau}$ بازنویسی کنیم و تابع لیاپانوف $V = (1/2)x_1^2 + (1/2)x_2^2$ را انتخاب کنیم، قانون کنترلی به صورت رابطه (18) به دست می‌آید.

$$i = \left(\frac{J_mN_1^2 - K}{\beta K}\right)x_1 + \Omega x_2 + \frac{1}{\beta}\tau_d + \frac{b_mN_1^2}{\beta K}\dot{\tau}_d + \frac{J_mN_1^2}{\beta K}\ddot{\tau}_d + \frac{c_mN_1}{\beta}\mathrm{sign}\left(\frac{\tau}{K}\right) \tag{18}$$

قانون کنترلی بالا شامل یک کنترل‌کننده تناسبی- مشتق‌گیر و مجموعه‌ای از ترم‌های پیشخور برای جبران اثرات اینرسی و اصطکاکی عملگر است. این اثرات را با شناسایی صورت گرفته بر عملگر می‌توان خنثی کرد. به عبارت دیگر یک راه جبران این اثرات استفاده از بخش پیشخور رابطه (18) است. شکل 12 دیاگرام بلوکی سیستم کنترل گشتاور با جریان (نوع 2) را با حذف اثر غیرخطی اصطکاک خشک نشان می‌دهد. فرمان به سیستم از نوع جریان و این جریان از دو بخش فیدبک و فید فوروارد مطابق رابطه (18) تشکیل شده است.

چنانچه اندازه ضریب سختی تسمه بی‌نهایت فرض نشود باید به جای K در قانون کنترلی (18) مقدار $K_{belt} + N_2^2K/KK_{belt}$ را قرار داد.

در حالتی که مطابق شکل 8-b، امپدانس صفر باشد، معادلات سیستم به صورت رابطه (19) خواهد شد.

$$J_mN_1^2\ddot{\theta}_m + b_mN_1^2\dot{\theta}_m + c_m\mathrm{sign}(\dot{\theta}_m) + K\theta_m = \beta i$$
$$\tau = K(\theta_m - \theta_l) \tag{19}$$

حال با طی کردن رویه‌ای مشابه با بخش قانون کنترلی نوع 1، معادلات سیستم را استخراج کرده و قانون کنترلی نوع 2 را به صورت رابط (20) محاسبه می‌کنیم.

$$\begin{aligned} i = {} & \frac{1}{\beta}\left(\frac{J_mN_1^2}{K}\ddot{\tau}_d + \left(\frac{J_mN_1^2N_2^2}{J_l} + b_mN_1^2 + 1\right)\tau_d\right) + \\ & \frac{1}{\beta}\left(-\frac{J_mN_1^2b_l}{J_l} + b_mN_1^2\right)x_4 + \frac{1}{\beta}\left(+c_mN_1\mathrm{sign}\left(\frac{\tau_d - x_2}{K} + x_4\right)\right) + \\ & \frac{1}{\beta}\left(-m_lgl\frac{J_mN_1^2N_2}{J_l}\sin\left(\frac{x_3}{N_2}\right) - \frac{J_mN_1^2N_2}{J_l}\tau_{int}\right) + \\ & \frac{1}{\beta}\left(b_mN_1^2x_2 + \frac{J_mN_1^2}{K}\frac{x_3x_4}{x_2} - \Omega\frac{x_1^2}{x_2} + \left(\frac{J_mN_1^2}{K} - \frac{J_mN_1^2N_2^2}{J_l} - 1\right)x_1\right) \\ & \frac{J_mN_1^2N_2^2}{\beta KJ_lx_2}\left(\tau_dx_4 - x_1x_4 - \frac{b_l}{N_2^2}x_4^2 - \frac{m_lglx_4}{N_2}\sin\left(\frac{x_3}{N_2}\right) - \frac{\tau_{int}x_4}{N_2}\right) \end{aligned} \tag{20}$$

این قانون کنترلی از نظر ساختاری بسیار شبیه به قانون کنترلی به دست آمده در حالت قفل است. مشتق تابع لیاپانوف با اعمال این قانون کنترلی به صورت $\dot{V} = -\Omega x_1^2$ خواهد شد که منفی نیمه معین و نشان می‌دهد که سیستم کنترلی حلقه بسته پایداری است و متغیرهای حالت محدود باقی می‌مانند.

