

# طراحی سامانه حرکت‌ساز مدل پیش‌بین فازی زمان واقعی

ابولفتح نیکرنجبر

استادیار، دانشکده مکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، البرز، a.nikranjbar@kiaau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

## چکیده

تلاش‌ها در ایجاد حس حرکت واقعی‌تر به سمت طراحی سامانه‌های حرکت‌ساز با مدل‌های سینماتیک معکوس غیرخطی سامانه‌های حرکتی گرایش یافته است. این رویکرد به علت ضرورت کاربرد حل زمان واقعی سبب پیچیدگی محاسباتی می‌شود. اجابت خواسته‌های مسئله، نیازمند بهره‌گیری از روش‌های محاسباتی کارآمد با سرعت و دقت بالا، بدون بروز وقفه در عملکرد سامانه حرکتی در کاربردهای زمان واقعی است. سیستم‌های فازی به عنوان بخش مهمی از سیستم‌های محاسباتی نرم، قابلیت مدلسازی فرایندهای غیرخطی با ویژگی‌های سرعت محاسباتی بالا با دقت لازم و سادگی در پیاده‌سازی می‌باشند. در این مقاله از سیستم فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ با قابلیت تقریب مدل غیرخطی آنی با ترکیب فازی مجموعه مدل‌های خطی برای تقریب سینماتیک معکوس سامانه حرکتی استفاده شده است. همچنین سکوی ۶ درجه آزادی استوارت به عنوان رایج‌ترین سامانه حرکتی در شبیه‌سازهای پرواز در نظر گرفته شده و سامانه حرکت‌ساز افزوده حس حرکتی انسان همراه با سینماتیک معکوس فازی سامانه حرکتی برپا شده است. مدل حرکت‌ساز حاصل با رویکرد کنترل مدل پیش‌بین زمان واقعی با هدف ردیابی حس حرکتی خلبان وسیله واقعی، حل و نتایج حاصل با مدل حرکت‌ساز غیرخطی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده کیفیت مطلوب روش پیشنهادی از نظر حرکت محدودتر و هموارتر عملگرها بوده و به عنوان جایگزینی مطمئن در کاربردهای زمان واقعی حرکت‌ساز پیشنهاد می‌شود.

## واژگان کلیدی

شبیه‌ساز پرواز، سامانه حرکت‌ساز فازی، سینماتیک معکوس فازی، کنترل پیش‌بین فازی، سکوی استوارت

### ۱. مقدمه

ایجاد حس حرکتی یکسان بین خلبان شبیه‌ساز با خلبان وسیله واقعی در فضای کاری سامانه حرکتی هستند [۱]. حفظ

سامانه‌های حرکت‌ساز با دریافت سرعت‌های زاویه‌ای و شتاب‌های خطی، موظف به ایجاد حرکت‌های مناسب عملگرها به منظور

سامانه‌های حرکتی در فضای عملیاتی و توسعه مدل‌های حرکت‌ساز به‌سمت هرچه واقعی‌تر نمودن حرکت‌ها با منظور نمودن سینماتیک معکوس سامانه حرکتی، سبب گرایش حوزه طراحی سامانه‌های حرکت ساز به‌سمت استفاده از رویکردهای کارآمدتر شده است. در همین راستا، این حوزه در طی سال‌های اخیر شاهد رشد چشمگیر کاربرد کنترل مدل پیش‌بین بوده است [۲-۸].

نیکرنجبر (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای مقایسه‌ای عملکرد رویکرد کنترل پیش‌بین با روش مرسوم طراحی فیلترهای بهینه را ارائه کرده است [۲]. نتایج این پژوهش نشان از قابلیت محرز رویکرد کنترل پیش‌بین در حفظ سامانه حرکتی در محدوده فضای عملیاتی همزمان با دستیابی به اهداف ایجاد حس حرکتی یکسان خلبان شبیه‌ساز به خلبان هواپیما دارد. مولفین در [۳] نتایج طراحی سامانه حرکت‌ساز با استفاده از رویکرد کنترل پیش‌بین را به‌عنوان پیشنهادی مؤثر برای خودروسازان جهت انجام آزمون‌های مجازی جاده ارائه نمودند. مؤلفان مذکور همچنین نتیجه پژوهش‌های خود در زمینه طراحی سامانه‌های حرکت‌ساز برای شبیه‌سازهای فشرده خودرو را با رویکرد مشابه قبل، در [۴] منتشر نمودند. در ادامه، آنان با ترکیب سکوها‌های هگزاپاد<sup>۱</sup> و تری‌پاد<sup>۲</sup>، تعداد درجات آزادی سامانه حرکتی را به ۹ افزایش داده و نتایج سامانه حرکت‌ساز در قالب منحنی مقایسه‌ای حرکت دورانی حول محور قائم را بر مبنای روش کنترل پیش‌بین در [۵] ارائه نمودند. همین پژوهشگران در [۶] با افزودن مؤلفه‌هایی به مدل حرکت‌ساز برای منظور نمودن حرکت‌های غیرقابل پیش‌بینی راننده، امکان تطبیق شبیه‌ساز با قابلیت راننده خاص را محقق نمودند. در ادامه، نتایج مطالعات خود را به سامانه‌های حرکت‌ساز با قابلیت تنوع بخشی رانندگان مختلف توسعه دادند [۷]. در مرجع [۸] نیز با هدف واقعی‌تر نمودن عملکرد سامانه حرکتی، قابلیت اعمال محدودیت‌های سرعت و حرکت عملگرهای خطی با استفاده از رویکرد کنترل پیش‌بین ارائه شده است. در مقاله مذکور از مدل شبه‌خطی سینماتیک معکوس استفاده شده و الگوریتم به‌صورت زمان واقعی طراحی شده است که نتایج منتشر شده نشان از بهبود عملکرد شبیه‌ساز است [۸]. بدیهی است در رویکردهای زمان واقعی، به‌علت وابستگی گام به گام سامانه حرکت‌ساز به مقادیر آنی متغیرهای حالت توصیف‌کننده پیکربندی سامانه حرکتی و نیز زمان لازم جهت محاسبه میزان حرکت عملگرها، امکان وقفه در عملکرد سامانه حرکتی وجود دارد که رفع مشکل، نیازمند استفاده

