تدوین سامانهٔ حرکت‌ساز شبیه‌ساز پرواز با استفاده از روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

ابولفتح نیک‌رنجبر
استادیار، دانشکدهٔ مکاترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، کرج، a.nikranjbar@kiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۲۲

چکیده
امروزه شبیه‌سازهای پرواز، به‌عنوان جزئی جدایی‌ناپذیر در صنعت هوانوردی، نقش مهمی در آموزش خلبانی و توسعهٔ تجهیزات جدید دارند. سامانهٔ حرکت‌ساز بهینه با وجود ویژگی‌های مثبت از جمله حجم محاسباتی کم با قابلیت پیاده‌سازی مناسب، به‌دلیل محدودیت در حفظ حرکت سامانه در محدودهٔ فضای کاری در مانورهای پیچیده، با مشکلاتی جدی روبروست. سامانه‌های حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین به‌علت قابلیت ذاتی در مقیدنمودن ورودی‌ها و متغیرهای حالت فرایند، ضمن حفظ همزمان کیفیت مطلوب خروجی، توسعهٔ فزاینده‌ای یافته‌اند. وظیفهٔ کنترل پیش‌بین در سامانه‌های حرکت‌ساز، حل مسئلهٔ بهینه‌سازی در پنجرهٔ افق پیش‌بین برای تعیین حرکت امکان‌پذیر شبیه‌ساز با هدف کاهش تفاوت حس حرکتی خلبان در وسیلهٔ واقعی و شبیه‌ساز در محدودهٔ کاری سامانهٔ حرکتی است. این روش براساس کمینه‌سازی تابع هدف درجه دوم شامل متغیرهای حس حرکتی، متغیرهای متناظر سامانهٔ حرکتی و ورودی کنترلی استوار است، اگرچه در این رهیافت نیازی به طراحی و استفاده از فیلترهای شستشو نیست. در این مقاله، نحوهٔ برپایی روشمند سامانهٔ حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و مقایسهٔ عملکرد آن با روش حرکت‌ساز بهینه ارائه شده است. رویکرد حرکت‌ساز پیشنهادی در مانور شیب - طولی ضمن ایجاد حس حرکتی یکسان، با حرکت‌های محدودتر و هموارتر سبب حفظ کارآمدتر سامانهٔ حرکتی در محدودهٔ عملیاتی آن می‌شود و قابلیت شبیه‌ساز برای مانورهای پیچیده‌تر را افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی
سامانهٔ حرکت‌ساز، شبیه‌ساز پرواز، کنترل مدل پیش‌بین، کنترل بهینه، فیلتر شستشو

۱. مقدمه
امروزه شبیه‌سازهای پرواز[1] نقش مهمی در صنعت هوانوردی و آموزش خلبانی و توسعهٔ تجهیزات جدید و پیشرفته ایفا می‌کند. هدف از به‌کارگیری این وسیله ایجاد شرایطی است که تا سرحد ممکن شرایط مشابه پرواز برای خلبان فراهم آید. ایجاد حس

مشابه پرواز، خلبان شبیه‌ساز را در شرایط همانند پرواز واقعی قرار می‌دهد تا عکس‌العمل لازم را با توجه به علائم دریافتی از خود نشان دهد. وظیفهٔ سامانهٔ حرکت‌ساز[۲] به‌عنوان یکی از مسائل چالشی در طراحی سامانهٔ شبیه‌ساز پرواز، دریافت شتاب‌های خطی و سرعت‌های زاویه‌ای هواپیما به‌عنوان ورودی و تولید خروجی‌های مناسب عملگرهاست. در شبیه‌سازی پرواز واقعی باید حرکت‌های نامحدود هواپیما به حرکت‌های محدود شبیه‌ساز پرواز در فضای کاری آن تبدل و حس حرکتی یکسانی در مقایسه با حس خلبان داخل هواپیما ایجاد شود. با توجه به اهمیت سامانه‌های حرکت‌ساز در شبیه‌سازها، این سامانه‌ها همگام با توسعهٔ فناوری به‌خصوص علوم رایانه، برای شبیه‌سازهای شش درجه آزادی یا بیشتر پیشرفت شایانی کرده‌اند [۱].

سامانهٔ حرکت‌ساز بهینه[۳] با طراحی فیلترهای بهینه[۴]، سعی در کمینه‌کردن خطای حس حرکتی بین خلبان شبیه‌ساز و وسیلهٔ واقعی با حفظ محدودیت‌های فیزیکی عملگرهای آن دارد. این سامانه نخستین‌بار توسط سیوان و همکاران (۱۹۸۲) ارائه شد [۲]. در ادامه، مطالعات قابل توجهی جهت توسعهٔ این روش انجام شده است [۳–۷]. روش طراحی حرکت‌ساز بهینه با وجود ویژگی‌های مثبت از جمله حجم محاسباتی کم با قابلیت پیاده‌سازی مناسب، به‌علت عدم امکان حفظ حرکت سامانهٔ حرکتی در محدودهٔ فضای کاری در مانورهای مختلف، با مشکلات جدی روبروست [۱، ۸]. بنابراین سامانهٔ حرکت‌ساز به‌دلیل فیلترشدن ورودی‌ها به‌منظور حفظ شبیه‌ساز در فضای کاری، قادر به بهره‌برداری کامل از فضای کاری در مانورهای نه‌چندان سخت نخواهد بود. جهت رفع مشکل تبعات فیلترشدن ورودی‌ها، رویکردهای متنوعی چون انتخاب متفاوت ورودی‌ها [۳، ۵، ۹، ۱۰]، تغییر دستگاه مختصات و انتقال به فضای عملگرها [۱۱] استفاده از فیلترهای متغیر یا تطبیقی تحت عنوان سامانهٔ بهینهٔ غیرخطی با حل در خط[۵] معادلهٔ ریکاتی[۶] در هر بازهٔ زمانی [۴، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۳] بدون بهبود قابل توجهی در روش، ارائه شدند. کلیهٔ این روش‌ها فارغ از نوع سامانهٔ حرکتی و عدم توجه به استفاده کامل از قابلیت‌های سامانهٔ حرکتی هستند که خود منشأ تحقیقات متعددی در ارائهٔ رویکردهای کارآمدتر از جمله استفاده از سامانه‌های فازی[۷] با هدف استفاده مناسب‌تر از محدودهٔ فضای کاری[۸] سامانهٔ حرکتی گردیدند [۱، ۱۴].

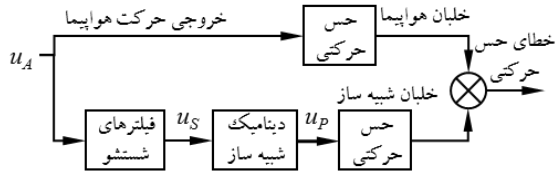
به‌تازگی سامانه‌های حرکت‌ساز براساس روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل[۹] به‌علت قابلیت ذاتی آن در مواجه با قیود بر روی ورودی‌ها و متغیرهای حالت فرایند با حفظ همزمان کیفیت مطلوب خروجی، به‌طور فزاینده‌ای گسترش یافته‌اند [۸ ، ۱۵–۱۹]. وظیفهٔ کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در سامانه‌های حرکت‌ساز را می‌توان حل مسئلهٔ بهینه‌سازی برای تعیین حرکت امکان‌پذیر شبیه‌ساز با هدف کاهش تفاوت حس حرکتی خلبان در وسیلهٔ واقعی و شبیه‌ساز در پنجرهٔ افق پیش‌بین[۱۰] در محدودهٔ کاری سامانهٔ حرکت‌ساز تعریف نمود [۸]. در این روش مشابه روش کنترل بهینه، مبتنی بر حل مسئلهٔ بهینه‌سازی با کمینه‌سازی تابع هدف درجه دوم[۱۱] شامل حس حرکتی و ورودی سامانهٔ استوار است. در این رویکرد برخلاف روش بهینه‌سازی، جهت مطابقت خروجی سامانهٔ حرکت‌ساز با وسیلهٔ واقعی ضمن حفظ حرکت سامانه در محدودهٔ فضای حرکتی، نیازی به طراحی و استفاده از فیلترهای شستشو نیست. اگرچه کاربرد این روش به استفادهٔ بهتر از فضای کاری سامانهٔ حرکتی با حفظ اطمینان از عدم خروج سامانه از محدوهٔ حرکتی منجر می‌شود، اما کاربرد روش با هزینه و زمان محاسباتی بالا همراه است که به‌خصوص در کاربردهای زمان واقعی[۱۲] توجه به این ویژگی‌ها ضروری است [۸].

در این مقاله با رویکرد مقایسهٔ روش حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین با روش طراحی حرکت‌ساز بهینه براساس فیلترهای شستشو[۱۳]، طراحی سامانهٔ حرکت‌ساز با استفاده از هر دو رویکرد به‌صورت روشمند ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های مقایسه‌ای، عملکرد مناسب‌تر سامانهٔ حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین با ویژگی حرکت‌های محدودتر و هموارتر سامانهٔ حرکتی را نشان می‌دهد. این دستاورد بیانگر امکان توسعهٔ سامانهٔ شبیه‌ساز برای مانورهای پیچیده‌تر ضمن حفظ حرکت سامانهٔ حرکتی در محدودهٔ فضای کاری است. بخش ۲ به ارائهٔ روش طراحی فیلترهای شستشوی بهینه تخصیص یافته است. در بخش ۳ مبانی کنترل پیش‌بین و در بخش ۴ روش کنترل مدل پیش‌بین با رویکرد طراحی سامانه حرکت‌ساز مورد بررسی قرار گرفته و در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی و عملکرد سامانهٔ پیشنهادی و مقایسه با فیلتر شستشوی بهینه ارائه شده است.