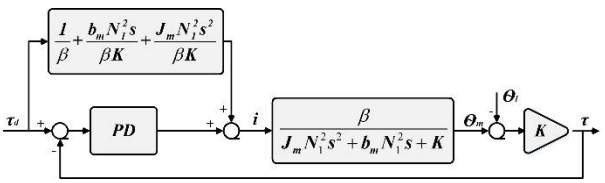

Fig. 12 The block diagram of the torque controller with current (Type2)

شکل 12 دیاگرام بلوکی حلقه کنترل گشتاور با جریان (نوع2)

همان طوری که در روش کنترل گشتاور نوع 1 نیز بیان شد، برای نشان دادن صفر شدن خطای ردیابی گشتاور از لم باربالت استفاده می‌شود. با توجه به این‌که $\dot{V} = -2\Omega x_1 \dot{x}_1 = -2\Omega x_1 x_2$ محدود است، $\dot{V}$ پیوسته یکنواخت بوده و طبق لم باربالت با گذشت زمان $x_1 \to 0$ میل خواهد کرد و این نشان دهنده صفر شدن خطای ردیابی گشتاور است.

نتیجه اعمال قانون کنترلی در حالت ساده شده به صورت نشان داده شده در شکل 13 خواهد شد. خطای کنترل گشتاور در مقایسه با روش نوع 1 بدتر شده و جذر میانگین مربعات خطا آن کمتر 1.2 نیوتن- متر است. فرامین جریان در این آزمایش از طریق سیگنال آنالوگ به درایور داده شده و سرعت اجرای این حلقه 500 هرتز است. پرش‌های ناگهانی در گشتاور ناشی از پرش‌های ناگهانی سیگنال موقعیت پشت موتور است. این سیگنال از طریق پورت USB فرستاده شده و در برخی زمان‌ها به مدت 50-70 میلی‌ثانیه سیگنال ارسال نمی‌شود (در این وضعیت ZOH عمل می‌کند) و به ناگهان به مقدار جدید پرش می‌نماید.

این طور می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از کنترلر گشتاور نوع 1 نتایج بهتری از نظر دقت ردیابی و پهنای باند خواهد داشت. دلیل اصلی این موضوع بالاتر بودن سرعت حلقه کنترل سرعت در درایور نسبت به رایانه است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی دو کنترلر گشتاور بر مبنای یک مدل شناسایی شده از عملگر سری- الاستیک پرداخته شده است. شناسایی عملگر سری- الاستیک نشان می‌دهد که عمده گشتاور صرف غلبه بر اصطکاک عملگر شده و بخش اندکی از گشتاور صرف غلبه بر اینرسی لینک‌های ربات می‌شود. نتایج نشان داد که استفاده از مدل دینامیکی عملگر سری- الاستیک منجر به طراحی یک سیستم کنترلی دقیق‌تر خواهد شد. در این تحقیق برخلاف تحقیقات پیشین طراحی قانون کنترلی برای دو حالت امپدانس صفر و حالت قفل بر مبنای روش لیاپانوف انجام و این روش تضمین‌کننده پایداری روش کنترلی ارائه شده است. در نهایت این دو کنترلر بر عملگر سری- الاستیک ربات پوشیدنی شریف پیاده‌سازی و نتایج آن با هم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که کنترلر بر مبنای فرمان سرعت، دقت ردیابی بالاتری نسبت به کنترلر بر مبنای جریان دارد. در ادامه این پژوهش می‌توان مقایسه‌ای بین روش‌های مبتنی بر مشاهده‌گر اغتشاش و روش ارائه شده در این مقاله انجام داد.

