

طراحی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی روش‌های کنترل ادمیتانس و امیدانس روی یک واسط لامسه‌ی

بهمن بهزادپور (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مجید محمدی مقدم* (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی وهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

محمدرضا ارباب‌نفتی (استادیار)

دانشکده‌ی هندی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی تهران

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۳)
دوری ۲ - ۳، شماره ۱/۲، ص. ۱۳-۳

در این نوشتار به طراحی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی چند کنترل‌کننده‌ی متفاوت روی یک واسط هپتیک پرداخته شده و نتایج حاصل از اعمال این کنترل‌کننده‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. یک کنترل‌کننده‌ی امیدانس با بازخورد نیرو و یک کنترل‌کننده‌ی ادمیتانس با بازخورد موقعیت روی این واسط هپتیک پیاده‌سازی شده است. به منظور کنترل موقعیت در روش کنترل ادمیتانس، از روش کنترل غیرخطی دینامیک معکوس استفاده شده است. در محل کارگیر واسط هپتیک از یک حسگر نیرو/گشتاور شش درجه آزادی برای افزایش عملکرد و پایداری واسط مورد نظر استفاده شده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و پیاده‌سازی حلقه‌های کنترلی متفاوت حاکی از آن است که پاسخ عملکرد روش کنترل امیدانس برای شبیه‌سازی دیواره‌ی سخت، و روش کنترل ادمیتانس برای شبیه‌سازی دیواره‌ی نرم مناسب‌تر است. همچنین روش کنترل ادمیتانس در کنترل واسط‌های هپتیک با جرم و ایزرسی بالا از عملکرد بهتری برخوردار است.

واژگان کلیدی: واسط هپتیک، محیط مجازی، کنترل امیدانس، کنترل ادمیتانس، دینامیک معکوس.

bahman.behzadpour@yahoo.com
m.moghadam@modares.ac.ir
mr.tafti@gmail.com

۱. مقدمه

هپتیک^۱ عبارت است از ارتباط حسی و نیرویی بین محیط مجازی و کاربر در سیستم‌های واقعیت مجازی^۲، یا در سیستم‌های راهبر و پیرو.^[۱] در سیستم واقعیت مجازی، واسط هپتیک^۳ وسیله‌ی است که به کاربر اجازه می‌دهد با دریافت بازخورد لامسه‌ی، با محیط مجازی درون رایانه در تعامل باشد. پیشنهاد استفاده از یک واسط هپتیک بین کاربر و محیط مجازی، اولین بار در سال ۱۹۶۵ میلادی و توسط ایوان سوترلند ارائه شد.^[۱] اولین نمونه از واسط‌های هپتیک نیز یک وسیله‌ی یک درجه آزادی است که در دانشگاه Northwestern ساخته شد.^[۲] نیاز به افزایش

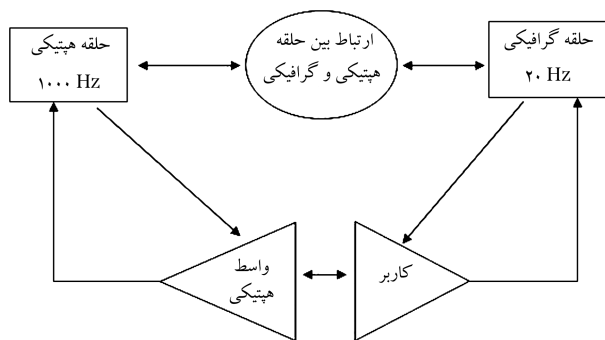
تقابل بین رایانه و انسان، واسط‌های هپتیک جدیدی را که قادر به تبادل اطلاعات در سطح وسیع بین رایانه و کاربر هستند به وجود آورد و به تبع آن استفاده از واقعیت مجازی توسعه پیدا کرد.^[۳] امروزه برای واقعیت مجازی و هپتیک می‌توان کاربردهایی نظیر شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی به منظور آموزش به دانش آموزان، شبیه‌سازی صحنه‌ی نبرد و مبارزه برای آموزش به نظامیان، ایجاد ارتباط‌های حسی/نیروی لامسه‌ی با رایانه به منظور تسهیل ارتباط کاربران نابینا با رایانه، و ایجاد بازی‌های رایانه‌ی که علاوه بر نمایش تصاویر گرافیکی ارتباط حسی و نیرویی کاربر با محیط مجازی را برقرار می‌کنند، برشمرد.^[۴] تاکنون در دنیا مطالعات و فعالیت‌های زیادی در

از سوی دیگر، چون عموماً واسط‌های هپتیک موجود در بازار به علت گرانی سنسور نیرو، هیچ حسگر نیرویی در کارگیر خود ندارند، همواره از روش امیدانس حلقه‌باز برای کنترل واسط هپتیک استفاده می‌کنند. حال آن که این روش نیازمند استفاده از واسط‌های هپتیک با وزن کم برای کاهش تأثیر دینامیک سیستم بر عملکرد شبیه‌سازی است، که با سبک‌تر شدن واسط به همان میزان نیروی منتقل‌شونده توسط واسط کاهش می‌یابد. لذا برای شبیه‌سازی‌هایی که دارای مقدار زیادی فضای کاری و نیروی قابل انتقال به کاربر هستند، واسط‌های هپتیک با ساختار سنگین مورد نیاز است. در این موارد پس‌خورد نیروی اعمالی به کاربر در حلقه‌ی کنترلی الزامی است، و دیگر نمی‌توان در این سیستم‌ها از روش کنترل حلقه‌باز استفاده کرد.^[۵]

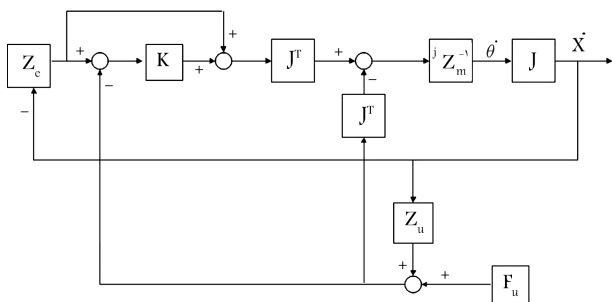
هدف این نوشتار، مقایسه‌ی انواع الگوریتم‌های کنترلی برای توسعه‌ی وسیله‌های هپتیک با کاربردهای متفاوت، و نیز اضافه‌کردن توانایی پس‌خورد نیرو به حلقه‌ی کنترلی به منظور افزایش عملکرد و پایداری وسیله‌ی هپتیک است. در این نوشتار،

* نویسنده مسئول

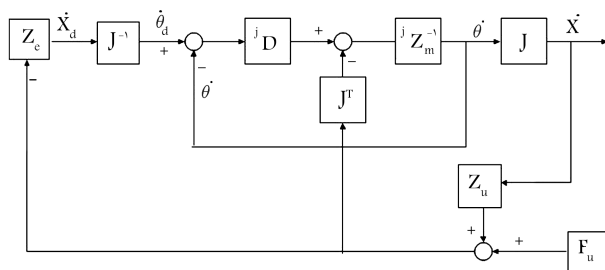
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۲/۲/۴، پذیرش ۱۳۹۲/۲/۱۸.



شکل ۱. واحدهای مختلف یک وسیله‌ی هپتیکی و نحوه‌ی ارتباط آن‌ها.



شکل ۲. روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو.



شکل ۳. کنترل ادمیتانس با بازخورد موقعیت.

نهایت گشتاور مورد نیاز برای تأمین این جابه‌جایی به واسطه هپتیکی اعمال می‌شود. می‌توان گفت مهم‌ترین ساختار کنترل ادمیتانس طراحی شده مربوط به Becker و Maples است و «کنترل ادمیتانس با بازخورد موقعیت» نامیده می‌شود (شکل ۳).^[۹]

در این روش کنترلی، محیط مجازی به‌صورت ادمیتانسی عمل می‌کند؛ یعنی با دریافت ورودی نیرو مقدار خروجی جابه‌جایی را تعیین، و به‌عنوان موقعیت مطلوب ابزار مجازی مشخص می‌کند. سپس برای رسیدن به این موقعیت مطلوب، کاربرد کنترل‌کننده‌ی موقعیت ضرورت می‌یابد که خروجی آن به‌صورت گشتاور به واسطه هپتیکی وارد می‌شود.^[۱۰]

$$Z_{hCL} = \frac{Z_m}{DZ_e^{-1} + 1} + \frac{D}{DZ_e^{-1} + 1} + Z_u \quad (3)$$

مقدار امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم در قالب معادله‌ی ۳ بیان می‌شود که در آن، هرگاه سرعت حلقه‌ی داخلی -- همان کنترل‌کننده‌ی موقعیت -- زیاد باشد، آنگاه امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم تقریباً برابر امیدانس محیط مجازی خواهد شد. گفتنی است زیاد بودن سرعت حلقه‌ی داخلی مستلزم آن است که ضرایب کنترلی، کنترل‌کننده‌ی D بزرگ باشند.