۲. فیلترهای شستشوی بهینه

سامانهٔ حرکت‌ساز بهینه به‌معنای طراحی فیلترهای شستشو با هدف فیلتر کردن ورودی‌های واقعی به شبیه‌ساز براساس نظریهٔ کنترل بهینه است. در این رویکرد هدف حفظ حرکت شبیه‌ساز در

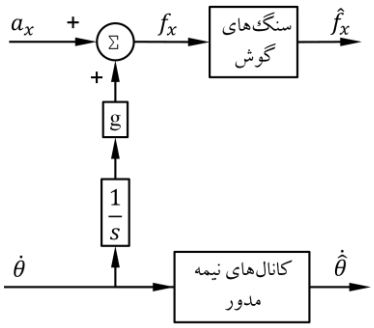
فضای کاری همراه با ایجاد حس حرکت تا حد امکان مشابه حرکت واقعی است [۷]. در شکل ۱ تصویر مفهومی از سامانهٔ حرکت‌ساز بهینه شامل مقایسهٔ حس حرکت انسانی در وسیلهٔ واقعی و شبیه‌ساز ارائه شده است.



شکل ۱. سامانهٔ حرکت‌ساز بهینه

در این در شکل u_A نشان‌دهندهٔ ورودی واقعی به مدل حس خلبان وسیلهٔ واقعی و درمسیر پایین، u_s ورودی سامانهٔ حرکت‌ساز پس از عبور u_A از فیلترهای شستشو و u_P ورودی مدل حس حرکتی خلبان شبیه‌ساز است. با فرض رفتار دینامیکی ایده‌آل برای شبیه‌ساز پرواز، خطای حس حرکتی بین وسیلهٔ واقعی و شبیه‌ساز جهت طراحی فیلترهای شستشو با استفاده از روش کنترل بهینه در طراحی کنترل‌کنندهٔ خودتنظیم[۱۴] مورد استفاده قرار می‌گیرد.

گفتنی است در شبیه‌سازهای پرواز به‌علت حرکت‌های محدود سامانهٔ حرکتی در مقایسه با وسیلهٔ نقلیهٔ واقعی و از طرفی ضعف حسگرهای گوش داخلی در تشخیص نیروی جاذبه از نیروی (شتاب) انتقالی، از حرکت‌های زاویه‌ای در تأمین حس حرکت انتقالی خلبان شبیه‌ساز استفاده می‌شود. حرکت هماهنگ زاویه‌ای[۱۵] سکوی متحرک در تأمین حس حرکت طولی فرکانس پایین در شبیه‌ساز با هدف حذف حرکت‌های حالت دائم جهت حفظ سامانهٔ حرکتی در فضای کاری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حاصل این رویکرد سامانهٔ حرکت‌ساز نامیده می‌شود. در این مقاله به‌منظور مقایسهٔ دو روش، حس حرکتی طولی/زاویهٔ شیب پیچ/سرج[۱۶] مطالعه شده است. مدل تک‌کاناله مفروض، از مجموعه مدل‌های حس حرکتی پیچ/سرج، سووی/رول[۱۷] و هیو/یا[۱۸]، با فرض جابه‌جایی‌های کوچک است. رویکرد مذکور منجر به حذف اندرکنش[۱۹] کانال‌ها و دستیابی به مدل‌های مستقل از هم می‌شود. بنابراین تعمیم روش به شش درجه آزادی، با برپایی مدل افزودهٔ حرکت‌ساز از ترکیب سه مدل مجزا[۲۰] فراهم می‌شود که این مهم با توجه به تشابه مدل حس حرکتی دو جهت دیگر با جهت طولی/سرعت زاویه‌ای شیب، کار دشواری نیست [۱۱]. در شکل ۲ نقش حرکت هماهنگ زاویه‌ای شیب در کمک به ایجاد حس حرکتی طولی ترسیم شده است که در آن $\hat{f}_x$ و $\hat{\dot{\theta}}$ به‌ترتیب نیروی مخصوص[۲۱] و سرعت زاویه‌ای حس‌شده توسط خلبان و a_x و $\dot{\theta}$ ورودی‌های واقعی وسیله یعنی شتاب طولی و سرعت زاویه‌ای شیب هستند.



شکل ۲. مدل حس حرکتی انسان
تحت حرکت انتقالی طولی و حرکت زاویه‌ای شیب

مطابق شکل ۲، مدل دینامیک حسگرهای نیروی مخصوص $\hat{f}_x$ با تحریک نیروی مخصوص f_x توسط سنگ‌های گوش[۲۲]، مطابق رابطهٔ ۱ بیان می‌شود [۱] که در آن τ_a، τ_L، τ_s و k مقادیر عددی معلوم مدل می‌باشند. نیروی مخصوص در مرکز سکوی متحرک با توجه به مشارکت حرکت زاویه‌ای شیب مطابق شکل ۲ به‌صورت رابطهٔ ۲ است [۷]:

$$\hat{f}_x = \frac{k(\tau_a s+1)}{(\tau_L s+1)(\tau_s s+1)} f_x \qquad (۱)$$

$$f_x(s) = a_x(s) + g\frac{1}{s}\dot{\theta}(s) \qquad (۲)$$

با جایگذاری در رابطهٔ ۱ و مرتب‌نمودن آن می‌توان نوشت:

$$\hat{f}_x = k\tau_a\left[\frac{gs+g/\tau_a}{s(\tau_L s+1)(\tau_s s+1)}\times \times\frac{s+1/\tau_a}{s(\tau_L s+1)(\tau_s s+1)}\right]u \qquad (۳)$$

که در آن $u=[\dot{\theta}(s)\quad a_x(s)]^T$ بردار ورودی شبیه‌ساز است. مطابق نظریهٔ کنترل بهینه، بازنویسی رابطهٔ ۳ به‌صورت مدل فضای حالت لازم است:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{\tau_s+\tau_L}{\tau_s\tau_L} & 1 & 0\\ -\frac{1}{\tau_s\tau_L} & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{bmatrix}+$$

$$+\begin{bmatrix} 0 & \frac{k\tau_a}{\tau_s\tau_L} \\ \frac{gk\tau_a}{\tau_s\tau_L} & \frac{k}{\tau_s\tau_L} \\ \frac{gk}{\tau_s\tau_L} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

که به‌صورت رابطهٔ ۵ بوده و x_{ot} بردار حالت حسگر نیروی مخصوص است. ضرائب رابطهٔ ۵ به‌صورت ذیل تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} \dot{x}_{ot} = A_{ot}x_{ot} + B_{ot}u \\ \hat{f}_x = C_{ot}x_{ot} + D_{ot}u \end{cases} \qquad (۵)$$

$$A_{ot} = \begin{bmatrix} -\frac{\tau_s+\tau_L}{\tau_s\tau_L} & 1 & 0 \\ -\frac{1}{\tau_s\tau_L} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{ot} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{k\tau_a}{\tau_s\tau_L} \\ \frac{gk\tau_a}{\tau_s\tau_L} & \frac{k}{\tau_s\tau_L} \\ \frac{gk}{\tau_s\tau_L} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{ot} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad D_{ot} = [0]$$

مدل دینامیکی کانال‌های نیمه‌مدور[۲۳] در حس حرکت زاویه‌ای $\dot{\hat{\theta}}$ با ورودی سرعت زاویه‌ای وسیله حرکتی $\dot{\theta}$، به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$\frac{\dot{\hat{\theta}}}{\dot{\theta}} = \frac{T_L T_a s^2}{(T_L s+1)(T_s s+1)(T_a s+1)} \qquad (۶)$$

مدل فضای حالت رابطهٔ ۶ به‌صورت فشردهٔ ۷ بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_{sc} = A_{sc}x_{sc} + B_{sc}u \\ \dot{\hat{\theta}} = C_{sc}x_{sc} + D_{sc}u \end{cases} \qquad (۷)$$

که در آن x_{sc} بردار حالت کانال‌های نیمه‌مدور و ضرائب عبارت‌اند از:

$$A_{sc} = \begin{bmatrix} -T_2 & 1 & 0 \\ -T_1 & 0 & 1 \\ -T_0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad B_{sc} = \begin{bmatrix} T_3 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{sc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad D_{sc} = [0]$$

همچنین درایه‌های T_0، T_1، T_2 و T_3 طبق تعریف عبارت‌اند از:

$$T_0 = \frac{1}{T_L T_s T_a} \qquad T_1 = \frac{T_L + T_s + T_a}{T_L T_s T_a}$$

$$T_2 = \frac{T_L T_s + T_L T_a + T_s T_a}{T_L T_s T_a} \qquad T_3 = \frac{T_L T_a}{T_L T_s T_a}$$

نمایش روابط ۵ و ۷ در قالب یکپارچه، که به نام مدل حس حرکتی انسان[۲۴] نامیده می‌شود، به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{x}_v = A_v x_v + B_v u \\ \hat{y}_v = C_v x_v + D_v u \end{cases} \qquad (۸)$$