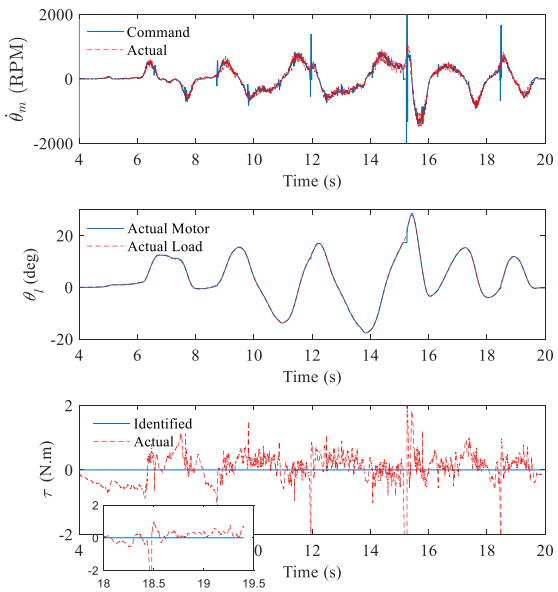

Fig. 13 The velocity, position, torque and torque error in experimental test of the torque controller with velocity (Type 2)-Zero impedance

شکل 13 نمودار سرعت، موقعیت، گشتاور و خطای گشتاور در آزمایش تجربی کنترل گشتاور با سرعت (نوع 2) در حالت امپدانس صفر

7- مراجع

[1] D. Ragonesi, S. Agrawal, W. Sample, T. Rahman, Series elastic actuator control of a powered exoskeleton, *33d Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Boston, MA, USA: IEEE, pp. 3515-3518, 2011.

[2] J. W. Hurst, J. E. Chestnutt, A. A. Rizzi, The actuator with mechanically adjustable series compliance, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26, No. 4, pp. 597-606, 2010.

[3] G. A. Pratt, P. Willisson, C. Bolton, A. Hofman, Late motor processing in low-impedance robots: Impedance control of series-elastic actuators, *Proceedings of the American Control Conference*, Boston: IEEE, Vol. 4, pp. 3245-3251, 2004.

[4] C. Lagoda, A. C. Schouten, A. H. Stienen, E. E. Hekman, H. van der Kooij, Design of an electric series elastic actuated joint for robotic gait rehabilitation training, *3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, Tokyo, Japan: IEEE, pp. 21-26, 2010.

[5] H. Vallery, R. Ekkelenkamp, H. Van Der Kooij, M. Buss, Passive and accurate torque control of series elastic actuators, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA: IEEE, pp. 3534-3538, 2007.

[6] G. Wyeth, Control issues for velocity sourced series elastic actuators, *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation*, Auckland, New Zealand, 2006.

[7] I. Thorson, D. Caldwell, A nonlinear series elastic actuator for highly dynamic motions, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Francisco, CA, USA: IEEE, pp. 390-394, 2011.

[8] G. A. Pratt and M. M. Williamson, Series elastic actuators, *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Pittsburgh, PA: IEEE, pp. 399-406, 1995.

[9] E. Sariyildiz, G. Chen, H. Yu, An Active Disturbance Rejection controller design for the robust position control of Series Elastic Actuators, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, Korea: IEEE, pp. 266-272, 2016.

[10] N. Paine, J. S. Mehling, J. Holley, N. A. Radford, et al., actuator control for the nasa-jsc valkyrie humanoid robot: a decoupled dynamics approach for torque control of series elastic robots, *Field Robotics*, Vol. 32, No. 3, pp. 378-396, 2015.

[11] N. Paine, S. Oh, L. Sentis, Design and control considerations for high-performance series elastic actuators, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 3, pp. 1080-1091, 2014.

[12] K. Kong, J. Bae, M. Tomizuka, mechatronic considerations for actuation of human assistive wearable robotics: robust control of a series elastic actuator, *Intelligent Assistive Robots*, pp. 401-429, Switzerland: Springer, 2015.

[13] M. Wang, L. Sun, W. Yin, S. Dong, J. Liu, Nonlinear disturbance observer based torque control for series elastic actuator, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, Korea: IEEE, pp. 286-291, 2016.

[14] D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, pp.110:400, USA: Wiley, 2009.