ابتدا روش‌های کنترلی امیدانس و ادمیتانس بررسی و سپس تحلیل‌های سینماتیکی و دینامیکی روی واسطه هپتیکی مورد نظر انجام شده است. سپس واسطه هپتیکی و حلقه‌ی کنترلی آن به‌طور کامل شبیه‌سازی شده و در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمون‌های واقعی برای سناریوهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

۲. حلقه کنترلی واسطه هپتیکی

با توجه به شکل ۱ هر وسیله‌ی هپتیکی از قسمت‌های مختلفی همچون: کاربر، واسطه هپتیکی، حلقه‌ی کنترلی و محیط گرافیکی تشکیل شده است. تعیین مقدار نیروی تولید شده در محیط مجازی بر عهده‌ی حلقه‌ی کنترلی وسیله‌ی هپتیکی، و انتقال این نیرو به کاربر بر عهده‌ی واسطه هپتیکی است.^[۷] در سیستم‌های هپتیکی همواره هدف این است که کاربر تنها امیدانس محیط مجازی را احساس کند و امیدانس ناشی از اینرسی واسطه هپتیکی، اصطکاک و... به کاربر وارد نشود. بنابراین در حالت ایده‌آل، امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم که از تقسیم نیروی اعمالی از سوی کاربر به جابه‌جایی اعمال شده به کاربر حاصل می‌شود، باید برابر امیدانس محیط مجازی باشد.

$$Z_{hCL} \approx Z_e + Z_u \quad (1)$$

در معادله‌ی ۱ امیدانس محیط مجازی با Z_e و امیدانس دست کاربر نیز با Z_u نشان داده شده است؛ مجموع این دو برابر است با امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم Z_{hCL} .

۲.۱. روش کنترل امیدانس

در روش کنترل امیدانس جابه‌جایی، به‌عنوان ورودی، از طرف کاربر به واسطه هپتیکی اعمال می‌شود و نیروی حاصل از محیط شبیه‌سازی شده کنترل می‌شود. چنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، محیط مجازی به‌عنوان امیدانس عمل می‌کند که با ورود جابه‌جایی، «نیرو» خروجی این محیط خواهد بود.^[۸]

در این شکل Z_e نمایانگر امیدانس محیط مجازی است. همچنین jZ_m^{-1} ادمیتانس واسطه هپتیکی است که در فضای مفاصل تعریف شده است، و Z_u امیدانس مدل شده برای کاربر است که بین نقطه‌ی تماس حس‌گر نیرو و کاربر در نظر گرفته می‌شود. در این الگوریتم از تابع تبدیل K برای کنترل نیرو استفاده می‌شود. در شکل ۲، J^T و J به ترتیب معرف ماتریس ژاکوبین و ترانزپوز این ماتریس‌اند و مقادیر $\dot{\theta}$ و \dot{X} نیز نمایانگر پارامترهای سرعت در فضای مفاصل و دکارتی‌اند. در نهایت امیدانس حلقه‌بسته‌ی این روش کنترلی به‌صورت معادله‌ی ۲ بیان می‌شود:

$$Z_{hCL} = Z_u + \frac{Z_m}{1 + K} + Z_e \quad (2)$$

با توجه به معادله ۲، می‌توان نتیجه گرفت که مجموع مقاومت‌های ظاهری، دست کاربر، واسطه هپتیکی و محیط مجازی با مقاومت ظاهری حلقه‌بسته‌ی سیستم برابر است. اما در این سیستم می‌توان با انتخاب مناسب ضرایب کنترلی برای کنترل‌کننده‌ی K تأثیر امیدانس واسطه هپتیکی را کم کرد و امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم را به مقدار ایده‌آل خود -- که برابر امیدانس محیط مجازی است -- نزدیک کرد. این شیوه‌ی کنترلی را «روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو» می‌نامند.

۲.۲. روش کنترل ادمیتانس

در این روش نیروی اعمالی از سوی کاربر مشخص، و به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده انتخاب می‌شود. سپس جابه‌جایی متناسب با این ورودی کنترل می‌شود، و در

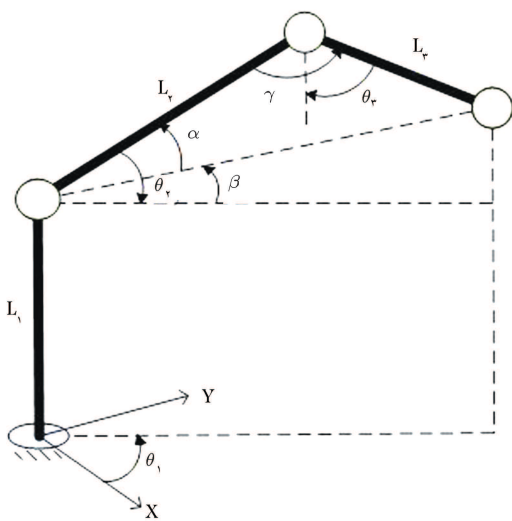
$$T_0^* = \begin{bmatrix} c_2(s_1s_2+c_2c_1c_{23})-s_2c_1s_{23} & -c_2c_1s_{23}-s_2(s_1s_2+c_2c_1c_{23}) & s_2c_1c_{23}-c_2s_1 & l_2c_1c_2-l_2c_1s_{23} \\ -s_2s_1s_{23}-c_2(c_1s_2+c_2c_{23}s_1) & s_2(c_1s_2+c_2c_{23}s_1)-c_2s_1s_{23} & c_1c_2+s_2c_{23}s_1 & l_2c_2s_1-l_2s_1s_{23} \\ -s_2c_{23}-c_2c_2s_{23} & c_2s_2s_{23}-c_2c_{23} & -s_2s_{23} & l_1-l_2s_2-l_2c_{23} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad (4)$$

براساس موقعیت‌های مفاصل واسط هپتیک است. در واقع ارتباط بین موقعیت در دو فضای دکارتی و مفاصل توسط معادلات سینماتیک مستقیم انجام می‌گیرد. معادلات سینماتیک مستقیم برای کارگر واسط هپتیک نسبت به مختصات مبدأ، تنها مؤلفه‌های ستون چهارم ماتریس تبدیل کلی است که براساس ابعاد بازوها و زوایای واسط هپتیک مشخص می‌شود:

$$\begin{aligned} X &= l_2c_1c_2-l_2c_1s_{23} \\ Y &= l_2c_2s_1-l_2s_1s_{23} \\ Z &= l_1-l_2s_2-l_2c_{23} \end{aligned} \quad (5)$$

۲.۳. معادلات سینماتیک معکوس

هدف از استخراج معادلات سینماتیک معکوس، تعیین موقعیت هر یک از مفاصل برای دست‌یابی به موقعیت مطلوب قلم مجازی است. برای تعیین موقعیت کارگر فقط زوایای اول تا سوم واسط هپتیک مورد نیاز است و زوایای چهارم تا پنجم در واقع مشخص‌کننده‌ی واسط هپتیک برای کارگر هستند. بر این اساس، برای استخراج معادلات سینماتیک معکوس کافی است فقط از زوایای اول تا سوم بهره‌گیریم. در این قسمت برای استخراج معادلات سینماتیک معکوس از روش حل هندسی استفاده شده، که در آن با توجه به روابط هندسی و مثلثاتی حاکم بین زاویه‌های مفاصل و طول بازوها می‌توان معادلات سینماتیک معکوس مکانیزم را استخراج کرد. با توجه به شکل ۵ و موقعیت کارگر مکانیزم نسبت به محورهای مختصات مبدأ که با X, Y, Z نشان داده شده، و نیز طول بازوهای اول، دوم و سوم که به ترتیب با L_1, L_2, L_3 نشان داده شده، زوایای اول تا سوم این واسط مطابق معادلات ۶ تا ۸ $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ نوشته می‌شود.



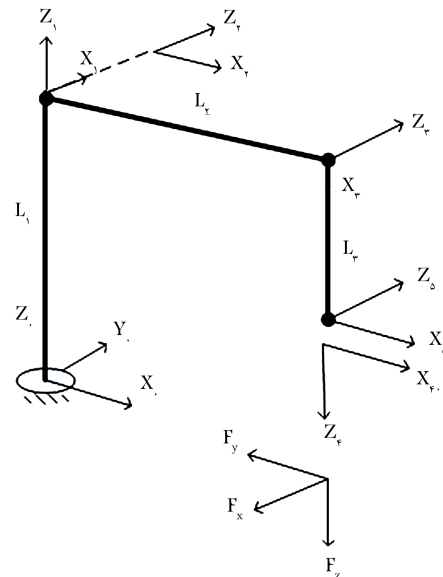
شکل ۵. روابط هندسی بین بازوهای واسط هپتیک.