که در آن x_v بردار ترکیبی حس حرکتی، $\hat{y}_v$ حرکت حس شده و A_v، B_v، C_v و D_v ضرائب مدل‌های حس حرکتی مدل افزوده به‌صورت زیر می‌باشند:

$$A_v = \begin{bmatrix} A_{sc} & 0 \\ 0 & A_{ot} \end{bmatrix} \qquad B_v = \begin{bmatrix} B_{sc} \\ B_{ot} \end{bmatrix}$$

$$C_v = \begin{bmatrix} C_{sc} & 0 \\ 0 & C_{ot} \end{bmatrix} \qquad D_v = \begin{bmatrix} D_{sc} \\ D_{ot} \end{bmatrix}$$

در برپایی فیلترهای شستشو، مدل حس حرکتی خلبان دو وسیله یکسان فرض شده و خطای حس حرکتی به‌صورت $x_e(=x_s - x_A)$ تعریف می‌شود که در آن x_s و x_A به‌ترتیب متغیرهای حالت حس حرکتی خلبان هواپیما و شبیه‌ساز می‌باشند. بدین ترتیب دینامیک خطای حس حرکتی مطابق رابطهٔ ۹ بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = A_e x_e + B_v u_s - B_v u_A \\ e = C_v x_e + D_v u_s - D_v u_A \end{cases} \qquad (۹)$$

که در آن u_A و u_s به‌ترتیب معرف ورودی‌های وسیله واقعی و شبیه‌ساز و e بردار خطای حس حرکتی است. ورودی وسیلهٔ واقعی u_A معمولاً شامل نویز فیلترشده به‌منظور دربرگیری کلیهٔ ورودی‌های تصادفی است که به‌صورت رابطهٔ ۱۰ بیان می‌شود.

$$\begin{cases} \dot{x}_n = A_n x_n + B_n w \\ u_A = x_n \end{cases} \qquad (۱۰)$$

که در آن x_n بردار حالت فیلتر نویز، w ورودی نویز سفید و ضرائب رابطه به‌صورت زیر می‌باشند:

$$A_n = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 0 \\ 0 & -\beta_2 \end{bmatrix} \qquad B_n = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$$

$$C_n = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad D_{sc} = [0]$$

که در آنها β_1 و β_2 فرکانس‌های قطع مرتبهٔ اول هر یک از درجات آزادی‌اند. تعریف متغیرهای حالت اضافی به‌منظور دسترسی به موقعیت، سرعت و حرکت زاویه‌ای عرضی سکوی متحرک سامانهٔ حرکتی به‌صورت معادلهٔ حالت ضروری است. مدل فضای حالت توصیف دینامیک سامانه با استفاده از متغیرهای فضای عملیاتی شبیه‌ساز مطابق رابطهٔ ۱۱ تعریف می‌شود.

$$\begin{cases}\dot{x}_c = A_c x_c + B_c u_s \\ y_c = C_c x_c + D_c u_s\end{cases} \quad (۱۱)$$

که در آن $x_c(=[\iint a_x dt^2 \quad \int a_x dt \quad \theta]^T)$ بردار حالت توصیف حرکت سامانه بوده و ضرائب ماتریسی معادله به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$A_c = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \qquad B_c = \begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 1\\ 1 & 0\end{bmatrix}$$

$$C_c = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad D_c = \begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$$

مدل دینامیکی کامل حرکت‌ساز از ترکیب روابط ۹، ۱۰ و ۱۱ به‌صورت رابطهٔ ۱۲ حاصل می‌شود.

$$\begin{cases}\dot{x}_s = Ax_s + Bu_s + Hw \\ y = Cx_s + Du_s\end{cases} \quad (۱۲)$$

برای مسئلهٔ حاضر $y(=[e^T \quad y_c^T]^T) \in R^5$ بردار خروجی و $x_s(=[x_e^T \quad x_c^T \quad x_n^T]^T) \in R^{11}$ بردار حالت افزودهٔ سامانهٔ حرکت‌ساز با ماتریس‌های ضرائب ذیل با ابعاد مشخص شده است.

$$A = \begin{bmatrix}(A_v)_{6\times6} & (0)_{6\times3} & (-B_v)_{6\times2}\\ (0)_{3\times6} & (A_c)_{3\times3} & (0)_{3\times2}\\ (0)_{2\times6} & (0)_{2\times3} & (A_n)_{2\times2}\end{bmatrix}_{11\times11}$$

$$B = \begin{bmatrix}(B_v)_{6\times2}\\ (B_c)_{3\times2}\\ (0)_{2\times2}\end{bmatrix}_{11\times2} \qquad H = \begin{bmatrix}(0)_{6\times1}\\ (0)_{3\times1}\\ (B_n)_{2\times1}\end{bmatrix}_{11\times1}$$

$$C = \begin{bmatrix}(C_v)_{2\times6} & (0)_{2\times3} & (-D_v)_{2\times2}\\ (0)_{3\times6} & (C_v)_{3\times3} & (0)_{3\times2}\end{bmatrix}_{5\times11}$$

$$D = \begin{bmatrix}(D_v)_{2\times2}\\ (0)_{3\times2}\end{bmatrix}_{5\times2}$$

در رویکرد کنترل بهینه، برای طراحی فیلترهای شستشو، تابع هزینه درجه دو به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۷].

$$J = E\left[\int_0^{t_1}\left(e^T Qe + x_c^T R_c x_c + u_s^T R u_s\right)dt\right] \quad (۱۳)$$

که در آن $E[\,]$ امید ریاضی[۲۵] متغیر تصادفی، Q و R_c ماتریس‌های مثبت نیمه معین و R ماتریس مثبت معین است. مطابق مدل ریاضی ارائه‌شده، تابع هزینهٔ ۱۳ شامل بردار خطای حس حرکتی e، بردار حالت متناظر سامانه حرکتی x_c همراه با بردار ورودی u_s است. بردار ورودی u_s در این بررسی شامل ورودی‌های شتاب طولی و سرعت زاویه‌ای شیب می‌باشد. کاربرد رابطهٔ ۱۳ که از مرجع [۷] اقتباس شده است به‌علت استفاده از متغیرهای وزن متعدد و حساسیت تابع داخلی نرم‌افزار متلب محاسب بهرهٔ کنترل بهینه، با دشواری‌هایی همراه است. به‌منظور ساده‌سازی محاسبات و مطابقت بهتر رابطه فوق با توابع داخلی نرم‌افزار متلب[۲۶]، تابع انتگرالده[۲۷] رابطهٔ مذکور با جایگذاری بردار خطا از ۹ و مقداری عملیات ماتریسی، به شکل مناسب‌تر برحسب متغیر حالت افزوده x_s و بردار ورودی u_s، به‌صورت ۱۴ بازنویسی می‌شود که در آن Q_s، R_s و N_s ماتریس‌های وزن متناظر هستند که در مطابقت با ۱۳، به‌صورت ۱۴ تعریف می‌شوند.

$$J = \int_0^\infty (x_s^T Q_s x_s + u_s^T R_s u_s + 2x_s^T N_s u_s)dt \quad (۱۴)$$

$$Q_s = \begin{bmatrix}C_v^T Q C_v & 0 & -2C_v^T Q C_v\\ 0 & R_c & 0\\ 0 & 0 & D_v^T Q D_v\end{bmatrix}_{11\times11}$$

$$R_s = \left[D_v^T Q D_v + R\right]_{2\times2}$$

$$N_s = \begin{bmatrix}C_v^T Q D_v\\ 0\\ -D_v^T Q D_v\end{bmatrix}_{11\times2}$$

حل مسئله کنترل بهینهٔ استاندارد مطابق تابع هزینهٔ مرتبه دو ۱۴ مقید به قیود[۲۸] ۱۲ به‌صورت تابعی از حل معادلهٔ جبری ریکاتی[۲۹] است [۲۰]:

$$\begin{aligned}&A^T P + PA\\ &-(PB + N_s)R_s^{-1}(B^T P + N_s^T) + Q_s = 0\end{aligned} \quad (۱۵)$$

که در آن $P > 0$ ماتریس متقارن مثبت معین حاصل از حل معادلهٔ ریکاتی است که متعاقباً به‌منظور محاسبهٔ ماتریس بهرهٔ کنترل خود تنظیم بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰]:

$$K = [R_s^{-1}(B^T P + N_s^T)]_{2\times11} \quad (۱۶)$$

با محاسبهٔ ماتریس بهرهٔ کنترل بهینه، ورودی بهینهٔ u_s مطابق ذیل قابل محاسبه خواهد بود [۱]:

$$u_s = -Kx_s \quad (۱۷)$$

با توجه به برقراری رابطهٔ $x_n = u_A$، با حذف بردار حالت متناظر x_n از رابطهٔ ۱۲، مدل کاهش‌یافتهٔ دینامیک سامانه حرکت‌ساز بهینه حاصل می‌شود [۱]:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_e\\ \dot{x}_c\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}A_v & 0 & -B_v\\ 0 & A_c & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_e\\ x_c\\ u_A\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}B_v\\ B_c\end{bmatrix}u_s \quad (۱۸)$$

با جایگذاری از ۱۷ در ۱۸ می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\dot{x}_e\\ \dot{x}_c\end{bmatrix} &= \begin{bmatrix}A_v - B_v K_1 & -B_v K_2\\ -B_c K_1 & A_c - B_c K_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_e\\ x_c\end{bmatrix}\\ &+ \begin{bmatrix}-B_v(I + K_3)\\ -B_c K_3\end{bmatrix}u_A\end{aligned} \quad (۱۹)$$

با اعمال تبدیل لاپلاس در رابطهٔ ۱۹ و جایگذاری از تبدیل یافته لاپلاس رابطهٔ ۱۷، مدل تابع تبدیل ورودی خروجی فیلترهای شستشو به‌صورت رابطهٔ ۲۰ حاصل می‌شود [۱]:

$$u_s(s) = W(s)u_A(s) \qquad (۲۰)$$

$$W(s) = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} sI - A_v + B_v K_1 & B_v K_2 \\ B_c K_3 & sI - A_c + B_c K_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_v(I + K_3) \\ B_c K_3 \end{bmatrix} - K_3 \qquad (۲۱)$$

ماتریس $W(s)$ ماتریس تابع تبدیل ۲×۲ تصویرساز بهینهٔ شتاب خطی طولی و سرعت زاویه‌ای شیب u_A به u_s است [۱].