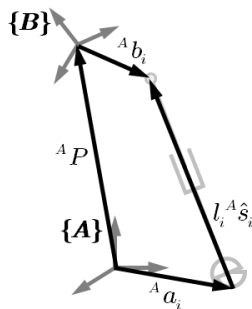
از رویکردهای محاسباتی مناسب و سخت افزار با قدرت محاسباتی بالا است. با وجود کاربرد گسترده سیستم‌های فازی در عرصه‌های مختلف دینامیک و کنترل، مقالات محدود منتشر شده نشان از عدم توسعه اساسی این ابزار محاسباتی هوشمند در عرصه طراحی سامانه‌های حرکت‌ساز می باشد. از جمله کاربردهای سیستم‌های فازی ایستا با طراحی یک‌مرحله‌ای در جبران‌سازی عملکرد سامانه حرکتی با هدف حفظ سامانه در محدوده فضای کاری با استفاده از فیلترهای بهینه، می‌توان به منابع [۱] اشاره نمود.

در کاربرد دیگری از سیستم‌های فازی در حوزه طراحی سامانه‌های حرکت‌ساز، نتایج حاصل از طراحی سامانه حرکت‌ساز ترکیبی فازی بهینه ابتکاری با رویکرد تجمع پزندگان<sup>۳</sup> با هدف تنظیم ضرائب فیلترهای شستشو منتشر شده است [۹]. به‌علت یک‌مرحله‌ای بودن رویکرد مذکور، توسعه روش به کاربردهای زمان واقعی خالی از اشکال نمی‌باشد. نتایج پژوهش حاصل از طراحی سامانه‌های فازی در جبران‌سازی طراحی فیلترهای شستشوی بهینه در مرجع [۱۰] منتشر شده است. در رویکرد اشاره‌شده از سیستم‌های فازی با توابع عضویت<sup>۴</sup> پیش‌فرض برای جبران‌سازی حس حرکتی با حفظ سامانه حرکتی در محدوده فضای کاری استفاده شده است. با توجه به ماهیت سیستم‌های فازی خالص، دستیابی به ساختار مؤثر اشاره‌شده، مستلزم استفاده از روش سعی و خطاست که در توسعه دانش خبره به کاربردهای زمان واقعی با دشواری همراه است. گستره انعطاف‌پذیری و قابلیت‌های سیستم‌های فازی، امکان توسعه کاربرد آن به رویکردهای کارآمدتر زمان واقعی را فراهم می‌سازد. از جمله قابلیت‌های مؤثر سیستم‌های فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ، توانایی تقریب مدل‌های غیرخطی به‌صورت ترکیب فازی از مجموعه مدل‌های خطی فرایند است [۱۱].

در مقاله حاضر روش تدوین حرکت‌ساز فازی مدل پیش‌بین زمان واقعی با استفاده از سیستم‌های فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ در تقریب بخش غیرخطی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی به‌صورت روشمند ارائه و نتایج با مدل حرکت‌ساز مبتنی بر سینماتیک معکوس عمومی سامانه حرکتی مدل پیش‌بین مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها بهبود واضح عملکرد سامانه حرکتی از منظر حرکت‌های محدودتر و هموارتر با زمان محاسباتی کمتر نسبت به رویکرد استفاده از مدل غیرخطی را نشان می‌دهد که دلالت بر قابلیت توسعه بهره‌برداری از شبیه‌ساز در مانورهای

$$\begin{aligned} r_{31} &= -\sin(\phi) \\ r_{32} &= \sin(\phi) \cos(\theta) \\ r_{33} &= \cos(\phi) \cos(\theta) \end{aligned}$$

تحلیل سینماتیک معکوس سکوی استوارت، با فرض معلوم بودن بردار موقعیت  ${}^A P$  و جهت‌گیری سکوی متحرک یعنی ماتریس دوران  ${}^A R_B$ ، بر مبنای تعیین طول آنی متغیرهای مفصلی  $l (= [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6]^T)$  بیان ریاضی مناسب تحلیل سینماتیک معکوس سکوی استوارت از مفهوم حلقه بسته برداری عملگر نمونه در پیکربندی دلخواه حاصل می‌شود [۱۲].