۳. تحلیل سینماتیک و دینامیک واسط هپتیک

برای استخراج معادلات سینماتیک و دینامیک حاکم بر واسط هپتیک، ابتدا باید ماتریس‌های تبدیل هر یک از بازوهای واسط هپتیک استخراج شود. بدین منظور لازم است روی هر یک از بازوهای واسط هپتیک محور مختصاتی تعریف شود (شکل ۴) و پارامترهای دناویت - هارتنبرگ^۱ بصورت جدول ۱ برای واسط هپتیک استخراج شود. با توجه به شکل ۴، ماتریس تبدیل کلی مکانیزم، از کارگر واسط تا مختصات مبدأ، به صورت معادله ۴ بیان می‌شود. که در آن S_i و C_i به ترتیب نمایانگر $\sin(\theta_i)$ و $\cos(\theta_i)$ و l_i نمایانگر طول بازوی i ام است.

۱.۳. معادلات سینماتیک مستقیم

هدف از استخراج معادلات سینماتیک مستقیم، تعیین موقعیت کارگر واسط هپتیک در فضای دکارتی و متناسب با آن، تعیین موقعیت قلم مجازی در محیط مجازی



شکل ۴. شماتیک واسط هپتیک به همراه مختصات محلی بازوها و حس‌گر نیرو.

جدول ۱. پارامترهای دناویت - هارتنبرگ.

θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}	I
θ_1	L_1	۰	۰	۱
θ_2	۰	۰	-90°	۲
θ_3	۰	L_2	۰	۳
θ_4	L_3	۰	-90°	۴
θ_5	۰	۰	90°	۵

$$M_{12} = 0, M_{21} = 0, M_{13} = 0, M_{31} = 0$$

$$M_{22} = 0,7038C_1^2 + 0,7038S_1^2 + 0,7021S_2 + 0,7011$$

$$M_{23} = 0,701S_{2r}, \quad M_{32} = 0,701S_{2r}, \quad M_{33} = 0,700052$$

$$V_{11} = 0,7021\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C_1^2C_2 - 0,7043\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C_2S_2S_2 - 0,7089\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C_2S_2 \\ - 0,7021\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C_2S_2^2 + 0,7021\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C_1^2C_2 \\ - 0,7021\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C_2S_2S_2$$

$$V_{21} = -0,701\dot{\theta}_1^2C_1^2C_2 + 0,701\dot{\theta}_1^2C_2C_2^2S_2S_2 + 0,7034\dot{\theta}_1^2C_2C_2^2S_2 \\ + 0,701\dot{\theta}_1^2C_2S_2S_2^2 + 0,7042\dot{\theta}_1^2C_2S_2S_2^2 + 0,701\dot{\theta}_1^2C_2S_2S_2 \\ + 0,701\dot{\theta}_1^2C_2^2S_2^2 + 0,701\dot{\theta}_1^2C_2S_2^2S_2^2 + 0,7021\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2C_2 \\ + 0,701\dot{\theta}_2^2C_2$$

$$V_{31} = -0,701\dot{\theta}_1^2C_1^2C_2 + 0,701\dot{\theta}_1^2C_2S_2S_2 - 0,701\dot{\theta}_2^2C_2 \quad (10)$$

۴. شبیه‌سازی دینامیکی واسط هپتیک

هدف از شبیه‌سازی‌های دینامیکی بررسی نحوه‌ی عملکرد مکانیزم، حرکت بازوها، سنجش صحت محاسبات اولیه، انجام محاسبات با فرضیات کامل‌تر و به دست آوردن اعداد و مشخصاتی است که فرمول‌بندی و محاسبه‌ی آن دشوار است. برای شبیه‌سازی واسط هپتیک ابتدا شبیه‌سازی کامل وسیله‌ی هپتیک در نرم‌افزار MD Adams صورت گرفت (شکل ۶). سپس شبیه‌سازی حلقه‌ی کنترلی حلقه‌بسته‌ی واسط هپتیک در نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام، و در نهایت با ایجاد ارتباط بین این دو نرم‌افزار حلقه‌ی کامل هپتیک بسته شد (شکل ۷).

۱.۴. شبیه‌سازی به روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو

هدف از ایجاد برنامه‌ی کنترلی مدار بسته، بررسی نحوه‌ی عملکرد برنامه‌ی شبیه‌سازی شده‌ی هپتیک و مقایسه‌ی آن با وسیله‌ی هپتیک ساخته شده به منظور تعیین صحت نحوه‌ی عملکرد آن است.

برنامه‌ی کنترلی مدار بسته در قالب بخش‌های مختلف و در محیط Simulink ایجاد شده است. این بخش‌ها با یکدیگر در ارتباطند و در نهایت گشتاور خروجی مورد نیاز برای اعمال به عملگرها را در محیط نرم‌افزار MD Adams تولید می‌کنند. بدنه‌ی کلی این شبیه‌سازی در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی محیط مجازی ایجاد نشده، بلکه در آن صفحه‌ی در مختصات کارتزین تعریف شده که به عنوان سطح جرم مجازی در نظر گرفته می‌شود و ابزار نیز در واقع موقعیت کارگیر مدل دینامیکی است. مقاومت این صفحه در مقابل مختصات ابزار مجازی همانند نمونه‌ی اصلی با ضریب سختی فنر خطی (K) و ضریب دمپینگ (B) تعیین می‌شود.^[۱۲]

۲.۴. شبیه‌سازی به روش کنترل امیدانس با بازخورد موقعیت

برای شبیه‌سازی وسیله‌ی هپتیک به روش کنترل امیدانس با بازخورد موقعیت، ابتدا مقدار نیروی ورودی از سمت کاربر توسط حس‌گر نیرویی محاسبه می‌شود. سپس با توجه به مقدار نیرو و ضرایب سختی و دمپینگ محیط مجازی، میزان جابه‌جایی مطلوب برای قلم مجازی محاسبه می‌شود.

$$\theta_1 = \arctan 2(Y, X) \quad (6)$$

$$L_r = \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - L_1)^2}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{L_r^2 + L_r^2 - L_r^2}{2L_rL_r}\right)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{L_r^2 + L_r^2 - L_r^2}{2L_rL_r}\right)$$

$$\beta = \arctan 2(Z - L_1, \sqrt{X^2 + Y^2})$$

$$\theta_r = -(\alpha + \beta) \quad (7)$$

$$\theta_r = -\gamma + \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

۳.۳. ماتریس ژاکوبین

در مکانیزم‌های رباتیکی ارتباط بین نیروهای وارد و گشتاورهای تولیدکننده‌ی آنها که به مفصل وارد می‌شوند از طریق ماتریس ژاکوبین حاصل می‌شود. بنابراین برای اعمال نیروی حاصل از برخورد قلم مجازی با دیواره‌های موجود در محیط مجازی که در روش کنترل امیدانس محاسبه می‌شود، استخراج ماتریس ژاکوبین مکانیزم به منظور محاسبه‌ی گشتاورهای مورد نیاز موتورها ضرورت می‌یابد. به منظور به دست آوردن ماتریس ژاکوبین برای واسط هپتیک مورد نظر، می‌توان از معادلات سینماتیک مستقیم مکانیزم استفاده کرد.^[۱۱] در این قسمت با مشتق‌گیری زمانی از معادلات سینماتیک مستقیم نسبت به متغیرهای آن، خروجی به صورت معادله‌ی ۹ بیان می‌شود که ماتریس ضرایب آن ماتریس ژاکوبین است:

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} -s_1(l_2c_2 - l_3s_2r) & -c_1(l_2s_2 + l_3c_2r) & -l_3c_1c_2r \\ (l_2c_2 - l_3s_2r)c_1 & -s_1(l_2s_2 - l_3c_2r) & -l_3s_1c_2r \\ 0 & -(l_2c_2 - l_3s_2r) & l_3s_2r \end{bmatrix} \quad (9)$$

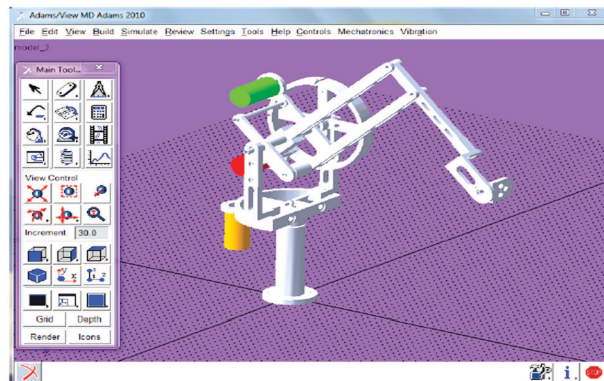
۴.۳. استخراج معادلات دینامیکی

برای کنترل موقعیت مطلوب قلم مجازی در روش کنترل امیدانس با بازخورد موقعیت، از روش کنترل غیرخطی دینامیک معکوس^۶ استفاده شده است. در این روش به منظور تعیین خروجی‌های کنترل نیاز به معادلات دینامیکی مکانیزم برای خطی‌سازی دینامیک غیرخطی مکانیزم است. با توجه به این نیاز، در این قسمت معادلات دینامیکی واسط هپتیک استخراج شده است. برای به دست آوردن معادلات دینامیکی واسط هپتیک از الگوریتم دینامیکی تکراری نیوتن - اولبر^۷ استفاده می‌شود.^[۱۱] و در نهایت، این معادلات به صورت زیر استخراج می‌شود:^[۱۲]