۳. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل روش کنترل پیشرفته‌ای است که از زمان ارائه در۱۹۸۰ م، به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸]. در سال‌های اخیر، روش‌های مقاوم[۳۰] این رویکرد، توسعه یافته و ابزارهای نرم‌افزاری متنوعی برای طراحی و تسهیل پیاده‌سازی آن ارائه شده‌اند. مزایای اصلی روش کنترل پیش‌بین را به‌طور خلاصه می‌توان به شرح زیر فهرست نمود:

۱. ایدهٔ اساسی آن ساده و به‌صورت شهودی قابل درک و پیاده‌سازی است
۲. روش کنترل عمومی مؤثر در مواجه با قیود است
۳. این روش قابلیت استفاده در کاربردهای چند ورودی چند خروجی بدون افزایش پیچیدگی‌های مرسوم را دارد
۴. این روش قابلیت کاربرد در سیستم‌های خطی / غیرخطی با / بدون قیود خطی / غیرخطی را دارد

۳-۱. مبانی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

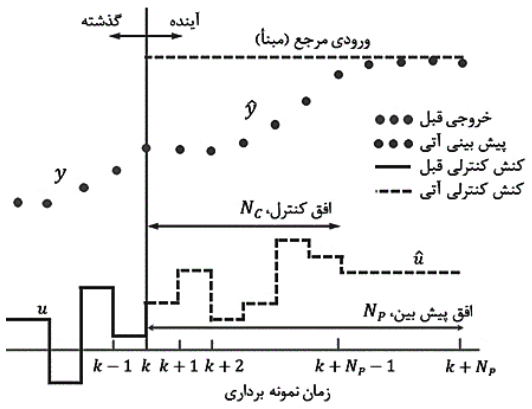
برای فرایند زمان گسسته در لحظهٔ k، ورودی مرجع $r(t|k), t \geq k$ معلوم و خروجی آنی $y(k)$، قابل اندازه‌گیری فرض می‌شوند. باید توجه شود که در لحظهٔ جاری، ورودی کنترلی نامعلوم بوده و وظیفه کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل محاسبه آن با روش تشریح شده ذیل است. همچنین فرض می‌شود که مدل فرایند تحت کنترل، معلوم و متغیرهای حالت یا مقادیر تخمینی آنها در دسترس است. بنابراین مطابق شکل مفهومی ۳، امکان پیش‌بینی آتی خروجی $y(k+i|k), i=1,\ldots,N_p$ مطابق رشته $u(k+i|k), i=0,\ldots,N_p-1$ در بازهٔ زمانی (افق پیش‌بین) به طول N_p فراهم است. ایدهٔ روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در محاسبهٔ رشتهٔ $\hat{u}(k+i|k)$ براساس کمینه‌سازی تابع هزینه تعریف‌شده برحسب خطای ردیابی $\varepsilon(k+i|k)$ با رعایت تمامی قیود استوار است:

$$\varepsilon(k+i|k) = r(k+i|k) - y(k+i|k) \qquad (۲۲)$$

براساس این روش، ورودی کنترلی به سیستم در زمان k مطابق زیر در نظر گرفته شده است:

$$u(k) = \hat{u}(k|k) \qquad (۲۳)$$

در زمان $k+1$ خروجی جدید $y(k+1)$ محاسبه و ورودی کنترلی با اعمال اولین عنصر از رشتهٔ کنترلی محاسبه شده به فرایند تکرار می‌گردد [۱۷–۱۸].



شکل ۳. مبانی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

۳-۲. مدل فرایند

مدل فرایند به‌صورت مدل چند ورودی - چند خروجی[۳۱] خطی زمان گسسته اکیداً سره[۳۲] (عدم تأثیرپذیری مستقیم خروجی از ورودی)، مطابق رابطهٔ ۲۴ در نظر گرفته می‌شود [۱۸].

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \qquad (۲۴)$$
$$y(k) = C_m x_m(k)$$

در رویکرد مورد نظر، متغیر طراحی، اختلاف ورودی کنترلی $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ است. متغیر تفاضلی حالت $\Delta x_m(k)$ نیز با استفاده از مدل فرایند، به‌صورت ۲۵ حاصل می‌شود:

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \qquad (۲۵)$$

به‌طور مشابه می‌توان اختلاف خروجی فرایند در دو زمان متوالی را مطابق ذیل بیان نمود:

$$y(k+1)-y(k)=C_mA_mx_m(k)+C_mB_m\Delta u(k) \qquad (۲۶)$$

با تعریف بردار حالت جدید افزوده $x(k)$ بصورت $x(k)(=[\Delta x_m^T(k) \quad y^T(k)]^T)$، مدل افزوده فرایند به‌شکل ۲۷ بازنویسی می‌شود:

$$x(k+1)=\begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_mB_m & I \end{bmatrix}x_m(k)+\begin{bmatrix} B_m \\ C_mB_m \end{bmatrix}\Delta u(k) \qquad (۲۷)$$
$$y(k)=\begin{bmatrix}0_m & I\end{bmatrix}x(k)$$

که در آن $\Delta u(k)$ ورودی کنترلی است.

۳-۳. تابع هزینه و ورودی کنترلی

رشتهٔ ورودی بهینه $\hat{u}(k+i\,|\,k), i=0,\ldots,N_p-1$ از کمینه‌سازی تابع هزینه حاصل می‌شود [۱۸]:

$$J(\Delta U)=(R_s-Y)^TQ(R_s-Y) \\ +U^TSU+\Delta U^TR\Delta U \qquad (۲۸)$$

که در آن خطای ردیابی، ورودی و تغییرات ورودی به‌ترتیب با ماتریس‌های Q، R و S وزن‌دهی شده‌اند. R_s، Y، U و ΔU ماتریس‌هایی با ابعاد متناسب حاصل از بردارسازی[۳۳] ورودی مرجع $r_s(k+i)$، خرجی تخمینی $y(k+i)$، ورودی $u(k+i)$ و اختلاف ورودی $\Delta u(k+i)$ در بازهٔ افق پیش‌بین با تعداد نمونهٔ برداری N_p حاصل می‌شوند. ورودی کنترلی گام به گام در پنجرهٔ بهینه‌سازی براساس ماتریس‌های مرتبط با مدل فرایند Φ و F تعریف می‌شود:

$$\Delta U=(\Phi^T\Phi+\bar{R}^T)^{-1}\Phi^T\left[R_s-Fx(k)\right] \qquad (۲۹)$$

که R_s بردار ورودی با ابعاد مناسب بوده و فقط تعداد درایه‌های اول ΔU متناظر با تعداد ورودی $u(k)$ به مدل فرایند اعمال می‌شوند. در مواجهه با قیود، با بازنویسی تابع هزینه به‌صورت فقط تابعی از ماتریس اختلاف ورودی ΔU، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به‌صورت مسئله درجه دوم مرسوم حاصل می‌شود [۱۸]:

$$J(\Delta U)=\tfrac{1}{2}\Delta U^TH\Delta U+\Delta U^TF \qquad (۳۰)$$

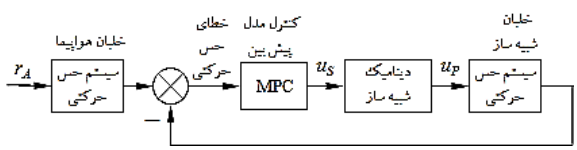
باید توجه نمود که امکان تفاوت افق پیش‌بین N_p با افق کنترل N_c وجود داشته و تغییرات این پارامترها به‌عنوان پارامترهای اساسی در هزینهٔ محاسباتی و آثار پایداری، اهمیت قابل توجهی در عملکرد سیستم کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل دارند. همچنین در این روش عموماً محدودیت در ورودی‌های U و خروجی‌های Y به‌صورت قیود تغییرات ورودی بازنویسی می‌شوند:

$$A\cdot\Delta U\le b \qquad (۳۱)$$

با احتساب روابط قیود، مسئله بهینه‌سازی درجه دوم شامل روابط ۳۰ و ۳۱ به‌صورت مسئلهٔ بهینه‌سازی قیددار تبدیل می‌شود که ابزارهای محاسباتی مناسبی از جمله توابع داخلی نرم‌افزار متلب برای حل مسئله کنترل مدل پیش‌بین در دسترس است.

