

## Vibration control of Bilateral Nonlinear Telesurgical System for Flexible Link Slave Robot

M. Yaryan<sup>1</sup>, M. Naraghi<sup>2\*</sup>, S. M. Rezaei<sup>3</sup>, M. Zareinejad<sup>4</sup>, H. Ghafarirad<sup>5</sup>

<sup>1</sup>M.Sc, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, r.yaryan@aut.ac.ir

<sup>2</sup>Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, smrezaei@aut.ac.ir

<sup>4</sup>Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, mzare@aut.ac.ir

<sup>5</sup>Ph.D Student, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, ghafarirad@aut.ac.ir

### Abstract

This paper addresses a new control scheme for bilateral telesurgical system with flexible links surgical robot. In this regard, hybrid structure of feedback and feedforward controller is suggested for flexible slave robot. This approach utilizes capability of Input Shaping (IS) as feedforward controller to reduce vibration at robot's end tip and the feedback controller based on collocated Proportional-Derivative (PD) for control rigid body motion of the system. Stability of closed loop input shaper for nonlinear systems is discussed for the first time in this article. The stability conditions for overall system with constant communication time delay are derived using Lyapunov method. Due to the independence of the system parameters, combination of these controllers results stability robustness to parameter uncertainties. Moreover, It is shown that reshaped master command to slave's controller improves tracking performance in the presence of robot flexibility. Simulation results are used to verify the main theoretical points of this paper and demonstrate the effectiveness of proposed control framework in terms of input tracking and vibration suppression.

**Key words:** Bilateral Telesurgical Robotics, Flexible Surgical Robots, Input shaping-PD controller, Time delayed communication, Vibration control in flexible structure.

\*Corresponding author

**Address:** Faculty of Biomedical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), P.O.Box: 15875-4413, I.R. Iran., Postal Code: 159163311, Tehran, I.R. Iran

**Tel:** +98 2166402044

**Fax:** +982166402044

**E-mail:** naraghi@aut.ac.ir

## کنترل ارتعاشات مدل غیر خطی یک سیستم جراحی رباتیک از راه دور دوجانبه با بازوی انعطاف پذیر

محدثه یاریان<sup>۱</sup>، مهیار نراقی<sup>۲\*</sup>، سید مهدی رضاعی<sup>۳</sup>، محمد زارعی نژاد<sup>۴</sup>، حامد غفاری راد<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک ایران)، تهران

r.yaryan@aut.ac.ir

<sup>۲</sup>استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک ایران)، تهران

<sup>۳</sup>استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک ایران)، تهران smrezaei@aut.ac.ir

<sup>۴</sup>استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک ایران)، تهران mzare@aut.ac.ir

<sup>۵</sup>دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک ایران)، تهران Ghafarirad@aut.ac.ir

### چکیده

در این مقاله روش جدیدی برای کنترل سیستم‌های جراحی رباتیک از راه دور دوجانبه با بازوی انعطاف پذیر جراح ارائه شده است. در این راستا، ساختار دوگانه‌ای از کنترل‌های پس‌خوراند و پیش‌خوراند برای بازوی پیرو انعطاف پذیر پیشنهاد شده است. این روش، توانایی روش شکل‌دهنده ورودی به عنوان کنترل پیش‌خوراند را برای کاهش ارتعاشات انتهای بازو و کنترل پس‌خوراند بر اساس کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی مجتمع را برای کنترل حرکت صلب سیستم با هم می‌آمیزد. در این مقاله برای اولین بار، پایداری شکل‌دهنده ورودی در حلقه بسته کنترلی برای سیستم‌های غیرخطی بررسی شد. شرایط پایداری کلی سیستم با وجود تأخیر زمانی ثابت در کانال‌های ارتباطی با استفاده از روش لیپانوف استخراج شده است. به سبب استقلال از پارامترهای سیستم، ترکیب کنترلی معرفی شده به پایداری مقاوم نسبت به عدم قطعیت پارامتری منتج شده است. به علاوه، با شکل‌دهی به فرمان ارسالی راهبر به پیرو، عملکرد ردیابی در حضور انعطاف پذیری بهبود یافت. تأثیرگذاری چهارچوب پیشنهادی از نظر قابلیت همزمان تعقیب ورودی، کاهش ارتعاشات و ارزیابی بررسی‌های تئوری، با شبیه‌سازی‌های متعدد ارزیابی شد.

کلیدواژگان: جراحی رباتیک از راه دور دوجانبه، ربات‌های جراح انعطاف پذیر، کنترل‌کننده شکل‌دهنده ورودی- تناسبی مشتقی، تأخیر زمانی کانال‌های ارتباطی، کنترل ارتعاشات در ساختارهای انعطاف پذیر.

\*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تهران، خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی: ۱۵۹۱۶۳۳۳۱۱

تلفن: ۰۲۱-۶۶۴۰۲۰۴۴-۶۶۴۰۲۰۴۴، دورنگار: ۰۲۱-۶۶۴۰۲۰۴۴، پیام‌نگار: naraghi@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

در پنجاه سال گذشته، توجه بسیاری از محققان به توسعه سیستم‌های عملیات از راه دور، از جنبه تئوری‌های کنترلی و همچنین عملی معطوف شده است. ویژگی‌های منحصر به فرد این سیستم‌ها سبب افزایش تقاضای بسیاری از صنایع از جمله صنایع پزشکی و هوافضا شده است. استفاده از ربات‌های جراح موجب افزایش دقت و سرعت جراح می‌شود. در جراحی‌های رباتیک از راه دور همانند جراحی‌های از راه دور کم‌آسیب<sup>۱</sup>، جراح به طور فیزیکی نزد بیمار حاضر نیست و از طریق ابزارهای ارتباطی، عملیات را از راه دور کنترل می‌کند. دقت، سرعت زیاد و خستگی ناپذیری همراه مهارت و دانش جراح سبب شده است که این روش جراحی به یکی از موضوعات مورد علاقه محققان و پزشکان تبدیل شود.

برای استفاده از مزایای سیستم جراحی رباتیک از راه دور، همانند عمل‌های لاپاراسکوپی، ابزار جراحی باید تا اندازه ممکن نازک، بلند و دارای قابلیت عبور مکانیزم‌های کابلی باشد. بنابراین، انعطاف‌پذیری بازوی جراح در این ربات‌ها غیرقابل اجتناب است [۱]. انعطاف‌پذیری بزرگترین عیب این روش از نظر طراحی سیستم کنترلی است و استفاده از روش‌های معمول را با محدودیت‌هایی روبرو می‌کند. به علاوه استفاده از سیستم عملیاتی از راه دور سبب می‌شود با افزایش فاصله پزشک از بیمار، تأخیر سیگنال‌های ارسالی افزایش یافته و احتمال ناپایداری افزون‌تر شود. در ضمن درک حسی نامناسب پزشک از بدن بیمار و محیط اطراف او، می‌تواند در مواردی سبب اتخاذ تصمیمات نامناسب پزشکی شود. این بدان معنا است که نیاز به بازخورد مناسبی از محیط به جراح بیش از پیش احساس می‌شود که زمینه‌ساز استفاده از سیستم‌های جراحی دوجانبه است. در این نوع از سیستم‌های عملیات از راه دور علاوه بر انتقال سیگنال از راهبر به ربات پیرو، سیگنال‌هایی نیز از محیط با واسطه ربات‌ها به کاربر منتقل می‌شود. ماهیت غیرخطی دینامیک بازوی انعطاف‌پذیر، کم عملگری، غیر کمینه فاز بودن نگاهت

ورودی-خروجی و عدم امکان ردیابی دقیق مسیر همراه با تحلیل پایداری عامل اصلی پیچیدگی کنترلی در این سیستم‌ها است که منجر به اعمال ملاحظات کنترلی بسیاری در این سیستم‌ها می‌شود. از این رو، مسأله کنترل سیستم‌های جراحی رباتیک دوجانبه از راه دور، تا به امروز در زمره بحث‌برانگیزترین مسائل بوده و توجه محققان بسیاری را در دهه گذشته به خود جلب کرده است.