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{21} \\ V_{31} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \\ G_{31} \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = 0,7021C_1^2S_2 + 0,7045C_1^2 + 0,7021C_2C_2S_2$$

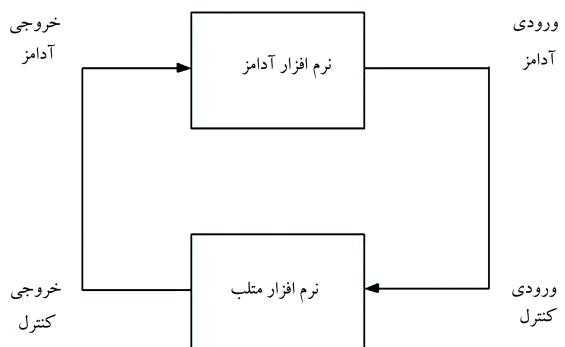
با توجه به این موضوع که موقعیت محاسبه شده در فضای دکارتی است و خروجی‌های انکودرهای واسط هپتیک در فضای مفصل است، بنابراین لازم است به کمک معادلات سینماتیک معکوس موقعیت مطلوب قلم مجازی در فضای مفصل تعریف، و سپس این موقعیت با موقعیت واقعی انکودرها مقایسه شود. در ادامه به کمک روش کنترل موقعیت میزان این اختلاف صفر می‌شود. در این روش برای کنترل موقعیت واسط هپتیک از روش دینامیک معکوس استفاده شده، که خروجی این کنترل‌کننده به عنوان گشتاور مورد نیاز موتورهای واسط هپتیک، وارد محیط شبیه‌سازی MD Adams می‌شود.^[۱۴] در شکل ۹ بدنه‌ی کلی برنامه‌ی کنترلی تعریف شده در محیط Simulink نشان داده شده است.



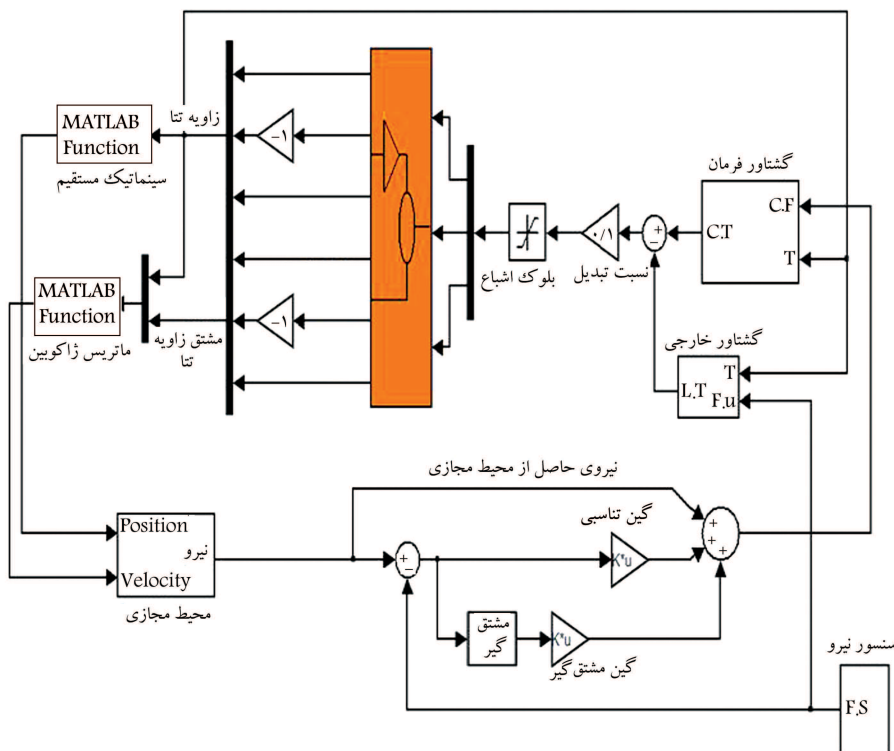
شکل ۶. مدل شبیه‌سازی شده واسط هپتیک در نرم‌افزار MD Adams با کلیه‌ی مختصات و قیود.

۳.۴. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی

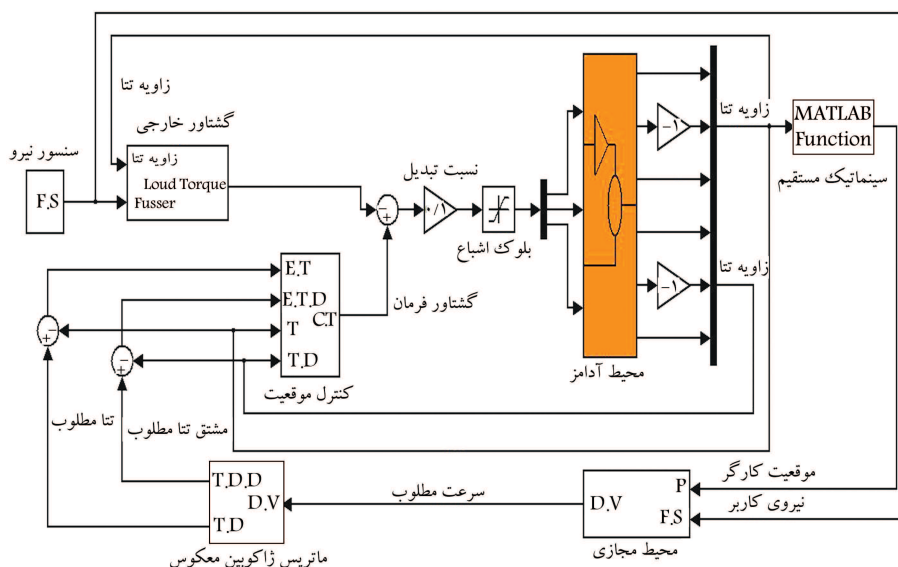
در سیستم‌های هپتیک هدف این است که کاربر فقط مقاومت ظاهری محیط مجازی را احساس کند و مقاومت ظاهری ناشی از اینرسی واسط هپتیک یا اصطکاک و غیره به کاربر وارد نشود. بنابراین در حالت ایده‌آل، مقاومت ظاهری حلقه‌بسته‌ی سیستم باید با مقاومت ظاهری محیط مجازی برابر باشد. واضح است که هر سیستم هپتیک، با توجه به نوع حلقه‌ی کنترلی موجود در آن سیستم، از مقاومت حلقه‌بسته‌ی خاص خود برخوردار است. در این پژوهش، معیار سنجش نتایج شبیه‌سازی نسبت به یکدیگر، میزان اختلاف امیدانس حلقه‌بسته‌ی ایده‌آل و امیدانس حلقه‌بسته‌ی واقعی سیستم است. این اختلاف بین امیدانس محیط مجازی با امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم را «خطای امیدانس» می‌نامند. در این قسمت نتایج حاصل از محاسبه‌ی خطای امیدانس برای دو روش امیدانس با بازخورد نیرو و ادمیتانس با بازخورد جابه‌جایی، براساس معیارهای مختلف -- نظیر سفتی یا نرمی دیوار محیط مجازی و مقادیر مختلف بهره‌های کنترلی، تأثیر اینرسی واسط



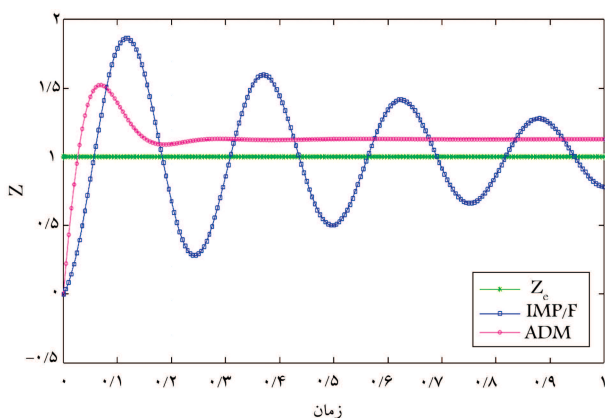
شکل ۷. نحوه ارتباط بین دو نرم‌افزار MATLAB و MD Adams برای شبیه‌سازی و کنترل واسط هپتیک.