۴. سامانهٔ حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

ساختار روش حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در شکل مفهومی ۴ ترسیم شده است. در مقایسه با شکل ۱، کنترل پیش‌بین به‌عنوان جایگزینی برای فیلترهای شستشو در روش بهینه محسوب می‌شود. مطابق شکل، تولید مسیر مرجع با ورودی سیگنال r_A به بلوک حس حرکتی خلبان هواپیما آغاز می‌شود. متعاقباً حس حرکتی تولید شده به‌عنوان ورودی مرجع با حس حرکتی خلبان شبیه‌ساز که به سیستم بازخورد می‌شود مقایسه شده و خطای حس حرکتی توسط بخش کنترل پیش‌بین دریافت می‌گردد. در بخش کنترل پیش‌بین با دریافت ورودی خطای حس حرکتی، سیگنال خروجی u_s به نحوی محاسبه می‌شود که در عبور از دینامیک شبیه‌ساز، حس حرکتی یکسانی برای خلبان شبیه‌ساز با خلبان وسیله واقعی ایجاد گردد. برای حفظ سامانهٔ حرکتی در محدودهٔ عملیاتی، مقادیر مرجع ورودی ثابت صفر برای کلیهٔ عناصر بردار متغیرهای حالت شبیه‌ساز یعنی $x_c(=[x \quad u \quad \theta]^T)$ استفاده می‌شود. گفتنی است این امر موجب تولید تلاش کنترلی در جهت کاهش حرکت سکوی متحرک و در نتیجه مقیدتر نمودن حرکت‌های سامانهٔ شبیه‌ساز در فضای عملیاتی آن می‌شود.



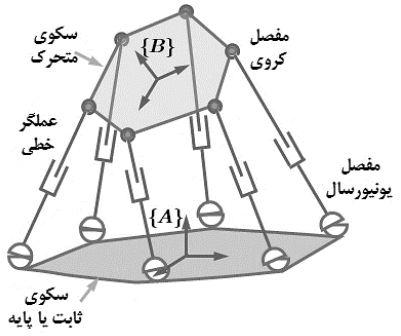
شکل ۴. ساختار سامانهٔ حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

با توجه به اثر پارامترهایی چون افق پیش‌بین و افق کنترل، تلاش در تنظیم این پارامترها به‌عنوان مصالحه‌ای برای دستیابی به عملکرد رضایت‌بخش سیستم طراحی شده از نظر تولید دقیق حس حرکتی شبیه‌ساز با وسیله واقعی و انطباق آن در محدودهٔ کاری سامانهٔ حرکتی لازم است. گفتنی است در صورت در اختیار داشتن اطلاعات قابل اعتماد از رفتار آتی خلبان، امکان استفاده از

گسترده‌ترین افق پیش بینی / کنترل وجود دارد. اگرچه محدودیت‌های محاسباتی در کاربردهای زمان واقعی و عدم امکان پیش‌بینی رفتار آتی خلبان، طول پنجرهٔ پیش‌بینی / کنترل را در شرایط عملی محدودتر می‌کند. در این پژوهش به‌عنوان یک جهت‌گیری کلی در طراحی مؤثر سامانهٔ حرکت‌ساز، با توجه به عدم اطلاع از رفتار آتی خلبان، از پنجرهٔ پیش‌بینی کوچکی استفاده شده است. همچنین تلفیق اثر گرانش در مدل حس حرکتی مطابق رابطهٔ ۲، به‌صورت خودکار موجب اصلاح هماهنگ منطقهٔ فرکانس پایین زاویهٔ شیب و مشارکت قابل ملاحظه آن در ردیابی حس حرکتی انتقالی می‌گردد. قابلیت اصلاح هماهنگ شیب که به‌عنوان یکی از مزیت‌های عمدهٔ سامانه‌های حرکت‌ساز مطرح است را می‌توان از ویژگی‌های موثر رویکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل نیز محسوب نمود.

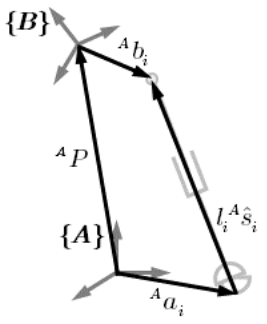
۵. سینماتیک معکوس موقعیت سامانهٔ حرکتی

سکوی ۶ درجه آزادی استوارت رایج‌ترین سامانهٔ حرکتی در حوزهٔ شبیه‌سازهای پرواز است [۱]. در شکل ۵ تصویر مفهومی اجزای اصلی سامانهٔ شامل سکوهای ثابت و متحرک که توسط عملگرهای خطی با مفاصل کروی و یونیورسال به هم متصل شده‌اند ارائه شده است. تحلیل سینماتیک معکوس سامانه، به‌معنای تعیین طول عملگرهای خطی متناظر با وضعیت سکوی متحرک است. بدین منظور چارچوب $\{A\}$ روی سکوی ثابت و چارچوب $\{B\}$ روی سکوی متحرک الصاق می‌شوند.



شکل ۵. شکل مفهومی سکوی استوارت همراه با چارچوب‌های الصاق‌شده بر سکوی ثابت و متحرک

بیان سینماتیک معکوس سامانهٔ حرکتی از توصیف حلقه بسته برداری عملگر نمونه آغاز می‌شود. بدین‌منظور حلقه بستهٔ برداری عملگر نمونه در شکل ۶ ترسیم شده است.



شکل ۶. حلقهٔ بسته برداری عملگر نمونه با نمادگذاری در مختصات ثابت

با توجه به شکل، جهت توصیف موقعیت اتصال عملگر نمونه به سکوی ثابت توسط مفصل یونیورسال، از بردار a_i و موقعیت اتصال آن به سکوی متحرک توسط مفصل کروی، از بردار b_i استفاده شده است. برای نمایش طول عملگر از نماد l و توصیف راستای آن از بردار یکه $\hat{s}_i$ و برای یکسان‌سازی توصیف بردارها در چارچوب (اینرسی) $\{A\}$ از بالانویس A استفاده شده است. در مختصات ثابت $\{A\}$، موقعیت مبدأ مختصات متحرک با بردار $^A P(=[x \quad y \quad z]^T)$ و جهت‌گیری آن با ماتریس دوران $^A R_B$ توصیف می‌شوند. ماتریس دوران با رویکرد استفاده از زوایای اویلر $(\phi \quad \theta \quad \psi)$ مطابق ذیل است [۲۱]:

$$^A R_B = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \qquad (۳۲)$$

که درایه‌های $r_{i,j}, i, j = 1,\ldots,3$ مطابق ذیل تعریف می‌شوند:

$$r_{11} = \cos(\psi)\cos(\theta)$$
$$r_{12} = \sin(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) - \cos(\phi)\sin(\psi)$$
$$r_{13} = \cos(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) + \sin(\phi)\sin(\psi)$$
$$r_{21} = \cos(\theta)\sin(\psi)$$
$$r_{22} = \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) + \cos(\phi)\cos(\psi)$$
$$r_{23} = \cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) - \sin(\phi)\cos(\psi)$$
$$r_{31} = -\sin(\phi)$$
$$r_{32} = \sin(\phi)\cos(\theta)$$
$$r_{33} = \cos(\phi)\cos(\theta)$$

تحلیل سینماتیک معکوس موقعیت سکوی استوارت با فرض معلوم‌بودن بردار موقعیت $^A P$ و جهت‌گیری سکوی متحرک یعنی $(\phi \quad \theta \quad \psi)$ مبتنی بر تعیین بردار طول عملگرهای خطی $l(=[l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6]^T)$ ست. در برپایی رابطهٔ سینماتیک

معکوس سامانه حرکتی استوارت با استفاده از شکل ۶ برای حلقهٔ بسته برداری موقعیت عملگر نمونه می‌توان نوشت [۲۱]:

$$l_i\,{}^A\hat{s}_i = {}^AP + {}^Ab_i - {}^Aa_i \qquad (۳۳)$$
$$= {}^AP + {}^AR_B\,{}^Bb_i - {}^Aa_i, \quad i=1,\ldots,6$$

طول عملگر نمونه، برابر اندازهٔ بردار عملگر در ۳۳ است. با ضرب داخلی این رابطه در خود آن، رابطهٔ طول عملگر نمونه حاصل می‌شود:

$$l_i = [{}^AP^T\,{}^AP + {}^Bb_i^T\,{}^Bb_i + {}^Aa_i^T\,{}^Aa_i \qquad (۳۴)$$
$$-2\,{}^AP^T\,{}^Aa_i + 2\,{}^AP^T({}^AR_B\,{}^Bb_i) - 2({}^AR_B\,{}^Bb_i)^T\,{}^Aa_i]^T$$

مطابق ۳۴، طول عملگر تابعی از وضعیت سکوی متحرک است که با فرض معلوم بودن جهت‌گیری و موقعیت سکو، امکان محاسبهٔ طول متناظر عملگرها فراهم می‌گردد.

۶. شبیه‌سازی

در این مرحله، بخشی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی مسئله ارائه و مورد بحث قرار گرفته است. حرکت شبیه‌ساز در جهت طولی با مشارکت زاویهٔ شیب در نظر گرفته شده است. با توجه به برنامهٔ شبیه‌سازی تهیه‌شده، امکان شبیه‌سازی طیف گسترده‌ای از حرکت‌ها وجود دارد که به‌عنوان نمونه، با توجه ویژه در نمایش مشارکت اثر گرانش در ایجاد حس حرکتی طولی با تغییر هماهنگ زاویهٔ شیب (پیچ)، نتایج دو مورد گزارش شده است.

۱. ورودی مرجع سرعت زاویه‌ای شیب برابر صفر، شتاب خطی (نیروی مخصوص) طولی، موج سینوسی کامل با دامنهٔ ۲ متر بر مجذور ثانیه و دوره تناوب ۲۰ ثانیه
۲. ورودی مرجع سرعت زاویه‌ای شیب برابر صفر، شتاب خطی (نیروی مخصوص) طولی، موج مربعی با شتاب ثابت ۲ متر بر مجذور ثانیه در بازهٔ زمانی ۱۰ ثانیه، سپس شتاب ثابت ۲ متر بر مجذور ثانیه در بازهٔ زمانی ۱۰ ثانیه و سرعت ثابت بعد از آن

گفتنی است به‌منظور نمایش عملکرد روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، نتایج حاصل از این روش در مقایسه با روش حرکت‌ساز بهینه بر پایه فیلترهای شستشو ترسیم شده‌اند.