به سبب چالش‌های مذکور، در برخی بررسی‌های انجام شده در این زمینه، دینامیک ساده شده‌ای برای ربات جراح استفاده شده است. برای مثال، ربات پیرو انعطاف‌پذیر با رباتی با مفصل انعطاف‌پذیر جایگزین شده است [۱]. در نتیجه از پیچیدگی‌های مربوط به دینامیک غیرخطی غیرکمینه فاز بازوی انعطاف‌پذیر جلوگیری شده است. در مطالعه دیگری، برخلاف ماهیت دینامیک خمش بازوی انعطاف‌پذیر، انعطاف‌پذیری در بازو به صورت رفتار شبه استاتیکی مدل و به شکل خطای سینماتیک به مدل خطی سیستم اضافه شده است [۲].

آتش‌زر و همکاران با در نظر گرفتن دینامیک حقیقی سیستم، مسأله غیرکمینه فازی و تأخیر کانال‌های ارتباطی را بررسی کردند [۳]. آن‌ها روش کنترلی جدیدی با نام "ساختار شبه سه کاناله" ارائه کردند. در این روش، دینامیک پیرو انعطاف‌پذیر، خطی و سپس به کمک خروجی بازتعریف شده کمینه فازی به طور محلی کنترل شده است. به سبب مدل خطی شده غیردقیق، قسمتی از دینامیک میان خروجی بازتعریف‌شده و خروجی حقیقی سیستم، کنترل‌ناپذیر باقی مانده و شفافیت ایده‌آل غیر قابل دسترس است.

به دلیل ماهیت روش‌های کنترلی، تمام رویکردهای پیشین در این حوزه، به دانش تقریباً دقیقی از دینامیک سیستم نیاز دارند. روشن است که انعطاف‌پذیری بازوی ربات، فرضیات محدود کننده‌ای برای پایداری و شفافیت سیستم رباتیک از راه دور دوجانبه ایجاد خواهد کرد. روش‌های کنترلی توسعه یافته برای ربات‌های صلب همانند کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>Minimally Invasive Tele Surgeries<sup>۲</sup>Proportional- Derivative (PD)

انتقال سیگنال در هر دو سوی سیستم با یکدیگر در ارتباط هستند- به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + g_m(q_m) = \tau_m(t) + \tau_h(t) \quad (1)$$

$M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + g_s(q_s) = \tau_s(t) + \tau_e(t)$  که در آن زیروندهای "m" و "s" مربوط به ربات‌های راهبر و پیرو و  $q \in \mathbb{R}^n$  به ترتیب شتاب، سرعت و موقعیت مفصل ربات هستند.  $M_i(q_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ،  $C_i(q_i, \dot{q}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ،  $g_i(q_i) \in \mathbb{R}^n$  و  $\tau_i \in \mathbb{R}^n$  نیز به ترتیب، ماتریس‌های اینرسی، شتاب کریولیس<sup>۶</sup> و آثار جانبی مرکز، بردارهای نیروهای گرانش و ورودی‌های کنترلی هستند.  $\tau_e \in \mathbb{R}^n$  و  $\tau_h \in \mathbb{R}^n$  نشان‌دهنده نیروهای کاربر و محیط هستند.

در صورتی که بازوی ربات، انعطاف‌پذیر باشد (همانند ربات‌های جراح)؛ باید معادلات دینامیک پیرو به طریق مناسبی اصلاح شوند. روش‌های بسیاری برای مدل‌سازی بازوی انعطاف‌پذیر موجود است. به سبب سادگی، مفهوم فیزیکی، جلوگیری از ایجاد معادلات دیفرانسیل پیوسته جفت‌شده، ترکیب روش معادلات اوپلر- لاگرائز<sup>۷</sup> و موده‌های فرضی<sup>۸</sup> به شکلی شبیه معادلات بازوهای صلب منجر می‌شود. تمام ویژگی‌های شناخته شده مدل دینامیک بازوهای رباتیک با مفاصل دورانی همانند ویژگی پسیویتی<sup>۹</sup>، مثبت معین و متقارن بودن ماتریس‌های اینرسی در این دینامیک نیز مشاهده می‌شود. موده‌های فرضی، روش گسسته‌ای است که تغییرشکل الاستیک  $w(x, t)$  را در هر نقطه‌ای در طول بازو به صورت سری متناهی از حاصلضرب توابع مجاز<sup>۱۰</sup>  $\phi_i(x)$  در مختصات تعمیم‌یافته  $\delta_i(t)$  تقریب می‌زند:

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^m \phi_i(x) \cdot \delta_i(t) \quad (2)$$

مقدار ثابت "m" در رابطه (۲) تعداد موده‌های ارتعاشی را تعیین می‌کند. شرایط مرزی هندسی تنها قیودی هستند که باید با توابع مجاز برقرار شوند. شکل مود حاصل از حل مسأله ارتعاش آزاد انتخابی منطقی برای توابع مجاز به حساب می‌آید. با فرض صفحه‌ای بودن ربات و یا در نظر گرفتن جبران‌ساز

مفصل [۵،۴] در این حالت مناسب نیست، اما ترکیب آن‌ها با تکنیک‌های کنترل پیش‌خوراند، می‌تواند عملکرد سیستم کنترلی را به میزان قابل توجهی بهبود دهد. این ایده برای ساختارهای انعطاف‌پذیر دیگر از جمله یک ربات انعطاف‌پذیر، با موفقیت اجرا شده است [۷،۶].

شکل‌دهنده ورودی<sup>۳</sup> یکی از پرکاربردترین روش‌های کنترلی حلقه باز است که در مقایسه با سایر روش‌ها، ارتعاشات را به میزان بیشتری کاهش می‌دهد. مبنای این روش تئوری ارتعاشات خطی است. تنها اطلاعات مورد نیاز در این روش، فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی هستند که به راحتی با تحلیل مودال<sup>۴</sup> قابل استخراج هستند [۶]. در نتیجه، ترکیب دو کنترل‌کننده، شکل‌دهنده ورودی و کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی در اصطلاح *IS-PD*، برای غلبه بر مسائل ناشی از انعطاف‌پذیری مطرح شده است. شکل‌دهنده ورودی، سیگنال موقعیت راهبر را به گونه‌ای اصلاح می‌کند که در فرکانس‌های تشدید، انرژی بالای سیستم از بین رود. در چهارچوب پیشنهادی، قسمت کنترل پس‌خوراند (تناسبی- مشتقی) پایداری و محدود بودن خطای ردیابی را تضمین می‌کند؛ درحالی که قسمت پیش‌خوراند، ارتعاشات را برای رسیدن به حرکت دقیق خروجی سیستم کاهش می‌دهد. به این معنا که کاهش ارتعاشات، خطای تعقیب میان موقعیت خروجی پیرو و موقعیت راهبر را به میزان قابل قبولی کاهش می‌دهد.