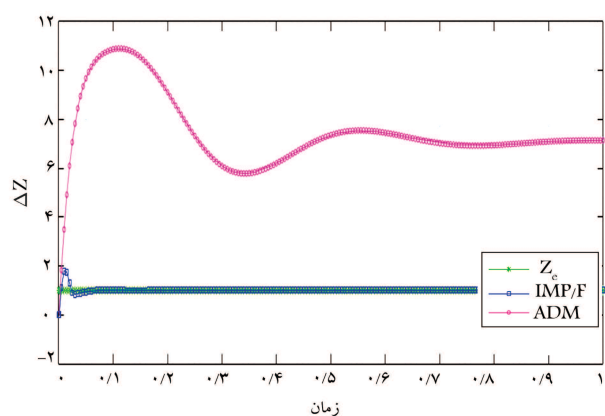
شکل ۸. بدنه‌ی کلی شبیه‌سازی به روش کنترل امیدانس با پیش‌خورد نیرو در محیط Simulink.



شکل ۹. بدنه‌ی کلی شبیه‌سازی به روش کنترل ادمیتانس با بازخورد موقعیت در محیط Simulink.



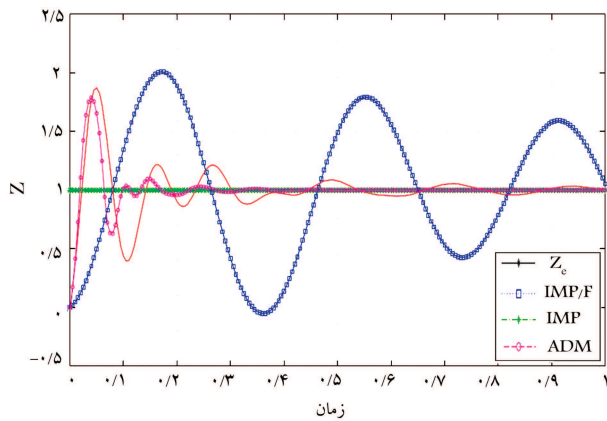
شکل ۱۰. مقایسه‌ی امپدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم با امپدانس محیط مجازی، برای روش کنترل امپدانس با پیشخورد نیرو (IMP/F) و کنترل ادمیتانس (ADM) به‌ازای محیط مجازی نرم در جهت محور Z .



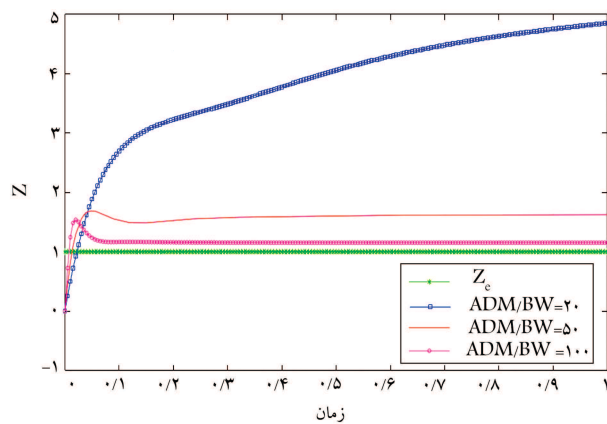
شکل ۱۱. مقایسه‌ی امپدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم با امپدانس محیط مجازی، برای روش کنترل امپدانس با پیشخورد نیرو (IMP/F) کنترل ادمیتانس (ADM) به‌ازای محیط مجازی سخت در جهت محور Z .

هیثیکی -- مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقایسه‌ی شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان می‌دهد که روش کنترل ادمیتانس با بازخورد جابه‌جایی، در اجسام نرم عملکرد بهتری نسبت به روش کنترل امپدانس با پیشخورد نیرو دارد؛ همچنین در اجسام سخت پاسخ روش کنترل امپدانس با پیشخورد نیرو بهتر است. دلیل این موضوع را می‌توان در معادلات امپدانس حلقه‌بسته‌ی هر دو سیستم مشاهده کرد. در معادله‌ی امپدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم کنترل امپدانس با پیشخورد نیرو با افزایش امپدانس محیط (Z_e)، تأثیر امپدانس واسط هیثیکی (Z_m) کم می‌شود و در نتیجه، امپدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم به امپدانس محیط نزدیک می‌شود و به کاهش خطای امپدانس (Z_{error}) می‌انجامد. همچنین در معادله‌ی امپدانس حلقه‌بسته، روش کنترل ادمیتانس با بازخورد موقعیت با کاهش مقدار امپدانس محیط مجازی (Z_e) مقدار عددی رابطه‌ی DZ_e^{-1} در مخرج کسر معادله افزایش می‌یابد. همین امر باعث کاهش تأثیر امپدانس واسط هیثیکی، و نزدیک‌تر شدن امپدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم به امپدانس محیط می‌شود، و در نهایت خطای امپدانس (Z_{error}) به صفر نزدیک می‌شود.

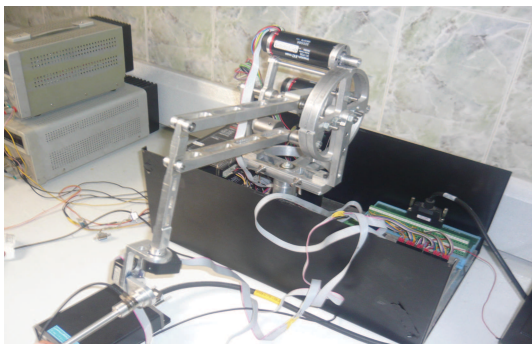
مقایسه‌ی شکل ۱۲ با شکل ۱۳ برای روش کنترل امپدانس با بازخورد نیرو، نشان می‌دهد که پاسخ این سیستم به‌ازای واسط هیثیکی با جرم زیاد، مطلوب نیست. زیرا با افزایش جرم واسط هیثیکی، میزان امپدانس واسط هیثیکی نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه، خطای امپدانس افزایش می‌یابد. انجام این مقایسه برای روش کنترل ادمیتانس با بازخورد موقعیت نشان می‌دهد که پاسخ این سیستم به‌ازای افزایش وزن واسط هیثیکی تغییر چندانی نمی‌کند و عملکرد این سیستم برای واسط هیثیکی با وزن بالا نیز مطلوب است. زیرا با افزایش جرم واسط هیثیکی، میزان امپدانس واسط هیثیکی نیز افزایش می‌یابد اما به دلیل بزرگ بودن ضریب کنترلی، کنترل‌کننده‌ی D زیاد بودن تفاضل بین این ضریب با امپدانس واسط هیثیکی، افزایش امپدانس واسط هیثیکی تأثیر چندانی بر عملکرد سیستم نمی‌گذارد. این موضوع باعث افزایش خطای امپدانس در روش کنترل ادمیتانس نمی‌شود. همچنین مقایسه‌ی شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهد که در هر دو سیستم کنترل امپدانس و کنترل ادمیتانس، می‌توان با افزایش بهره‌های کنترلی عملکرد سیستم را بهبود بخشید.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم با امیدانس محیط مجازی، برای روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو، به‌ازای ضرایب کنترلی ۰، ۱۰ و ۵۰ در جهت محور Z .



شکل ۱۵. مقایسه‌ی امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم با امیدانس محیط مجازی، برای روش کنترل ادمیتانس با بازخورد موقعیت، به‌ازای ضرایب ω ، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ و ضریب $\xi = 1$ در جهت محور Z .

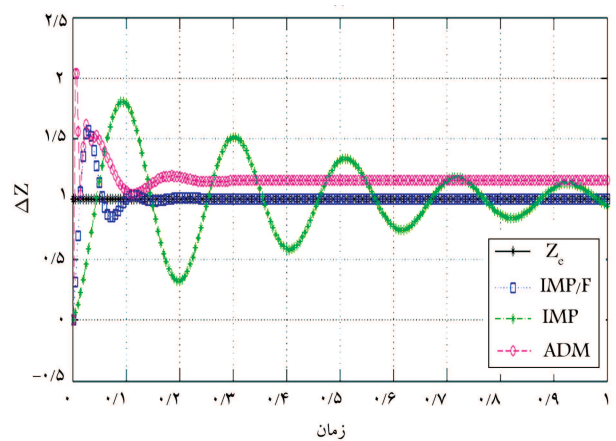


شکل ۱۶. واسط هپتیک مورد استفاده در این پژوهش با شش درجه آزادی.

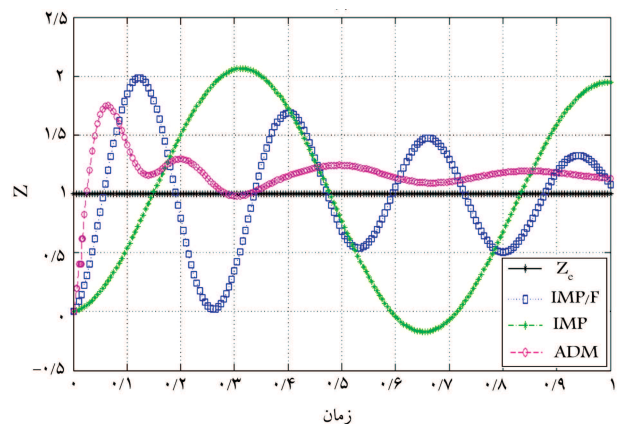
مقدار بیشینه نیروی ۳۵N در جهت Z ، و نیز گشتاور 25°Nm در سه جهت را دارد.