۶-۱. سامانهٔ حرکتی

حل مسئله سینماتیک معکوس ۳۴ نیازمند مشخص‌بودن هندسهٔ سامانه حرکتی است. با توجه به توسعهٔ سامانه‌های حرکتی در مقیاس آزمایشگاهی، برای اهداف این بخش از پژوهش، از مقادیر عددی هندسه سکوی استوارت مرجع [۲۲] استفاده شده است. همچنین در محاسبات سینماتیک معکوس، به زوایای اتصال عملگرها به سکوهای ثابت و متحرک همراه با اقطار سکوها و ارتفاع سکوی متحرک از سکوی ثابت در وضعیت خنثی نیاز است. مقادیر عددی متغیرهای لازم در جدول ۱ فهرست شده است.

جدول ۱. مقادیر عددی هندسهٔ سکوی استوارت

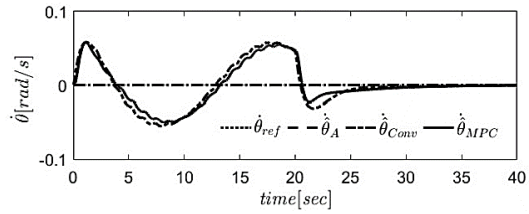
r_a (mm)	r_b (mm)	$z_{neutral}$ (mm)	θ_A (deg)	θ_B (deg)
۱۴۶/۶۳۳	۹۴/۳۴۰	۲۵۰	۱۶/۴۱۴۵	۲۵/۶۸۱۴

در جدول ۱، r_a و r_b به‌ترتیب شعاع سکوهای ثابت و متحرک، θ_A و θ_B به‌ترتیب زوایای بین مفاصل در محل اتصال به سکوهای ثابت و متحرک و $z_{neutral}$ ارتفاع سکوی متحرک از سکوی ثابت در وضعیت خنثی است.

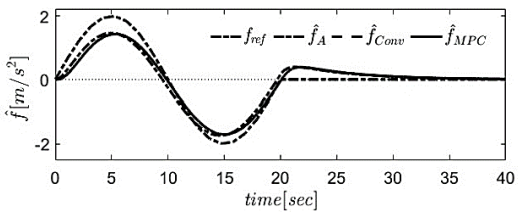
۶-۲. ورودی سینوسی

نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در شکل‌های ۷ الی ۱۱ ارائه شده‌اند. شکل ۷ نشان‌دهندهٔ تغییرات زمانی حس حرکتی سرعت زاویه‌ای حاصل از سامانهٔ حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در مقایسه با روش بهینه یا استفاده از فیلترهای شستشو نسبت به ورودی مرجع صفر به‌منظور نمایش مشارکت این مؤلفه در ایجاد حس حرکتی طولی است. در این منحنی $\dot{\theta}_{ref}$، $\dot{\hat{\theta}}_A$، $\dot{\hat{\theta}}_{Conv}$ و $\dot{\hat{\theta}}_{MPC}$ به‌ترتیب سرعت‌های زاویه‌ای ورودی مرجع به حس حرکتی خلبان هواپیمای واقعی، حس حرکتی خلبان به‌عنوان ورودی مرجع به سیستم حرکت‌ساز مدل پیش‌بین، حس حرکتی روش بهینه با فیلترهای شستشو و حس حرکتی حاصل از حرکت‌ساز مدل پیش‌بین می‌باشند. همان‌گونه که از شکل می‌توان دریافت سامانهٔ حرکت‌ساز سرعت زاویه‌ای در محدودهٔ $-0.05 \le \dot{\theta} \le 0.05[\mathrm{rad/sec}]$ برای بازهٔ زمانی ۲۰ ثانیهٔ اول را تجربه کرده و با حذف تحریک ورودی، این مقدار به صفر کاهش می‌یابد. مطابق نتایج حاصل، هر دو روش حرکت‌ساز دارای عملکرد نسبتاً یکسانی از منظر نشان داده شده می‌باشند. قابلیت ردیابی حس حرکت انتقالی خلبان هواپیما $\hat{f}_A$ به‌عنوان ورودی مرجع سامانه حرکت‌ساز پیش‌بین، توسط دو روش بهینه $\hat{f}_{Conv}$ و

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل $\hat{f}_{MPC}$ نسبت به ورودی مرجع سینوسی f_{ref} در شکل ۸ ترسیم شده‌اند.



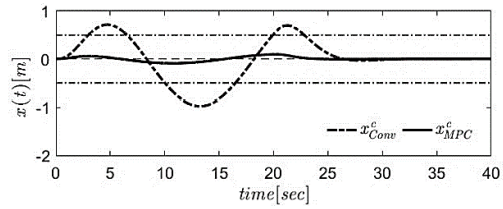
شکل ۷. حس حرکتی سرعت زاویه‌ای حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین در مقایسه با روش بهینه



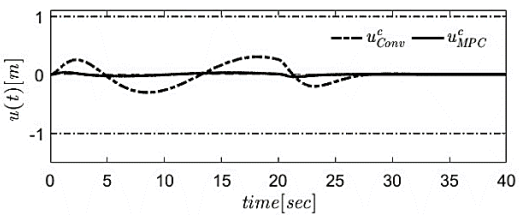
شکل ۸ حس حرکتی شتاب خطی حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین در مقایسه با روش بهینه

مطابق شکل، در بازهٔ زمانی ۲۰ ثانیه هر سه منحنی با اختلاف تقریباً یکسان ورودی مرجع f_{ref} را دنبال می‌کنند. همچنین حس حرکتی حاصل از روش بهینه کاملاً منطبق بر حس حرکتی واقعی بوده و خروجی سامانه حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل با اختلاف ناچیزی، ورودی مرجع را دنبال می‌کند که به‌نظر می‌رسد این اختلاف ناشی از محدودیت اعمال‌شده به سامانهٔ حرکتی در رعایت قیود مسئله است. تغییرات زمانی متغیرهای حالت متناظر سامانهٔ حرکتی ($x_c(=[x \quad u \quad \theta]^T$ از دو روش بهینه و مدل پیش‌بین به‌همراه محدودهٔ مجاز تغییرات این متغیرها که به‌صورت ثابت فرض شده‌اند، برای ورودی‌های مرجع سرعت زاویه‌ای صفر و شتاب خطی سینوسی در شکل‌های ۹ الی ۱۱ ترسیم شده‌اند. تغییرات زمانی جابه‌جایی طولی سکوی سامانهٔ حرکتی از هر دو روش در شکل ۹ ترسیم شده است.

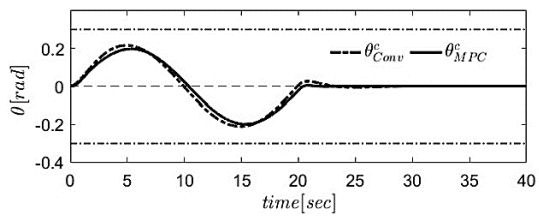
مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، اجابت حس حرکتی مورد نظر در روش بهینه، نیازمند جابه‌جایی‌های طولی قابل ملاحظهٔ سامانهٔ حرکتی و نقض آشکار محدودهٔ مجاز $-0.5 \le x \le 0.5$[m] است. میزان جابه‌جایی‌های ناچیز مورد نیاز در روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، ضمن حفظ این متغیر در محدودهٔ مجاز، مزیت این روش را کاملاً روشن می‌کند. تغییرات زمانی سرعت طولی سکوی سامانهٔ حرکتی در هر دو روش در شکل ۱۰ ارائه شده است. مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، سامانهٔ حرکتی در روش بهینه مجدداً در مقایسه با روش کنترل پیش‌بین، سرعت قابل توجهی خواهد داشت، اگرچه این متغیر در مانور مورد نظر در محدودهٔ مجاز $-1 \le u \le 1$[m/sec] باقی می‌ماند. تغییرات این پارامتر در روش کنترل پیش‌بین بسیار کم بوده و سامانهٔ حرکتی با سرعت ناچیزی، حس حرکتی مورد نظر را تأمین خواهد نمود. تغییرات زمانی زاویهٔ شیب سکوی سامانهٔ حرکتی از هر دو روش در شکل ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۹. تغییرات جابه‌جایی طولی سکوی سامانهٔ حرکتی برای حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین در مقایسه با روش بهینه

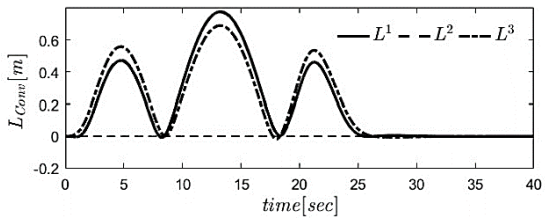


شکل ۱۰. غییرات سرعت طولی سکوی سامانهٔ حرکتی برای حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین در مقایسه با روش بهینه

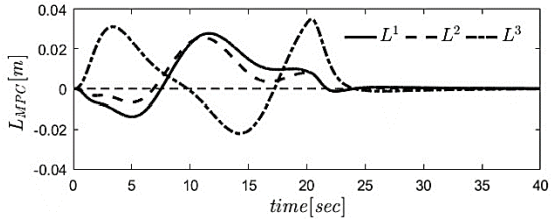


شکل ۱۱. تغییرات زاویه شیب سکوی سامانهٔ حرکتی برای حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین در مقایسه با روش بهینه

مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، انتظار رفتار تقریباً یکسانی از سامانهٔ حرکتی همراه با حفظ این متغیر در مانور مورد نظر در محدودهٔ مجاز $-0.3 \le \theta \le 0.3$ [rad] از هر دو روش پیش‌بینی می‌شود. جهت تبیین بهتر عملکرد دو رویکرد حرکت ساز بهینه و مدل پیش‌بین، تغییر طول عملگرهای شمارهٔ ۱ الی ۳ نسبت به ورودی موج سینوسی در کانال نیروی مخصوص در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ با استفاده از رابطهٔ ۳۴ ترسیم شده‌اند.