در این مقاله، پس از معرفی مدل دینامیک سیستم جراحی رباتیک از راه دور در حضور انعطاف‌پذیری بازوی جراح، روشی جدید برای کمینه‌کردن خطای موقعیت‌دهی معرفی شده است. پایداری و شفافیت سیستم حلقه بسته با وجود تأخیر در کانال‌های ارتباطی به اثبات رسیده است. در نهایت شبیه‌سازی‌های انجام شده مؤثر بودن روش فوق را نشان می‌دهد.

## ۲- مدل‌سازی سیستم دینامیک

به طور معمول سیستم عملیات از راه دور دو جانبه با یک جفت سیستم رباتیک غیرخطی صلب با  $n$  درجه آزادی- که از طریق

<sup>3</sup>Input Shaping (IS)<sup>6</sup>Coriolis Acceleration<sup>10</sup>Admissible Function<sup>4</sup>Modal analysis<sup>7</sup>Euler-Lagrange Equation<sup>5</sup>Input Shaping-Proportional Derivative (IS-PD)<sup>8</sup>Assume Mode Method (AMM)<sup>9</sup>Passivity Property

$$\int_0^t (-\dot{y}_s^T(\alpha))\tau_e(\alpha) d\alpha \geq -\beta_s$$

در مقایسه با ربات‌های صلب، موقعیت زاویه‌ای در طول

بازو متغیر است. بنابراین، انرژی استخراج شده در تعامل با محیط بر اساس موقعیت زاویه‌ای انتهای بازو یا هر نقطه دیگری در تماس با محیط تعیین می‌شود.

### ۳-۱- کنترل مجتمع تناسبی - مشتقی

برای رسیدن به اهداف کنترلی، کنترل‌کننده شبه تناسبی - مشتقی مجتمع مطابق رابطه (۵) توسعه یافته است:

$$\tau_m = k_p(\theta_s(t - T_d) - q_m) - k_v\dot{q}_m, \quad (5)$$

$$\tau_s = k_p(q_m(t - T_d) - \theta_s) - k_v\dot{\theta}_s.$$

که  $k_p$  و  $k_v$  بهره‌های تناسبی و میرایی مضاعف و ثابت

مثبت  $T_d$  تأخیر زمانی در هر دو سوی کانال‌های ارتباطی هستند.

این کنترل‌کننده از خطای موقعیت راهبر و مفصل پیرو به جای

موقعیت انتهای بازو بهره می‌گیرد.

**تئوری ۱:** بر اساس فرض منفعل بودن جراح/ محیط، سیستم رباتیک از راه دور (۳) کنترل شده با (۵) تمامی اهداف کنترلی را برآورده ساخته؛ سرعت‌های زاویه‌ای و متغیرهای انعطاف‌پذیری به صفر همگرا می‌شوند.

پیش از ارائه اثبات تئوری، در نظر گرفتن قضیه ۱ الزامی است.

**قضیه ۱:** برای هر سیگنال برداری  $y, x$  و هر  $T, \gamma > 0$

$$2 \int_0^t x^T(\sigma) \int_0^T y(\sigma - s) ds d\sigma \leq \gamma \|x\|_2^2 + \frac{T^2}{\gamma} \|y\|_2^2$$

که  $\| \cdot \|$  اندازه  $l_2$  سیگنال است. برای اثبات این قضیه به [۴]

مراجعه شود.

**اثبات:** پایداری مجانبی کل سیستم با استفاده از انرژی مکانیکی

به علاوه چندین جمله مثبت معین به عنوان تابع لیاپانوف<sup>۱۱</sup> قابل

اثبات است. تابع کاندید لیاپانوف به شکل زیر است:

$$V(q_m, q_s) = \frac{1}{2} \dot{q}_m^T M_m \dot{q}_m + \frac{1}{2} \dot{q}_s^T M_s \dot{q}_s + U_s(q_s) + \int_0^t (-\dot{q}_m^T \tau_h - \dot{y}_s^T \tau_e) d\alpha + \frac{k_p}{2} |q_m - \theta_s|^2 - k_{u_s} + \beta_m + \beta_s \quad (6)$$

گراش، مدل دینامیک (۱) به صورت رابطه (۳) اصلاح خواهد می‌شود:

$$\begin{aligned} M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m &= \tau_m(t) + \tau_h(t) \\ M_s(\theta_s, q_s)\ddot{\theta}_s + (C_s(q_s, \dot{q}_s) + B_s)\dot{\theta}_s + K_s(\theta_s) & \\ &= \tau_s(t) \begin{pmatrix} I_n \\ 0 \end{pmatrix} + \tau_e(t) \begin{pmatrix} I_n \\ \phi(l) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

که  $\phi(l) \in \mathbb{R}^{n \times m}$  و  $\theta_s \in \mathbb{R}^n$ ,  $\delta_s \in \mathbb{R}^{n \times m}$  مفاصل،

مختصات تعمیم‌یافته و بردار شکل‌های مود در انتهای بازو هستند.  $B_s, K_s \in \mathbb{R}^{(n \times m) \times (n \times m)}$  ماتریس‌های ضرایب ویسکوز

و میرایی داخلی و سختی هستند. به دلیل ماهیت ساختار

دینامیک ناشی از معادلات اولر- لاگرانژ، انرژی پتانسیل  $U_s$  از

مقدار مثبت  $k_{u_s}$  بزرگتر است و شرط زیر را برقرار می‌کند.

$$K_s q_s = \partial U_s(q_s) / \partial q_s \quad (4)$$

### ۳- طراحی کنترلی

تضمین پایداری با وجود تأخیر در کانال‌های ارتباطی اصلی‌ترین

هدف سیستم‌های رباتیک از راه دور دوجانبه است. به علاوه،

باید شرط شفافیت برقرار باشد. به طور خلاصه اهداف کلی

کنترلی عبارتند از:

۱- موقعیت‌دهی دقیق در حرکت آزاد

$$(\tau_h, \tau_e) = 0 \Rightarrow q_m(t) - y_s(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$$

$y_s(t) \in \mathbb{R}^n$  بردار موقعیت زاویه‌ای انتهای بازوی پیرو است که

با تقریب خوبی برابر است با  $y_s(t) = \theta_s(t) + w(l, t)/l$

۲- بازگشت نیرو در برخورد ایستا:

$$(\ddot{q}_{m,s}, \dot{q}_{m,s}) \rightarrow 0, \Rightarrow \tau_h \rightarrow -\tau_e$$

بدین معنا که علاوه بر هماهنگی پایدار موقعیت راهبر- پیرو

و محدود بودن متغیرهای سیستم، جراح باید نسبت به نیروهای

محیطی در طول جراحی احساسی واقعی داشته باشد. در تمامی

موارد فرض شده است که جراح و محیط در تعامل با سیستم

رباتیک از راه دور، منفعل هستند. بنابراین ثابت‌های  $\beta_i \geq 0$  در

$t \geq 0$  وجود دارند به قسمی که:

$$\int_0^t (-\dot{q}_m^T(\alpha))\tau_h(\alpha) d\alpha \geq -\beta_m$$

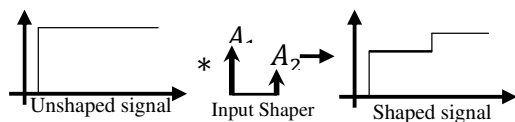
<sup>11</sup>Norm

<sup>12</sup>Lyapunov function

موجود نیست. در حقیقت، انعطاف‌پذیری ربات رفتار نوسانی انتهایی بازو و به تبع آن خطای موقعیت را افزایش می‌دهد. برطرف کردن این نقیصه در بهبود عملکرد تعقیب و کاهش آسیب‌های احتمالی حین جراحی، حیاتی است. بررسی روش‌های کنترل ارتعاشات بر توانایی روش‌های حلقه باز تأکید می‌کند. این روش‌ها، فرمان ورودی را برای کاهش انرژی در فرکانس‌های خاص اصلاح می‌کنند.