۲.۵. ایجاد محیط مجازی و شبیه‌سازی برخورد برای واسط هپتیک

در این نوشتار برای ایجاد محیط مجازی و شبیه‌سازی برخورد واسط هپتیک از برنامه‌ی نرم‌افزاری نوشته شده در محیط C# استفاده شده است. در این برنامه



شکل ۱۲. مقایسه‌ی امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم با امیدانس محیط مجازی، برای روش کنترل امیدانس حلقه‌باز (IMP) و با پیشخورد نیرو، و کنترل IMP/F و کنترل ادمیتانس (ADM) به‌ازای واسط هپتیک با اینرسی و وزن پایین در جهت محور Z .



شکل ۱۳. مقایسه‌ی امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم با امیدانس محیط مجازی، برای روش کنترل امیدانس حلقه‌باز (IMP) و با پیشخورد نیرو (IMP/F) و کنترل ادمیتانس (ADM) به‌ازای واسط هپتیک با اینرسی و وزن بالا در جهت محور Z .

۵. پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی

در این پژوهش، واسط هپتیک مورد استفاده یک ربات با شش درجه آزادی است (شکل ۱۶). این ربات دارای سه درجه آزادی فعال برای مشخص کردن موقعیت کارگیر واسط هپتیک در فضای مجازی، و سه درجه آزادی غیرفعال برای مشخص کردن جهت‌های کارگیر واسط در فضای مجازی، نسبت به مختصات مبدأ است.

۱.۵. حسگر نیرو/گشتاور

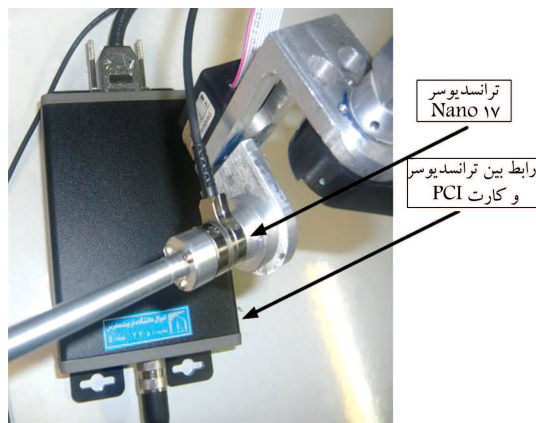
در این واسط هپتیک برای مشخص کردن مقدار نیروی دست کاربر که به کارگیر واسط هپتیک وارد می‌شود، و نیز مقدار نیرویی که از محیط مجازی توسط واسط هپتیک به کاربر اعمال می‌شود از یک حسگر شش درجه آزادی نیرو/گشتاور بصورت شکل ۱۷ استفاده می‌شود.

این حسگر ساخت شرکت ATI Industrial Automation و مدل NANO ۱۷ است که قابلیت حس کردن نیرو تا حداکثر ۲۵N در جهات X ، Y و

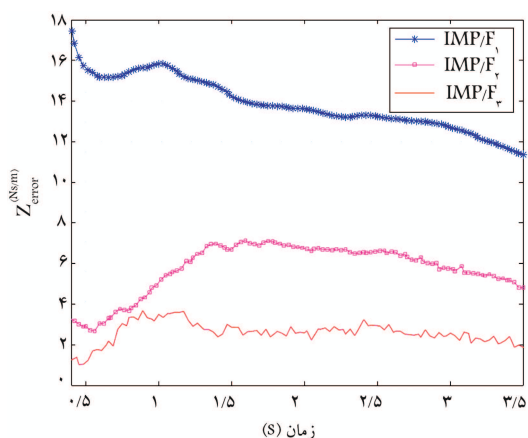
فتر و دمپر مدل شده فشرده می‌شوند. مقدار نیروی وارده براساس میزان این فشردگی محاسبه، و به دست کاربر منتقل می‌شود.

۳.۵. نتایج حاصل از آزمون واسط هپتیک

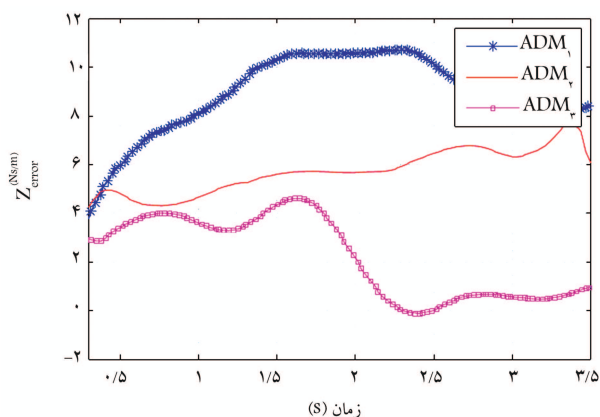
در این قسمت نتایج حاصل از آزمون واسط هپتیک به‌ازای ضرایب مختلف سفتی و دمپینگ محیط مجازی، و نیز بهره‌های کنترلی متفاوت برای دو روش کنترل امپدانس با بازخورد نیرو، و کنترل ادیمیتانس با بازخورد موقعیت ارائه شده است. چنان‌که در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب سفتی و دمپینگ محیط مجازی میزان خطای امپدانس سیستم برای روش کنترل امپدانس کاهش می‌یابد. در روش کنترل ادیمیتانس نیز با کاهش ضریب سفتی و دمپینگ محیط مجازی، میزان خطای امپدانس سیستم کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در این قسمت به منظور نمایش بهتر خطای امپدانس برای هر دو روش کنترلی از شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نیز استفاده شده است. همچنین مقایسه‌ی شکل‌های ۲۴ و ۲۵ نشان می‌دهد که در



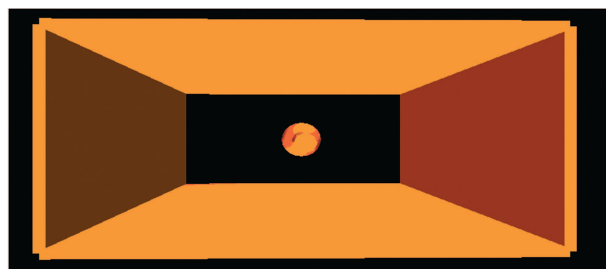
شکل ۱۷. حسگر نیرو/گشتاور نصب شده در کارگیر واسط هپتیک، با شش درجه آزادی برای تعیین نیروی اعمالی به دست کاربر.



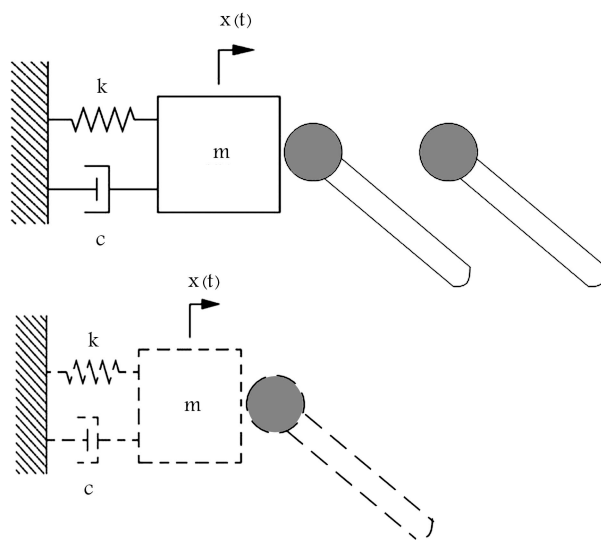
شکل ۲۰. مقایسه‌ی خطای امپدانس در روش کنترل امپدانس با بازخورد نیرو به‌ازای ضریب سفتی 300 N/m و دمپینگ 3 Ns/m برای IMP/F_1 ، و ضریب سفتی 300 N/m و دمپینگ 3 Ns/m برای IMP/F_2 ، و ضریب سفتی 500 N/m و دمپینگ 5 Ns/m برای IMP/F_3 .



شکل ۲۱. مقایسه‌ی خطای امپدانس در روش کنترل ادیمیتانس با بازخورد موقعیت به‌ازای ضریب سفتی 3000 N/m و دمپینگ 3 Ns/m برای (ADM_1) و ضریب سفتی 300 N/m و دمپینگ 3 Ns/m برای (ADM_2) و ضریب سفتی 100 N/m و دمپینگ 1 Ns/m برای (ADM_3) .