شکل ۱۲. تغییر زمانی طول عملگرهای شماره ۱ الی ۳ به ورودی موج سینوسی در کانال نیروی مخصوص در رویکرد بهینه



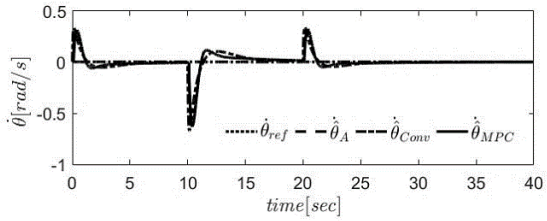
شکل ۱۳. تغییر زمانی طول عملگرهای شماره ۱ الی ۳ به ورودی موج سینوسی در کانال نیروی مخصوص در رویکرد مدل پیش‌بین

گفتنی است که طول عملگرها به‌علت در اختیار بودن متغیرهای حالت توصیف‌کننده وضعیت سکوی متحرک در هر لحظه، به‌طور صریح از رابطهٔ مذکور قابل محاسبه می‌باشند. همچنین یادآور می‌گردد به‌علت انتخاب مانور شیب - طولی و محورهای مختصات متقارن انتخابی، رفتار عملگرهای ۴ الی ۶ مشابه عملگرهای ۱ الی ۳ بوده و بنابراین از بیان آنها پرهیز شده است. با مقایسهٔ نتایج دو رویکرد، تغییر طول بسیار بزرگ عملگرها در استفاده از فیلترهای بهینه نسبت به رویکرد مدل پیش‌بین انتظار می‌رود که تاییدی بر کیفیت عملکرد مطلوب روش کنترل پیش‌بین است.

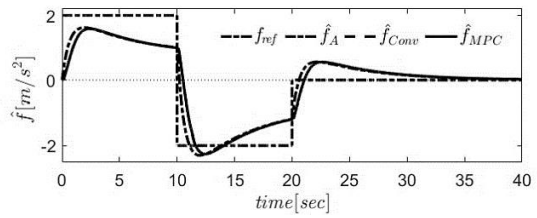
۶-۳. ورودی موج مربعی

نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۴ الی ۱۸ ترسیم شده‌اند. مجدداً شکل ۱۴ نشان‌دهندهٔ تغییرات زمانی حس حرکتی سرعت زاویه‌ای شیب حاصل از سامانهٔ حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در مقایسهٔ با روش بهینه یا استفاده از فیلترهای شستشو نسبت به ورودی مرجع صفر به‌منظور نمایش مشارکت این مؤلفه در ایجاد حس حرکتی طولی است. مطابق شکل، تغییرات شدید سرعت زاویه‌ای برای سامانهٔ حرکت‌ساز در موقعیت‌های زمانی که شتاب خطی تغییرات قابل ملاحظه‌ای می‌یابد، پیش‌بینی می‌شود. این امر بیانگر عملکرد مؤثر هر دو رویکرد حرکت‌ساز در فراهم نمودن مشارکت اثر گرانش در ایجاد حس حرکت انتقالی مناسب می‌باشد. مطابق نتایج حاصل، هر دو روش حرکت‌ساز دارای عملکرد نسبتاً یکسانی هستند. قابلیت ردیابی حس حرکت انتقالی واقعی هواپیما $\hat{f}_A$ به‌عنوان ورودی مرجع به سامانهٔ حرکت‌ساز، از دو روش بهینه $\hat{f}_{Conv}$ و کنترل پیش‌بین $\hat{f}_{MPC}$ نسبت به ورودی موج مربعی مرجع f_{ref} در شکل ۱۵ ارائه شده است. مطابق شکل، حس حرکتی حاصل از روش بهینه کاملاً منطبق بر حس حرکتی واقعی بوده و خروجی سامانهٔ حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین با اختلاف بسیار ناچیزی در برخی زمان‌ها، ورودی مرجع را دنبال می‌کند. این اختلاف ناچیز به‌نظر می‌بایست ناشی از محدودیت اعمال‌شده به سامانهٔ حرکتی در رعایت قیود مسئله باشد که در شکل‌های بعدی مورد بحث قرار گرفته‌اند. تغییرات زمانی متغیرهای حالت متناظر سامانهٔ حرکتی $x_c(=[x \quad u \quad \theta]^T)$ در دو روش بهینه و مدل پیش‌بین به‌همراه محدودهٔ مجاز تغییرات این متغیرها برای ورودی‌های مرجع سرعت زاویه‌ای صفر و شتاب خطی موج مربعی در شکل‌های ۱۶ الی ۱۸ ترسیم شده‌اند. تغییرات زمانی جابه‌جایی طولی سکوی سامانه حرکتی در هر دو روش در شکل ۱۶ ارائه شده است. مشابه قبل، سامانهٔ حرکتی در روش بهینه برای اجابت تأمین حس حرکتی مورد نظر، نیازمند جابه‌جایی‌های طولی قابل ملاحظه‌ای است که به‌طور مشخص سبب خروج سامانه حرکتی از محدودهٔ مجاز $-0.5 \le x \le 0.5\,[\mathrm{m}]$ خواهدشد. میزان جابه‌جایی‌های ناچیز مورد نیاز در روش کنترل پیش‌بین ضمن حفظ کیفیت حس حرکتی مطلوب، قابلیت توسعه استفاده از سامانهٔ حرکتی در مانورهای پیچیده‌تر را روشن می‌کند. تغییرات زمانی سرعت طولی سکوی سامانه حرکتی در هر دو روش در شکل ۱۷ ارائه شده است. مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، سامانهٔ حرکتی در روش بهینه مجدداً در مقایسه با روش کنترل پیش‌بین، سرعت قابل توجهی خواهد داشت. در این مانور سرعت مورد انتظار در تأمین حس حرکتی مورد نظر از روش بهینه از محدودهٔ مجاز خارج خواهد شد. در حالی‌که تغییرات این پارامتر در روش کنترل پیش‌بین ناچیز بوده و سامانهٔ حرکتی با سرعت کم، حس حرکتی مورد نظر را تأمین خواهد نمود. تغییرات زمانی زاویهٔ شیب سکوی سامانه حرکتی از هر دو روش در شکل ۱۸ ارائه شده است. مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، انتظار رفتار تقریباً یکسانی از سامانهٔ حرکتی همراه با حفظ این متغیر در مانور مورد نظر در محدودهٔ مجاز در

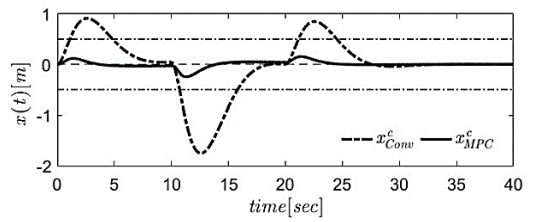
هر دو روش پیش‌بینی می‌شود. اگرچه در روش کنترل پیش‌بین تغییرات هموارای برای این متغیر خصوصاً در مواضعی که در ورودی تغییرات شدیدی رخ می‌دهد، مشاهده می‌شود. این امر دلالت بر حرکت هموارتر سامانهٔ حرکت‌ساز مدل پیش‌بین دارد که مجدداً از مزایای روش مذکور محسوب می‌شود. تغییر طول عملگرهای شمارهٔ ۱ الی ۳ نسبت به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ ترسیم شده‌اند. برای رویکرد حرکت‌ساز بهینه در مانور مورد نظر به‌مراتب حرکت‌های بسیار بزرگ عملگرها پیش‌بینی می‌شود. مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، امکان ایجاد حس حرکتی مناسب به‌علت محدودیت فضای کاری سامانه، با تردید جدی همراه است. در مقایسه، نتیجهٔ شبیه‌سازی عملکرد رویکرد کنترل پیش‌بین نشان‌دهندهٔ تغییرات قابل قبول در فضای کاری سامانه است. اگرچه انتظار حرکت‌های قابل توجه شبیه‌ساز در فواصل زمانی ثانیه ۱۰ الی ۱۵ وجود دارد.