### ۳-۲- کنترل ارتعاشات پیش‌خوراند

شکل‌دهنده ورودی روش کنترلی پیش‌خوراند مؤثری را سیستم‌های خطی و غیرخطی است که نظر محققان بسیاری را به خود معطوف کرده است. مزیت‌های این روش نه تنها سادگی و اثرگذاری آن در روش‌های کنترل ماشینی، بلکه عدم نیاز به عملگر و حسگر اضافی است. بر اساس تئوری ارتعاشات خطی، قرار دادن صفرهای تابع تبدیل حلقه باز کنترل‌کننده در مکان قطب‌های پایدار ارتعاشی سیستم، رفتار نوسانی را از بین می‌برد. از این رو، قطاری از ضربه‌ها با نام شکل‌دهنده ورودی ایجاد می‌شود، که در هر سیگنال ورودی کانولوت خواهد شد [شکل (۱)].



شکل (۱) - کانولوت سیگنال پله در شکل‌دهنده.

رابطه حوزه لاپلاس<sup>۱۴</sup> برای هر طراحی شکل‌دهنده به صورت زیر است:

$$IS : \sum_{i=1}^k A_i e^{-sT_i} \quad (10)$$

دامنه  $A_i$  و زمان اعمال  $T_i$  ضربه‌ها با صفر قرار دادن ارتعاشات باقی‌مانده و مشتقات آن‌ها پس از اتمام فرمان تعیین می‌شوند. در برخی مطالعات برای تعدیل شرط صفر، می‌توان ارتعاشات را زیر سطح معینی  $V_{tol}$  نگاه داشت. این شکل‌دهنده با نام فوق غیرحساس<sup>۱۵</sup> میزان مقاوم بودن نسبت به خطای پارامترها را برای کمینه‌سازی زمان اعمال بهبود می‌بخشد. به سبب حساسیت سیستم‌های جراحی رباتیک از راه دور نسبت به

اولین جمله انرژی جنبشی ربات راهبر، دومین و سومین جمله انرژی جنبشی و پتانسیل پیرو بوده؛ دو جمله بعدی مربوط به پسیویتی و کمینه‌سازی خطای موقعیت هستند. جملات باقی‌مانده برای مثبت معین بودن تابع لیاپانوف تعریف شده‌اند. با مشتق‌گیری از تابع لیاپانوف (۶) و در نظر گرفتن دینامیک (۳) خواهیم داشت:

$$\dot{V} = \dot{q}_m^T (\tau_m + \tau_h) + \dot{q}_s^T \left( \tau_s \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix} + \tau_e \begin{pmatrix} \phi(l) \\ l \end{pmatrix} - B_s \dot{q}_s \right) \quad (7)$$

$$- \dot{q}_m^T \tau_h - \dot{y}_s^T \tau_e + k_p (\dot{q}_m - \dot{\theta}_s)^T (q_m - \theta_s)$$

با جایگذاری قانون کنترلی (۵) در رابطه (۷) می‌توان نوشت:

$$\dot{V} = \dot{q}_m^T (k_p (\theta_s(t - T_d) - \theta_s) - k_v \dot{q}_m) - \dot{q}_s^T B_s \dot{q}_s \quad (8)$$

$$+ \dot{\theta}_s^T (k_p (q_m(t - T_d) - q_m) - k_v \dot{\theta}_s)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (۸) و استفاده از قضیه (۱) چنین بدست می‌آید:

$$V(t) - V(0) \leq - \left( k_v - \frac{k_p}{2} \left( \gamma_m + \frac{T_d^2}{\gamma_s} \right) \right) \|\dot{q}_m\|_2^2 - \left( k_v - \frac{k_p}{2} \left( \gamma_s + \frac{T_d^2}{\gamma_m} \right) \right) \|\dot{\theta}_s\|_2^2 - B \|\dot{q}_s\|_2^2 \quad (9)$$

با انتخاب مناسب  $k_p$  و  $k_v$  به قسمی که پیرانتزهای بالا مثبت باشند، محدود بودن تابع لیاپانوف و منفی نیمه معین بودن مشتق این تابع قابل استنباط است. با در نظر گرفتن شرط  $k_v > T k_p$  ثابت‌های  $\gamma_m$  و  $\gamma_s$  وجود خواهند داشت.

تمام متغیرهای تابع لیاپانوف و همچنین متغیرهای شتاب محدود هستند. همگرایی سرعت به سمت صفر نتیجه منطقی دیگر این تحلیل است. مشتق‌گیری مستقیم از دینامیک سیستم محدود بودن متغیرها را تضمین می‌کند. مطابق با قضیه باربالات<sup>۱۳</sup>، می‌توان همگرایی به صفر سایر متغیرها در حرکت آزاد را نشان داد. در نهایت، می‌توان بازگشت نیرو را در برخورد ایستا نشان داد. برای جزئیات بیشتر در خصوص اثبات به منبع [۴] مراجعه شود.

کنترل‌کننده مجتمع تناسبی - مشتقی اهداف کنترلی مطلوب را برآورده می‌سازد، اما قادر به اثرگذاری بر حالات ارتعاشی سیستم نخواهد بود؛ زیرا هیچ پس‌خوراندی از آن‌ها در سیستم

<sup>13</sup>Barbalat Lemma

<sup>14</sup>Laplace

<sup>15</sup>Extra-Insensitive (EI)

تأخیر، اعمال این شکل دهنده، انتخاب قابل قبولی میان انواع شکل دهنده‌های مختلف است.

به طور همزمان، قید مقدار واحد<sup>۱۶</sup> برای جلوگیری از تقویت ورودی و ثابت باقی ماندن خروجی در مقایسه با حالت بدون شکل دهنده باید برقرار باشد. برای کاهش تأخیر زمانی  $T_1 = 0$  و برای جلوگیری از اشباع عملگر پس از شکل دهی فرمان  $A_i > 0$  در نظر گرفته می‌شود.

در نهایت، برای سیستمی با فرکانس طبیعی  $\omega$  و ضریب میرایی  $\zeta$ ، شکل دهنده فوق غیرحساس برابر است با:

$$A_1 = 0.24962V_{tol} + 0.80008\zeta + 1.23328V_{tol}\zeta + 0.49599\zeta^2 + 3.17316v_{tol}\zeta^2 + 0.24968, \quad T_1 = 0$$

$$A_2 = 1 - A_1 - A_2, \quad T_2 = \frac{T_d}{2} \quad (11)$$

$$A_3 = 0.21474V_{tol} - 0.83249\zeta + 1.41498V_{tol}\zeta + 0.85181\zeta^2 - 4.90094V_{tol}\zeta^2 + 0.25149, \quad T_3 = T_d.$$

که  $V_{tol}$  مقدار مجاز ارتعاشات و  $T_d = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\zeta^2}}$  است [۸].

### ۳-۳- طرح کنترل ترکیبی<sup>۱۷</sup> (IS-PD)

در این مقاله ساختار کنترل ترکیبی بر اساس کنترل کننده‌های تناسبی- مشتقی و شکل دهنده ورودی برای همزمانی توانایی ردیابی ورودی و کاهش ارتعاشات پیشنهاد شده است. شکل (۲) روندنمای سیستم را با وجود کنترل کننده پیشنهادی نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، شکل دهنده ورودی با اصلاح سیگنال تأخیردار راهبر، دقت موقعیت دهی را با کاهش ارتعاشات افزایش می‌دهد.