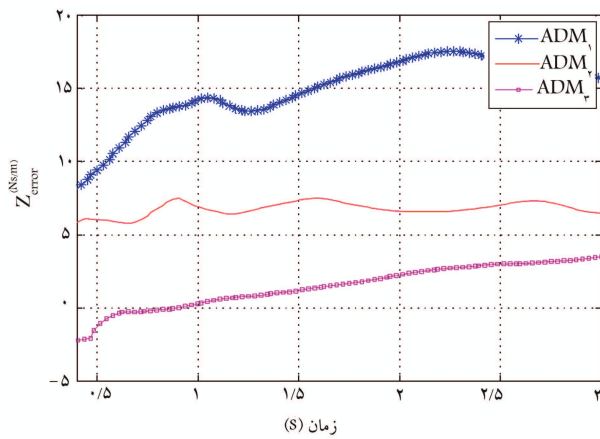
شکل ۱۸. محیط گرافیکی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار C#.



شکل ۱۹. شبیه‌سازی دیواره‌های مجازی به‌صورت مدلی از جرم، فتر و دمپر در روش کنترل ادیمیتانس.

محیط گرافیکی به‌صورت یک جعبه‌ی توخالی با پنج وجه در نظر گرفته شده است (شکل ۱۸). چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود، وجه‌های جعبه تشکیل‌دهنده‌ی سطوح مقاوم مجازی هستند و فضای خالی بین این سطوح مشخص‌کننده فضای آزاد است. هنگام برخورد قلم مجازی با سطوح یا دیواره‌ها، کاربر می‌تواند سفتی یا نرمی این دیواره‌ها را احساس کند.

در این برنامه با توجه به شکل ۱۹ دیواره‌های مجازی به‌صورت فتر و دمپر و جرم مجازی مدل شده‌اند که با برخورد قلم با دیواره و مقدار فرورفتگی آن در دیواره‌ها،



شکل ۲۵. مقایسه‌ی خطای امیدانس برای روش کنترل امیدانس با بازخورد موقعیت، به‌ازای بهره‌های کنترلی $\omega = 3, \xi = 0.2$ برای نمودار ADM_1 ، $\omega = 6, \xi = 0.4$ برای نمودار ADM_2 و $\omega = 8, \xi = 0.4$ برای نمودار ADM_3 .

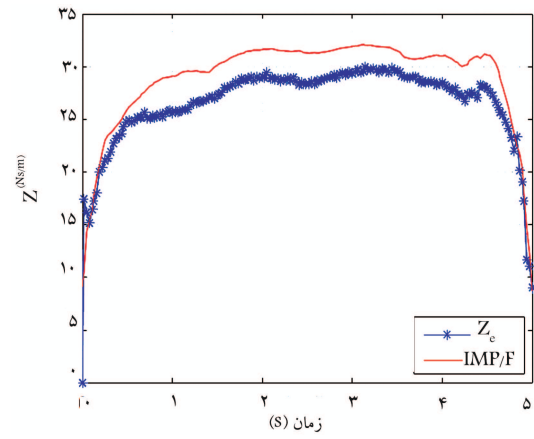
هر دو روش کنترلی با افزایش ضرایب کنترلی پاسخ عملکرد سیستم بهبود می‌یابد.

۶. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از آزمون واسط هپتیکی

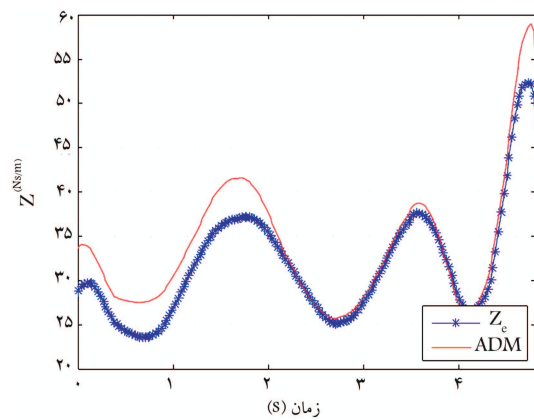
برای مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از آزمون واسط هپتیکی، ابتدا لازم است مقدار نیروی اعمالی از سوی کاربر -- که در آزمون واسط هپتیکی توسط حس‌گر نیرو مشخص می‌شود -- در شبیه‌سازی دینامیکی واسط هپتیکی نیز به‌عنوان نیروی اعمالی از سوی کاربر وارد حلقه‌ی شبیه‌سازی شود. در شکل‌های ۲۶ و ۲۷ نمودارهای مربوط به حس‌گر نیرو در سه جهت X, Y و Z برای روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو به‌ازای محیط مجازی با ضریب سفتی 500 N/m و دمپینگ 5 Ns/m (دیواره‌ی سخت) و روش کنترل امیدانس با بازخورد موقعیت به‌ازای محیط مجازی با ضریب سفتی 100 N/m و دمپینگ 1 Ns/m (دیواره‌ی نرم) نشان داده شده است. با وارد کردن نمودارهای ۲۶ و ۲۷ به محیط شبیه‌سازی دینامیکی واسط هپتیکی به‌عنوان نیروی دست کاربر، می‌توان نتایج شبیه‌سازی را با نتایج حاصل از آزمون واسط هپتیکی مقایسه کرد. معیار مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با آزمون واسط هپتیکی، میزان خطای امیدانس سیستم (Z_{error}) است که برای محاسبه‌ی آن لازم است اختلاف بین امیدانس محیط مجازی و امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم محاسبه شود. واضح است که هرچه خطای امیدانس سیستم به صفر نزدیک‌تر باشد عملکرد سیستم مطلوب‌تر می‌شود.

در شکل‌های ۲۸ و ۲۹، نتایج مقایسه‌ی میزان خطای امیدانس سیستم برای نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمون واسط هپتیکی به‌ازای روش کنترل امیدانس و کنترل امیدانس نشان داده شده است.

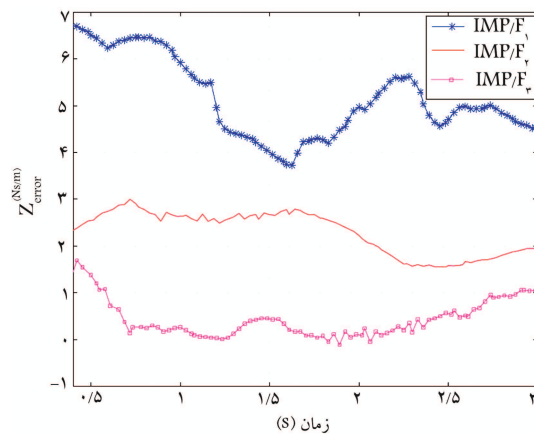
در این نمودارها مقداری اختلاف بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمون واسط هپتیکی وجود دارد که می‌توان آن را ناشی از شبیه‌سازی مدل امیدانس دست کاربر (Z_u) دانست. در آزمون واقعی واسط هپتیکی امیدانس دست کاربر مستقیماً به سیستم اعمال می‌شود، حال آن‌که در شبیه‌سازی مقدار این امیدانس به‌طور دقیق محاسبه نمی‌شود و فقط به‌صورت مدلی از جرم و فنر وارد سیستم می‌شود که این موضوع به ایجاد اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمون واقعی واسط هپتیکی منجر می‌شود.



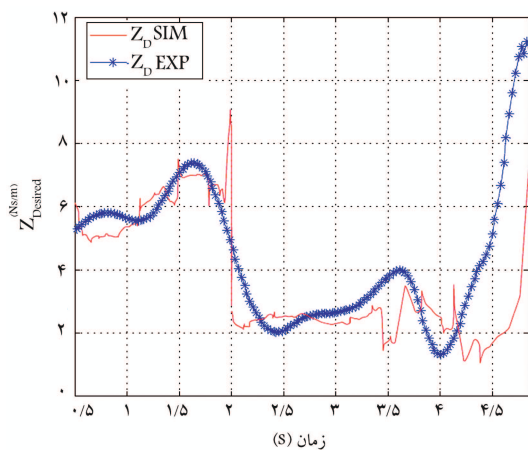
شکل ۲۲. مقایسه‌ی امیدانس حلقه‌بسته (IMP/F) با امیدانس محیط مجازی (Z_e) برای روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو به‌ازای ضریب سفتی 500 N/m و دمپینگ 5 Ns/m .



شکل ۲۳. مقایسه‌ی امیدانس حلقه‌بسته (ADM) با امیدانس محیط مجازی (Z_e) برای روش کنترل امیدانس با بازخورد موقعیت به‌ازای ضریب سفتی 100 N/m و دمپینگ 1 Ns/m .



شکل ۲۴. مقایسه‌ی خطای امیدانس برای روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو، به‌ازای بهره‌های کنترلی $D = 0, P = 0$ برای نمودار IMP/F_1 ، $D = 0.9, P = 5$ برای نمودار IMP/F_2 و $D = 0.9, P = 5$ برای نمودار IMP/F_3 .