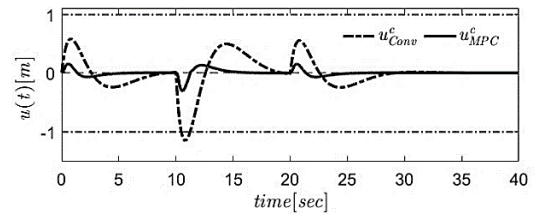
شکل ۱۴. حس حرکتی سرعت زاویه‌ای حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین در مقایسه با روش بهینه



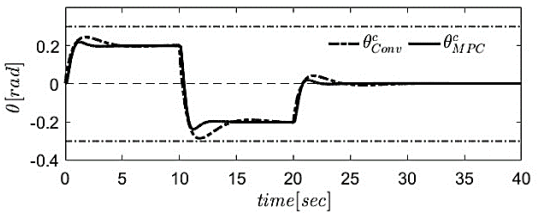
شکل ۱۵. حس حرکتی شتاب خطی حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین در مقایسه با روش بهینه



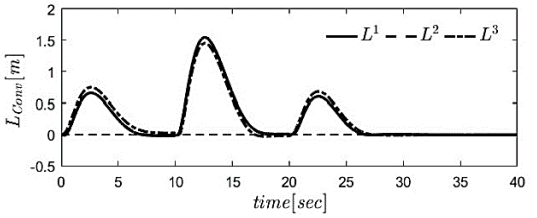
شکل ۱۶. تغییرات جابجایی طولی سکوی سامانه حرکتی برای حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین در مقایسه با روش بهینه



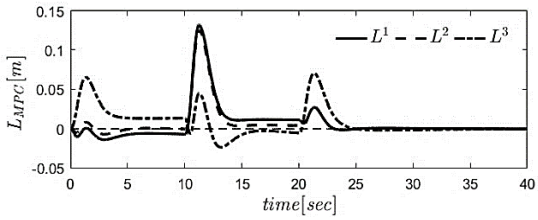
شکل ۱۷. تغییرات سرعت طولی سکوی سامانه حرکتی برای حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین در مقایسه با روش بهینه



شکل ۱۸. تغییرات زاویهٔ شیب سکوی سامانهٔ حرکتی برای حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین در مقایسه با روش بهینه



شکل ۱۹. تغییر زمانی طول عملگرهای شماره ۱ تا ۳ به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص در رویکرد بهینه



شکل ۲۰. تغییر زمانی طول عملگرهای شمارهٔ ۱ تا ۳ به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص در رویکرد کنترل پیش‌بین

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به‌طور روشمند، سامانهٔ حرکت‌ساز کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل برای شبیه‌سازی حس حرکت طولی ارائه شد. روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به‌عنوان رویکردی جدید در طراحی سامانه‌های حرکت‌ساز، با تغییر الگوی روش کنترل بهینه بر مبنای

فیلترهای شستشو، هماهنگی عینی در مشارکت هماهنگ حرکات زاویهٔ شیب در ایجاد حس حرکتی مناسب ایجاد می‌کند. در این روش محدودیت‌های حرکتی سامانهٔ شبیه‌ساز با جابه‌جایی‌های محدود عملگرها، کاملاً رعایت می‌شود. رویکرد کنترل پیش‌بین با استفاده از روش بهینه‌سازی، بدون استفاده از هیچ‌گونه فیلتری در اثرگذاری بر رفتار سامانهٔ حرکت‌ساز، ابزار قابل تنظیم، قوی و البته ساده‌ای در طراحی سامانه‌های حرکت‌ساز محسوب می‌شود.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی حس حرکتی برای مانورهای نمونه نسبتاً سخت در مقایسه با نتایج سامانهٔ حرکت‌ساز بهینه، نشان از صحت عملکرد رویکرد مورد اشاره دارد.

قدردانی

نویسنده به پاس حمایت مالی این پژوهش، از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج کمال قدردانی را دارد.

۸. مآخذ

[1] A. Sayadi, A. Nikranjbar, A. Mahmoodi, Optimal motion cueing algorithm development of 6dof flight simulator considering workspace of motion platform, *Aerosapce Knowledge and Technology Journal*, Vol. 3, No. 1, pp. 17-28, 2014. (in Persian فارسی).

[2] R. Sivan, J. Ish-Shalom, J. K. Huang, An optimal control approach to the design of moving flight simulators. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol 12, No. 6, pp. 818-827, 1982.

[3] R. J. Telban, F. M. Cardullo, J. A. Houck, Developments in human centered cueing algorithms for control of flight simulator motion systems. *AIAA Proceeding of Conference Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, Portland, USA, pp. 463-473, 1999.

[4] R. J. Telban, W. Wu, F. M. Cardullo, J. A. Houck. *Motion cueing algorithm development: Initial investigation and redesign of the algorithms*, NASA Langley Research Center; Hampton, VA, USA, 2000, https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20000041705.pdf (accessed 4 Jul 2017).

[5] W. Wu, Development of cuing algorithms for the control of simulator motion systems, *MS Thesis, State University of New Youk at Binghamton, USA*, 1997.

[6] W. Wu, F. M. Cardullo. Is there an optimum motion cueing algorithm. *AIAA Proceedings of the Modelling and Simulation Technologies Conference*, New Orleans, USA, August 11-13, pp. 23-29, 1997.

[7] S. H. Chen, L. C. Fu, An optimal washout filter design for a motion platform with senseless and angular scaling maneuvers. *IEEE Proceeding of American Control Conference* (ACC), Baltimore, MD, USA, June 30-July 02, pp. 4295-4300, 2010.

[8] N. J. Garrett, M. C. Best, Model predictive driving simulator motion cueing algorithm with actuator-based constraints, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 51, No. 8, pp. 1151-1172, 2013.

[9] R. J. Telban, A nonlinear motion cueing algorithm with a human perception model. Energy, Simulation-training, *Ocean Engineering, and Instrumentation: Research Papers of the Link Foundation Fellows*, Vol. 2, pp. 97-127, 2002.

[10] J. A. Houck, R. J. Telban, F. M. Cardullo, and L. C. Kelly, *Motion Cueing Algorithm Development: New Motion Cueing Program Implementation and Tuning*, NASA Langley Research Center; Hampton, VA, USA, 2005, https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050180245.pdf (accessed 4 Jul 2017).

[11] M. Aminzadeh, A. Mahmoodi, M. Sabzehparvar, Optimal Motion-Cueing Algorithm Using Motion System Kinematics, *European Journal of Control*, Vol. 18, No. 4, pp. 363-375, 2012.

[12] R. F. Telban, Cardullo, J. A. Houck, A nonlinear, human-centered approach to motion cueing with a neurocomputing solver. *AIAA Proceeding of Modeling and Simulation Technologies Conference and exhibit*, August 5-8, Monterey, CA, USA, pp. 1-10, 2002.

[13] K. B. Zaychik, F.M. Cardullo, *Nonlinear Motion Cueing Algorithm: Filtering at Pilot Station and Development of the Nonlinear Optimal Filters for*

Pitch and Roll, NASA Langley Research Center; Hampton, VA, USA, 2012. Available from: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120008933.pdf (accessed 3 Jul 2017).

[14] X. Wang, L. Li, W. Zhang, Research on fuzzy control washout algorithm of locomotive driving simulator, *IEEE Proceeding of 7th World Congress on Intelligent Control and Automation* (WCICA), China, June 25-27, pp. 3737-3741, 2008.

[15] F. Lara-Molina, J. Rosário, D. Dumur, Architecture of predictive control for a Stewart platform manipulator, *IEEE Proceedings of the 8th Intelligent Control and Automation World Congress* (WCICA), Brazil, July 7-9, pp. 6584-6589, 2010.

[16] I. Qaisi, A. Treachtler, Constrained linear quadratic optimal controller for motion control of ATMOS driving simulator, *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, France, September 6-7, pp. 1-8, 2012.

[17] Z. Fang, A. Kemeny, Explicit MPC motion cueing algorithm for real-time driving simulator. *IEEE Proceeding of the 7th International Conference in Power Electronics and Motion Control* (IPEMC), Vol. 2, pp. 874-878, June 2-5, 2012.

[18] M. Baseggio, A. Beghi, M. Bruschetta, F. Maran, D. Minen, An MPC approach to the design of motion cueing algorithms for driving simulators, *Proceeding of the 14th IEEE International Conference in Intelligent Transportation Systems* (ITSC), Padova, Italy, Oct. 5-7, pp. 692-697, 2011.

[19] D. A. Pham, S. Röttgermann, G. F. Flores, A. Kecskeméthy, Optimal Motion Cueing Algorithm Selection and Parameter Tuning for Sickness-Free Robocoaster Ride Simulations, *in Mechanisms, Transmissions and Applications*, Springer, pp. 127-135, 2015.

[20] MathWorks, *Control System Toolbox: User's Guide (R2016b), Linear-Quadratic Regulator (LQR) design*, 11 March, 2016, https://www.mathworks.com/help/control/ref/lqr.html (accessed 4 Jul 2017).

[21] H. D. Taghirad. *Parallel robots: mechanics and control*, CRC press, 2013.

[22] Z. Bingul, O. Karahan, *Dynamic Modeling and Simulation of Stewart Platform*, in Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization, Edited by S. Kucuk, InTech, pp. 19-42, 2012, http://www.intechopen.com/books/serial-and-parallel-robot-manipulators-kinematics-dynamics-control-and-optimization/dynamic-modelling-of-stewart-platform (accessed 4 Jul 2017).

پی‌نوشت

1. flight simulator
2. motion cueing
3. optimal method
4. optimal filters
5. online
6. Riccati equation
7. Fuzzy algorithm
8. workspace
9. model predictive control (MPC)
10. predicting horizon
11. quadratic cost function
12. real time
13. washout filters
14. regulator
15. tilt coordination
16. surge/pitch
17. sway/roll
18. heave/yaw
19. interaction
20. decoupled
21. specific force
22. otolith
23. semi-circular canals
24. human vestibular model
25. expected value
26. Matlab
27. integrand
28. constraints
29. algebraic Riccati equation
30. robust
31. multi-input multi-output (MIMO)
32. strictly proper
33. vectorization