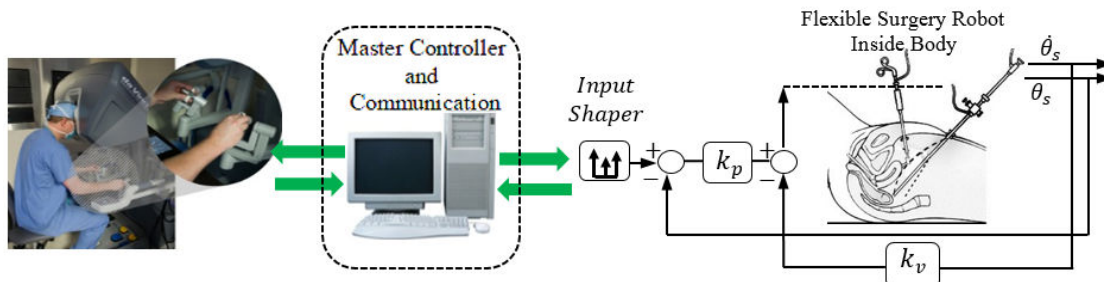
به طور کلی اعمال شکل دهنده ورودی بر سیگنال فرمان مطلوب و خارج از حلقه کنترلی سیستم بر پایداری سیستم تأثیری نخواهد داشت. با این حال، تحلیل پایداری طرح پیشنهادی به سبب قرارگیری شکل دهنده ورودی درون حلقه رباتیک از راه دور الزامی است [شکل (۲)]. اخیراً برخی محققان پایداری شکل دهنده ورودی درون حلقه بسته کنترلی و محدودیت‌های آن را بررسی کرده‌اند. به سبب فقدان تئوری‌های کنترلی مناسب برای سیستم‌های تأخیردار، در تمام مطالعات انجام شده، سیستم‌های مورد بحث خطی فرض شده‌اند [۹، ۱۰]. از این دیدگاه، تئوری ۲ نخستین بحث جدی درباره پایداری مجانبی سیستم غیرخطی با وجود شکل دهنده درون حلقه بسته کنترلی است. اثبات این تئوری راهنمای مؤثری برای سایر سیستم‌های غیرخطی در اختیار علاقه‌مندان قرار می‌دهد.

**تئوری ۲:** با در نظر گرفتن تابع لیاپانوف (۶)، تمام نتایج تئوری ۱ برای کنترل ترکیبی پیشنهادی قابل استنتاج است.

**اثبات:** کانونولوت شکل دهنده در سیگنال تأخیر یافته راهبر به سمت پیرو، ورودی مرجع جدیدی بدین صورت ایجاد خواهد می‌کند:

$$A_1 q_m(t - T_d) + \sum_{i=2}^k A_i q_m(t - T_d - T_i) \quad (12)$$

$$= A_1 q_m(t - T_d) + \sum_{i=2}^k A_i q_m(t - T_{d_i})$$



شکل (۲) - روندنمای سیستم جراحی رباتیک از راه دور .

<sup>16</sup>Unity Magnitude condition

<sup>17</sup>Hybrid Control Scheme

طراحی شکل‌دهنده و تعداد حالات ارتعاشی حد پایین  $k_v$  را تعیین می‌کند. در عمل، ضریب میرایی ذاتی بازوی انعطاف‌پذیر این محدودیت را تعدیل می‌کند.

این شرط محافظه‌کارانه، عدم تأثیر اضافه‌کردن شکل‌دهنده ورودی در مسیر پیرو را بر پایداری و محدوده آن اثبات می‌کند، ادامه اثبات تقریباً مشابه اثبات تئوری ۱ است. در حقیقت، قیود طراحی شکل‌دهنده بر محدود بودن متغیرها بی‌اثر است.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی عملکرد چهارچوب پیشنهادی، سیستم عملیات از راه دور با پیرو انعطاف‌پذیر (۳)، شبیه‌سازی شد. تمام بررسی‌ها در دو حالت حرکت آزاد و مقید انجام شد. در حرکت آزاد (بدون تعامل با محیط خارجی) دو طرح متفاوت حرکتی مورد نظر بوده است. در طرح اول، کاربر موقعیت ربات راهبر را در بازه زمانی کوتاهی به میزان قابل توجهی تغییر می‌دهد. البته میان پله‌های حرکتی ایجاد شده، مدت زمان کافی برای میرا کردن نوسانات وجود دارد. در این صورت میزان نوسانات ایجاد شده و توانایی کنترل‌کننده در میرا نمودن آن‌ها قابل ارزیابی است. در طرح نوع دوم، راهبر به صورت سینوسی با فرکانس  $5 \text{ (rad/s)}$  به حرکت درمی‌آید. برای بررسی توانایی کنترل‌کننده در ردیابی مسیر، فرکانس حرکت راهبر تا اندازه ممکن زیاد انتخاب شد. در کنار پایداری، شفافیت نیز دیگر هدف کنترلی در سیستم‌های تله‌پراتوری است؛ پس طرح سوم حرکتی مربوط به حرکت مقید، تعامل سیستم رباتیک از راه دور با محیط خارجی است. به طور کلی برخورد سخت با محیط نیروی گذرای بزرگی بر سیستم اعمال می‌کند که در مقایسه با برخورد نرم به دلیل احتمال تحریک مودهای انعطاف‌پذیر مشکلات فراوانی برای بازوی انعطاف‌پذیر پدید می‌آورد. به همین دلیل، دیوار سختی در محیط پیرو در موقعیت  $\frac{\pi}{4} \text{ rad}$  قرار داده شد؛ این در حالی است که موقعیت مطلوب حرکت کاربر در  $\frac{\pi}{2} \text{ (rad)}$  بود.

که  $T_{d_i}$  زمان اعمال ضربه  $i$  ام است. با جایگذاری رابطه (۱۰) در (۴) داریم:

$$\tau_m = k_p(\theta_s(t-T) - q_m) - k_v\dot{q}_m, \quad (13)$$

$$\tau_s = k_p \left( \left( A_1 q_m(t-T) + \sum_{i=2}^k A_i q_m(t-T_{d_i}) \right) - \theta_s \right) - k_v \dot{\theta}_s$$

مشتق تابع لیاپانوف نیز برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \dot{q}_m^T (k_p(\theta_s(t-T) - q_m) - k_v\dot{q}_m) \\ & + k_p(\dot{q}_m - \dot{\theta}_s)^T (q_m - \theta_s) - \dot{q}_s^T B \dot{q}_s \\ & + \dot{q}_s^T \left( k_p(A_1 q_m(t-T) + \sum_{i=2}^k A_i q_m(t-T_{d_i}) - \theta_s) - k_v \dot{\theta}_s \right) \end{aligned}$$

پس از محاسبه و ساده‌سازی روابط به صورت زیر خواهد

بود:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \dot{q}_m^T (k_p(\theta_s(t-T) - \theta_s) - k_v\dot{q}_m) - \dot{q}_s^T B \dot{q}_s - \dot{\theta}_s^T k_v \dot{\theta}_s \\ & + \dot{\theta}_s^T k_p \left( \left( A_1 q_m(t-T) + \sum_{i=2}^k A_i q_m(t-T_{d_i}) \right) - q_m \right) \end{aligned}$$