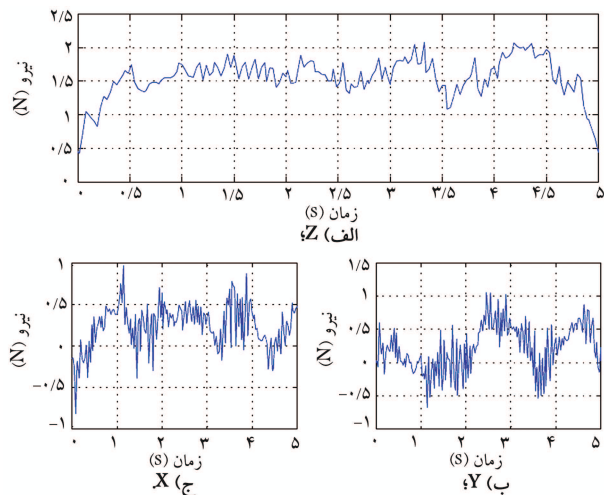


شکل ۲۹. مقایسه‌ی خطای امیدانس نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمون واسط هپتیک برای روش کنترل ادمیتانس با بازخورد موقعیت.

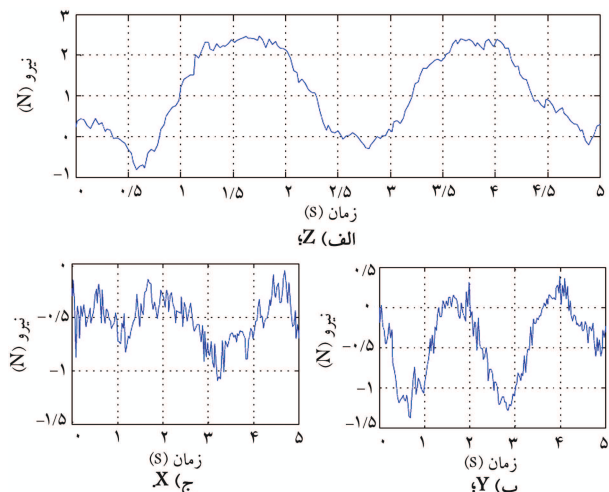
۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار طراحی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی چند روش کنترلی روی یک واسط هپتیک ارائه شده است. از روش‌های کنترلی امیدانس با بازخورد نیرو و ادمیتانس با بازخورد موقعیت به منظور کنترل واسط هپتیک شش درجه آزادی استفاده شده است. همچنین به منظور کنترل موقعیت در روش ادمیتانس از روش غیرخطی دینامیک معکوس استفاده شده است. از یک حس‌گر نیرو با سه درجه آزادی به منظور تعیین نیروی اعمالی به کاربر و بازخورد آن به حلقه‌ی کنترلی به منظور افزایش عملکرد و پایداری وسیله‌ی هپتیک مورد نظر استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی و پیاده‌سازی آزمایشگاهی حلقه‌های کنترلی متفاوت با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

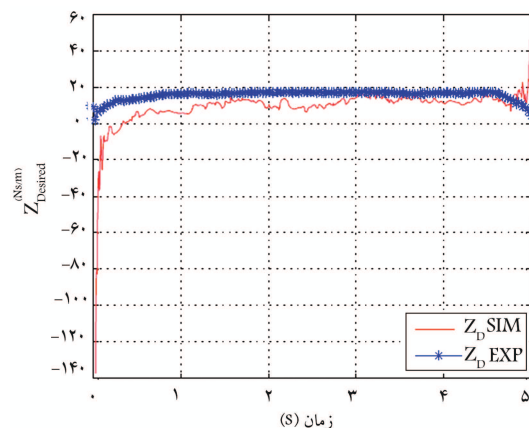
مقایسه‌ی نتایج حاصله نشان می‌دهد که در روش کنترل ادمیتانس، کاهش مقدار امیدانس محیط مجازی باعث کاهش تأثیر امیدانس واسط هپتیک می‌شود و خطای امیدانس (Z_{error}) به صفر نزدیک می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این روش کنترلی برای شبیه‌سازی محیط‌های مجازی با اجسام نرم (مانند شبیه‌سازی جراحی بافت نرم) عملکرد بهتری دارد؛ حال آن که در روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو، افزایش امیدانس محیط از تأثیر امیدانس واسط هپتیک می‌کاهد. این موضوع باعث نزدیک شدن امیدانس حلقه‌بسته‌ی سیستم به امیدانس محیط می‌شود و نیز از خطای امیدانس می‌کاهد. بنابراین برای شبیه‌سازی محیط‌های مجازی با اجسام سخت (مانند شبیه‌سازی جراحی استخوان یا دندان) روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو مناسب‌تر است. با افزایش جرم واسط هپتیک در این روش کنترلی، میزان امیدانس واسط هپتیک نیز افزایش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش خطای امیدانس و ایجاد جواب‌های نامطلوب در سیستم می‌شود. حال آن که برای روش کنترل ادمیتانس میزان خطای امیدانس با افزایش وزن واسط هپتیک تغییر چندانی نمی‌کند و عملکرد این سیستم برای واسط هپتیک با وزن بالا نیز مطلوب است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که در هر دو روش امیدانس و ادمیتانس با افزایش بهره‌های کنترلی، می‌توان عملکرد سیستم را بهبود بخشید زیرا با افزایش بهره‌ی کنترلی می‌توان تأثیر دینامیک واسط هپتیک را در معادلات امیدانس حلقه‌بسته‌ی این سیستم‌ها کاهش داد و متناسب با آن خطای امیدانس را نیز کاهش داد.



شکل ۲۶. نیروی اعمالی از سوی کاربر در سه جهت X, Y, Z ، برای روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو به‌ازای محیط مجازی با ضریب سفتی 50 N/m و ضریب دمپینگ 5 N/s .



شکل ۲۷. نیروی اعمالی از سوی کاربر در سه جهت X, Y, Z ، برای روش کنترل ادمیتانس با بازخورد موقعیت به‌ازای محیط مجازی با ضریب سفتی 100 N/m و ضریب دمپینگ 1 N/s .



شکل ۲۸. مقایسه‌ی خطای امیدانس نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمون واسط هپتیک برای روش کنترل امیدانس با بازخورد نیرو.

پانوشته‌ها

1. Haptic
2. virtual Reality
3. Haptic interface
4. Denavit-Hartenberg
5. Jacobian
6. inverse dynamics
7. iterative Newton-Euler dynamics algorithm
8. Impedance error

منابع (References)

1. Brown, R.H., Schneider, S.C. and Mulligan, M.G. "Analysis of algorithms for velocity estimation from discrete position versus time data", *IEEE Transactions in Industrial Electronics*, **39**(1), pp.11-19 (February 1992).
2. Sutherland, I. "The ultimate display", *Proc. of IFIP*, pp. 506-508 (1965).
3. Chandrabalan, C.J. "Design and construction of 1 DOF haptic interface", MSc thesis, Florida State University College of Engineering (2004).
4. Grange, S., Conti, F., Rouiller, P., Helmer, P. and Baur, C. "Overview of the delta haptic device", Institute of Robotics Systems, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne 1015 Lausanne, Switzerland (2001).
5. Carignan, C.R. and Tang, J. "A haptic control interface for a motorized exercise machine", *IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA* pp.2055-2060 (19-23 May 2008).
6. Siena Robotics and Systems Lab - University of Siena, Control of Kinesthetic Haptic Interfaces, <http://www.dii.unisi.it/~sirslab/teaching/Robotical2/download/UEberleBu04>. Control Kinesthetic Haptic Interfaces.pdf, 23 March 2005, last access (July 2007).
7. Salisbury, K., Conti, F. and Barbagli, F. "Haptic rendering: Introductory concepts", *IEEE Computer Graphics and Applications*, **24**(2), pp. 24-32 (2004).
8. Kikuuwe, R., Takesue, N. and Fujimoto, H. "A control framework to generate nonenergy-storing virtual fixtures: Use of simulated plasticity", *IEEE Transactions on Robotics*, **24**(4), pp.781-793 (August 2008).
9. Carignan, C.R. and Cleary, K.R. "Closed-loop force control for haptic simulation of virtual environments", *Haptics-s*, pp.1-14 **1**(2), (23 February 2000).
10. Wen, K., Neculescu, D. and Sasiadek, J. "Haptic force control based on impedance/admittance control aided by visual feedback", *Springer Science, Multimed Tools Appl*, **37**, pp. 39-52 (2008).
11. Craig, J.J., *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, 2nd edition. Belmont, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 153-212 (1955).
12. Ahmad, A., Khan, S. and Kjell, A. "Kinematics and dynamics of a novel 6-DoF TAU haptic device", *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, Istanbul, Turkey (13-15 April 2011).
13. Senkal, D. and Gurocak, H. "Haptic joystick with hybrid actuator using air muscles and spherical MR-brake", *Mechatronics*, **21**, pp. 951-960 (2011).
14. Khan, S. Kjell A. and Jan, W. "Dynamic based control strategy for haptic devices", *IEEE World Haptics Conference Istanbul*, Turkey (21-24 June 2011).