بر اساس شرط مقدار واحد در طراحی شکل‌دهنده ورودی،

می‌توان موقعیت راهبر  $q_m$  را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$q_m = A_1 q_m + (1 - A_1) q_m = A_1 q_m + \sum_{i=2}^k A_i q_m$$

در نهایت با جایگذاری در  $\dot{V}$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \dot{q}_m^T k_p (\theta_s(t-T) - \theta_s) - k_v |\dot{q}_m|^2 - k_v |\dot{\theta}_s|^2 - B |\dot{q}_s|^2 \\ & + \dot{\theta}_s^T k_p \left( A_1 (q_m(t-T) - q_m) + \sum_{i=2}^k A_i (q_m(t-T_{d_i}) - q_m) \right) \end{aligned}$$

باید در نظر داشت که:

$$x_i(t-T_d) - x_i = \int_0^{T_d} \dot{x}_i(t-\alpha) d\alpha \quad (14)$$

با انتگرال‌گیری از  $\dot{V}$  و به کارگیری قضیه ۱ و رابطه (۱۲)

داریم:

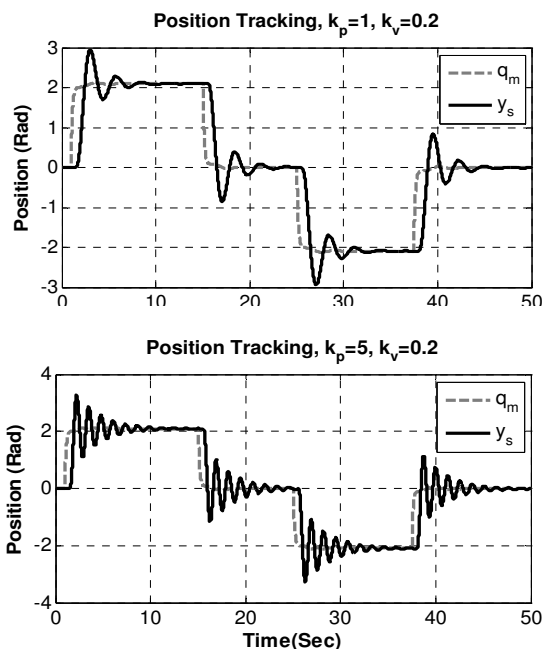
$$\begin{aligned} V(t) - V(0) \leq & - \left( k_v - \frac{k_p}{2} \left( \gamma_m + \sum_{i=1}^k A_i \frac{T_{d_i}^2}{\gamma_{s_i}} \right) \right) \|\dot{q}_m\|_2^2 \\ & - \left( k_v - \frac{k_p}{2} \left( \sum_{i=1}^k A_i \gamma_{s_i} + \frac{T_d^2}{\gamma_m} \right) \right) \|\dot{\theta}_s\|_2^2 - B \|\dot{q}_s\|_2^2 \end{aligned}$$

از طرف دیگر،  $\sum_{i=1}^k A_i T_{d_i}^2 > 0$  است. بنابراین، با شرط

$$k_v > k_p T_d + \frac{k_p}{2} \left( \sqrt{\sum_{i=2}^k A_i T_i (T_i + 2T_d)} \right)$$

اهداف مورد نظر طراحی دست یافت. بر این اساس، روش





شکل (۳) - ردیابی موقعیت در حرکت آزاد، طرح اول.

شکل (۴) موقعیت ربات‌های راهبر و پیرو و هماهنگی و بازگشت نیرو را در دو سوی سیستم رباتیک از راه دور در حرکت مقید نشان می‌دهد. در این شکل، نیروی کاربر در نسبت بهره‌های کنترلی ضرب شده است تا برابری دو نیرو مشاهده شود. در واقع کاربر به نسبت این بهره‌های طراحی نیروی محیط را احساس می‌کند. در ابتدای حرکت ربات راهبر و پیش از حرکت پیرو کاربر نیاز به اعمال نیروی زیاد دارد، اما پس از حرکت پیرو به سبب کاهش خطای تعقیب و البته ایجاد شتاب در حرکت هر دو ربات، مقدار نیروی مورد نیاز کاهش می‌یابد. از این رو در شکل (۴)، نیروی کاربر پیش از برخورد با محیط نوساناتی دارد. پس از خروج از محیط به سبب وجود تأخیر در کانال‌های ارتباطی هر دو سوی سیستم تله‌اپراتوری، کاربر در خلاف جهت نیروی زیاد احساس می‌کند؛ اما پس از مدتی مشابه دلایل بیان شده در لحظات اولیه حرکت نیروی کاربری کاهش می‌یابد. مطابق با نمودارها، برخورد در زمان‌های ۳-۱۱ ثانیه انجام شده است. در این هنگام ربات پیرو در محیط ثابت شده و پس از تأخیر زمانی در حدود ۱ ثانیه ربات راهبر نیز از توقف پیرو در محیط مطلع می‌شود. در این صورت ربات

جدول (۱) - پارامترهای سیستم جراحی رباتیک از راه دور شبیه‌سازی شده.

$M_m$	$0.1 \text{ Kg.m}^2$
$C_m$	$0.3 \text{ N.s}$
$T_d$	$0.5 \text{ s}$
$K_h$ (ضریب سختی کاربر)	$75 \text{ N.m}$
$C_h$ (ضریب میرایی کاربر)	$10 \text{ N.m.s}$
$K_w$ (ضریب سختی دیوار)	$1000 \text{ N.m}$
$C_w$ (ضریب میرایی دیوار)	$10 \text{ N.m.s}$

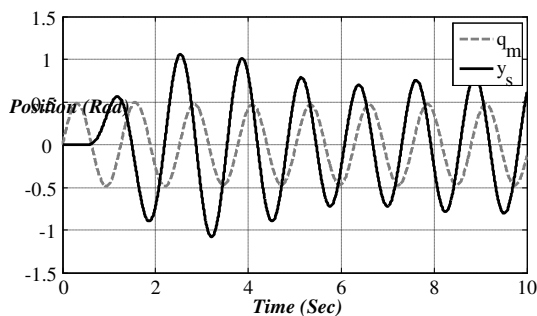
برای سادگی و سهولت تحلیل، ربات پیرو انعطاف‌پذیر به صورت بازویی با یک مود ارتعاشی مدل‌سازی شده است. برای جزئیات بیشتر درباره مشخصات ربات پیرو به منبع [۱۱] مراجعه شود. همچنین ربات راهبر، ربات صلبی با یک درجه آزادی است. جراح و محیط به صورت فنر و میراکننده با مشخصات جدول (۱) شبیه‌سازی شده‌اند.

#### ۴-۱- کنترل‌کننده تناسبی - مشتقی

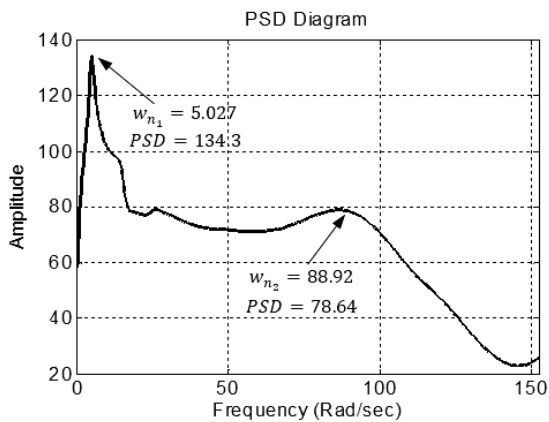
در ابتدا، بهره‌های کنترلی تناسبی - مشتقی برای رسیدن به بهترین عملکرد در ردیابی ورودی تنظیم شدند. هماهنگی موقعیت در حرکت آزاد و بازگشت نیرو در برخورد ایستا در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. این نتایج تئوری ۱ را به طور عملی اثبات می‌کند.

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، برای ردیابی سریع به بهره زیاد تناسبی نیاز است که افزایش نوسانات را در پی دارد. افزایش میزان بهره تناسبی کنترل‌کننده از مقدار ۱ به میزان ۵ سبب شده است تأخیر کلی پاسخ با تأخیر کلی کانال‌های ارتباطی برابر باشد. از دیدگاه بررسی عملکرد کنترل ترکیبی، چنین بهره‌ای مطلوب به نظر می‌رسد. در صورتی که کنترل‌کننده قادر به دفع ارتعاشات در این حالت باشد، ردیابی سریع و بدون خطا محقق خواهد شد.

زمانی و حرکت سریع بدون ارتعاشات در حرکت آزاد در شکل (۷) نمایان است. در مقایسه شکل های (۷) و (۴)، با اصلاح سیگنال ارسالی راهبر به سمت پیرو و جلوگیری از اعمال یکبارہ کل گشتاور مورد نیاز برای رسیدن به موقعیت مطلوب، در کنترل ترکیبی، پیرو با کندی بیش تر اما بدون نوسانات اضافی به موقعیت مطلوب همگرا می شود. بنابراین با استفاده از طرح کنترل ترکیبی در مقایسه با پاسخ سیستم با کنترل کننده تناسبی- مشتقی، از میزان ارتعاشات به مقدار قابل توجهی کاسته می شود.



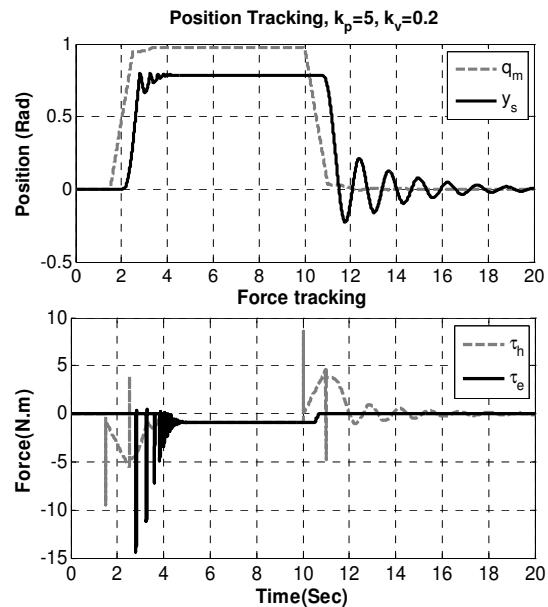
شکل (۴) - پاسخ سیستم از راه دور به ازای ورودی سینوسی.



شکل (۵) - پاسخ فرکانسی ربات پیرو با وجود کنترل کننده تناسبی- مشتقی.

مقایسه ردیابی سریع سینوسی نیز نتایج مشابهی را حاصل می کند [شکل های (۵) و (۸)]. خطای تأخیر یافته ردیابی به سرعت به صفر همگرا شده است. البته میزان تأخیر موجود میان حرکت دو ربات در مقایسه با تأخیر کانال های ارتباطی به سبب ذات تأخیر دار ساختار کنترلی قابل توجهی است.

راهبر نیرویی متناسب با نیروی اعمالی از سمت محیط به دست جراح اعمال و از حرکت آن جلوگیری می کند.



شکل (۶) - سیستم از راه دور کنترل شده با کنترل کننده تناسبی- مشتقی.

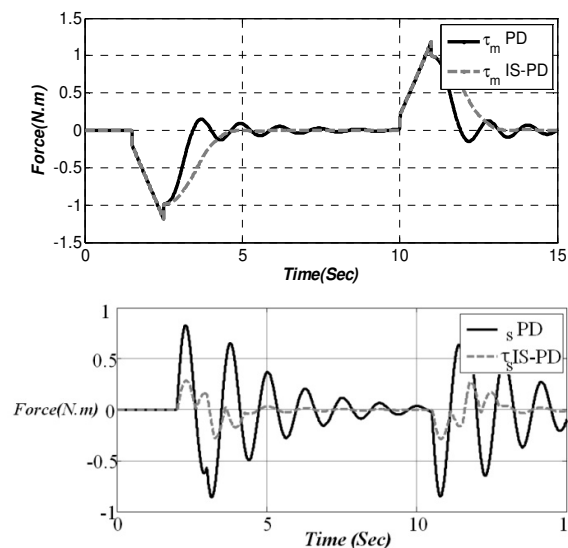
مطابق با شکل (۵)، با وجود واکنش نسبتاً سریع پیرو، میزان خطای تعقیب و تغییر شکل انتهای بازو زیاد است. بدون در نظر گرفتن تأخیر در کانال های ارتباطی در برخی بازه های زمانی، میزان خطای تعقیب به بیش از ۱۰٪ رسیده است. به علاوه پس از کاهش خطای تعقیب در بازه زمانی ۴-۷ ثانیه، خطای تعقیب مجدداً افزایش یافته است.

#### ۴-۲- کنترل کننده ترکیبی IS-PD

پیش از بررسی عملکرد ساختار کنترلی پیشنهادی باید پارامترهای طراحی تعیین شوند. از این رو، ربات انعطاف پذیر در حلقه کنترلی تناسبی- مشتقی با ورودی پله واحد تحریک شد. مطابق با شکل (۶)، فرکانس طبیعی با استفاده از نمودار چگالی طیفی<sup>۱۸</sup> بدست آمد.

ضریب میرایی نیز در محدوده [۰/۴-۰/۱] انتخاب شد. در نتیجه، شکل دهنده ورودی با استفاده از رابطه (۹) طراحی شد. برای تعیین میزان تأثیرگذاری طرح کنترل کننده ترکیبی IS-PD آزمایش های انجام شده، بدون تغییر بهره های کنترلی در این حالت تکرار شده اند. ردیابی قابل قبول ورودی با مصالحه تأخیر

لحظه برخورد و پس از خارج شدن از تعامل سخت با محیط در مقایسه با قبل به میزان چشم‌گیری کاهش یافته است. عملکرد بهبود یافته کنترل *IS-PD* در تعامل با محیط، اعمال کنترل پیشنهادی را بر سیستم‌های رباتیک جراحی از راه دور عملی و ایمن می‌سازد.

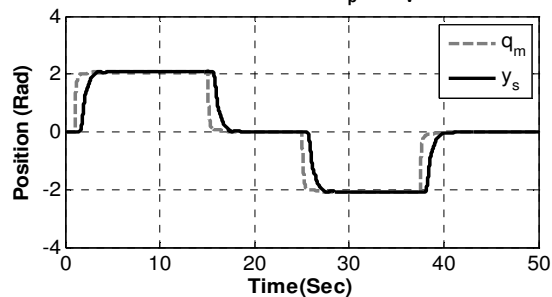


شکل (۹) - گشتاور اعمالی به موتور ربات راهبر و پیرو با وجود هر دو نوع کنترل کننده.

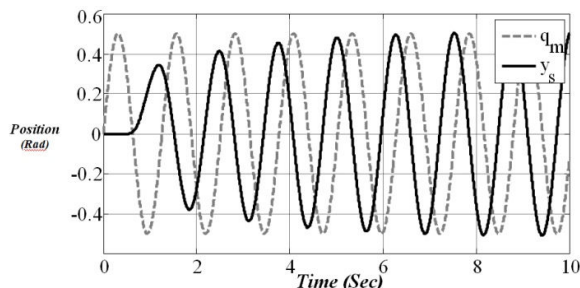
### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طرح کنترلی جدیدی برای سیستم جراحی رباتیک از راه دور غیرخطی دوجانبه با وجود انعطاف‌پذیری ربات جراح و تأخیر زمانی ثابت ارائه شده است. چهارچوب معرفی شده شامل کنترل کننده تناسبی- مشتقی در هر دوسوی سیستم جراحی رباتیک از راه دور است که خارج از حلقه بسته کنترلی ربات جراح با استفاده از شکل دهنده ورودی تقویت شده است. به عبارت دیگر، معادلات دینامیک غیرخطی ربات انعطاف‌پذیر به جای مدل خطی و یا خطی شده، استفاده شده است. بنابراین، نیاز به شناسایی مدل حقیقی دینامیک و یا عدم قطعیت پارامترها از بین رفته است. تنها اطلاعات مورد نیاز برای تولید فرمان شکل‌یافته راهبر، فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی سیستم حلقه بسته است.

Position Tracking,  $k_p=5, k_v=0.2$



شکل (۷) - ردیابی موقعیت با وجود کنترل کننده *IS-PD*، طرح اول حرکتی.



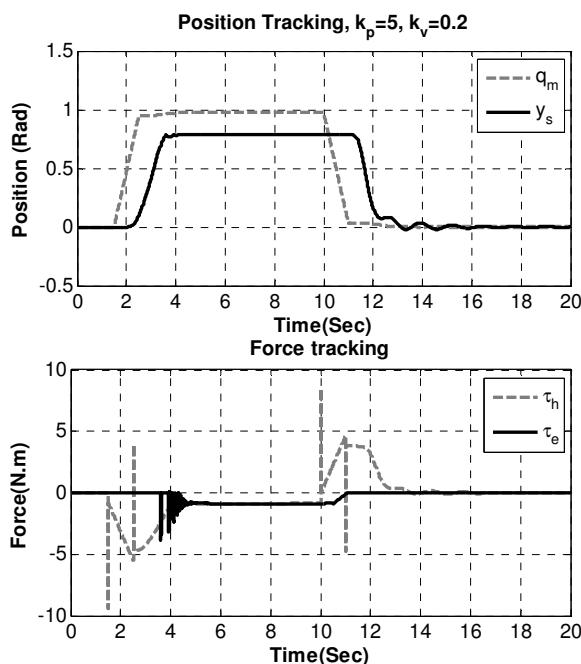
شکل (۸) - ردیابی خروجی سیستم رباتیکی از راه دور با وجود کنترل ترکیبی *IS-PD*.

برای روشن‌تر شدن تأثیر اضافه کردن کنترل کننده پیش‌خوراند در حلقه کنترلی سیستم عملیات از راه دور، گشتاور موتور ربات‌های راهبر و پیرو در هر دو کنترل کننده با یکدیگر مورد مقایسه شدند [شکل (۹)]. مطابق با این نمودارها، نوسان موجود در گشتاور اعمالی به ربات‌ها تا میزان زیادی رفع شده است. در این صورت احتمال آسیب به موتور ربات‌ها و حسگرهای موجود کم‌تر می‌شود. از طرف دیگر، کاهش میزان نوسانات و پرهیز از اعمال یکباره فرمان از میزان گشتاور ربات پیرو به میزان قابل توجهی کاسته است. به علاوه، به دلیل تأخیر ذاتی به وجود آمده ناشی از کنترل کننده *IS-PD*، برای کاهش خطای میان موقعیت‌ها گشتاور راهبر در مقایسه با قبل کمی افزایش یافته است.

مطابق با شکل (۱۰)، کنترل کننده شکل دهنده ورودی بر ردیابی و مقدار نیروی ناگهانی هنگام برخورد با محیط اثر می‌گذارد؛ اما حین تماس تقریباً بی‌تأثیر است. در حقیقت، شکل دهنده ورودی در مسیر پیش‌خوراند، بر نیروی اعمال شده بر عملگر بی‌تأثیر است [۱۲]. با وجود این، میزان ارتعاشات در

## ۶- مراجع

- [1] Tavakoli M., Howe R.D., Haptic effects of surgical teleoperator flexibility; The international journal of robotic research, 2009; 28(10): 1289-1302.
- [2] Beasley R.A., Howe R.D., Increasing accuracy in Image-Guided robotic surgery through tip tracking and Model-based flexion correction; IEEE Transaction on robotics, 2009; 25(2): 292-302.
- [3] Atashzar S.F., Talebi H.A., Towhidkhal F., Shahbazi M., Patel R.V., Shojae S., Control challenges in non-minimum phase Tele robotics systems; IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Budapest, 2011; 152-157.
- [4] Nuño E., Ortega R., Barabanov N., Basañez L., A globally stable PD controller for bilateral teleoperators; IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, 2008; 24(3): 753-758.
- [5] Lee D., Spong M.W., Passive bilateral teleoperation with constant time delay; IEEE Transaction on robotics, 2006; 22(2): 269-281.
- [6] Mohamed Z., Tokhi M.O., Command shaping techniques for vibration control of a flexible robot manipulator; Mechatronics, 2004; 14: 69-90.
- [7] Chatlatanagulchai W., Pruthapong C., Input Shaping to Reduce Vibration in Human-Operated Very-Flexible-Link Robot Manipulator; KKU Engineering Journal, 2009; 36(1): 77-85.
- [8] Vaughan J, Yano A, Singhose W; Comparison of robust input shapers; Journal of Sound and Vibration 2008; 315: 797-815.
- [9] Kapila V., Tzes A., Yan Q., Closed-loop Input Shaping for flexible structures using time-delay control; Proceedings of the 38'm Conference on Decision & Control, Phoenix, 1999; 1561-1566.
- [10] Huey J.R., Singhose W., Trends in the stability properties of CLSS controllers: A Root-Locus analysis; IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2010; 18(5): 1044-1056.
- [11] Sun D., Mills J.K., Shan J., Tso S.K., A PZT actuator control of a single-link flexible manipulator based on linear velocity feedback and actuator placement; Mechatronics, 2004; 14: 381-401.
- [12] Huey J.R., Sorensen K.L., Singhose W.E., Useful applications of closed-loop signal shaping controllers; Control Engineering Practice, 2008; 16: 836-846.



شکل (۱۰)- نتایج شبیه‌سازی سیستم رباتیکی از راه دور کنترل شده با

IS-PD

تحلیل جامعی از پایداری کل سیستم حلقه بسته ارائه شده است. مطابق با بررسی‌های تئوری انجام شده، تمام متغیرهای سیستم محدود باقی خواهند ماند. هم‌چنین با فرض منفعل بودن نیروهای خارجی سیستم جراحی رباتیک از راه دور، سرعت مفاصل و متغیرهای ارتعاشی به صفر همگرا می‌شود. علاوه بر این، ساختار معرفی شده، شفافیت ایده‌آل را تضمین می‌کند در حالی که ساختارهای پیشین تنها شفافیت را بهبود می‌بخشند.

قانون کنترلی جدید برای سیستم رباتیک از راه دور غیرخطی دوجانبه با ربات پیرو انعطاف‌پذیر اجرا و بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی، بیانگر تأثیر موفقیت‌آمیز کنترل ترکیبی IS-PD در برطرف کردن نوسان حین حرکت ربات جراح و هموار کردن پاسخ سیستم انعطاف‌پذیر هستند.