شکل ۲. حلقه بسته برداری عملگر نمونه

مطابق شکل ۲ برای حلقه بسته برداری عملگر نمونه:

$$l_i {}^A \hat{s}_i = {}^A P + {}^A b_i - {}^A a_i = {}^A P + {}^A R_B {}^B b_i - {}^A a_i, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2)$$

که در آن  $a_i$  و  $b_i$  بردارهای مفاصل عملگرها،  $l$  و  $\hat{s}_i$  طول و راستای عملگر خطی و  ${}^A P (= [x \ y \ z]^T)$  موقعیت مبدأ مختصات متحرک  $\{B\}$  هستند. پیش بالانویس  $A$  جهت تاکید بر توصیف کلیه متغیرهای برداری در مختصات ثابت  $\{A\}$  است.

## ۲-۲. نرخ سینماتیک معکوس موقعیت

نرخ ورودی مفصلی مطابق بردار  $\dot{l}_i (= [\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4, \dot{l}_5, \dot{l}_6]^T)$  و بردار خروجی پیچ و تاب  $\dot{q} (= [{}^A \omega^T, {}^A v_p^T]^T)$  شامل سرعت نقطه  $P$  و سرعت زاویه‌ای سکوی متحرک که هر دو در مختصات ثابت  $\{A\}$  بیان می‌شوند توصیف می‌گردند. رابطه نرخ زمانی سینماتیک معکوس از مشتق زمانی رابطه حلقه بسته مکانی ۲ برای هر عملگر حاصل می‌شود:

$${}^A v_p + {}^A \dot{R}_B {}^B b_i + {}^A R_B {}^B \dot{b}_i = \dot{l}_i {}^A \hat{s}_i + l_i {}^A \dot{\hat{s}}_i + {}^A \dot{a}_i \quad (3)$$

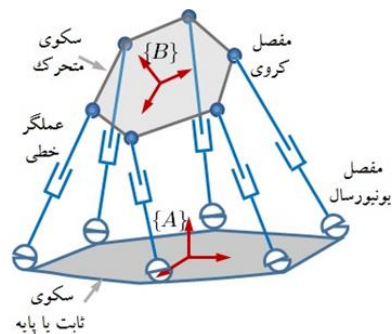
با حذف عبارتهای مشتقات زمانی بردارهای  ${}^B b_i$  و  ${}^A a_i$  با توجه به ثابت بودن آنها در مختصات محلی و استفاده از عملگر پاد متقارن  $\hat{\cdot}$ ، رابطه ۳ به صورت زیر ساده می‌شود [۱۲]:

بزرگتر و پیچیده‌تر است. در این مقاله، نخست سینماتیک معکوس عمومی سامانه حرکت‌ساز استوارت به صورت مختصر ارائه شده و سپس نحوه توصیف سیستم فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ در نمایش سینماتیک معکوس شبیه‌ساز مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه مبنای کنترل مدل پیش‌بین ارائه و در خاتمه عملکرد سامانه حرکت‌ساز مدل پیش‌بین فازی پیشنهادی و مقایسه آن با رویکرد مدل غیرخطی عمومی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. سینماتیک معکوس سامانه حرکتی

### ۲-۱. سینماتیک معکوس موقعیت سامانه حرکتی

سکوی ۶ درجه آزادی استوارت رایج‌ترین سامانه حرکتی در شبیه‌سازهای پرواز است [۱-۲]. مطابق شکل ۱ این سامانه شامل سکوی متحرک (بالایی)، ثابت (پایینی) و شش عملگر خطی است.



شکل ۱. سکوی استوارت با چارچوب الصاق شده بر سکوی ثابت و متحرک

دو سکو توسط عملگرهای خطی از طریق مفاصل کروی و یونیورسال، به هم متصل می‌شوند. با هدف مطالعه سینماتیک سکوی متحرک، چارچوب  $\{A\}$  بر روی سکوی ثابت و مختصات متحرک  $\{B\}$  بر روی سکوی بالایی الصاق شده و جهت‌گیری سکوی متحرک نسبت به سکوی ثابت توسط ماتریس دوران  ${}^A R_B$  توصیف می‌شود [۱۲]. ماتریس دوران با رویکرد استفاده از زوایای اویلر  $(\phi, \theta, \psi)$  مطابق رابطه ۱ است [۱۳].

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos(\psi) \cos(\theta) \\ r_{12} &= \sin(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) - \cos(\phi) \sin(\psi) \\ r_{13} &= \cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi) \\ r_{21} &= \cos(\theta) \sin(\psi) \\ r_{22} &= \sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) + \cos(\phi) \cos(\psi) \\ r_{23} &= \cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \sin(\phi) \cos(\psi) \end{aligned}$$

$u_s (= [\dot{\theta} \ a_x]^T)$  تحقق فضای حالت افزوده سینماتیک معکوس سامانه حرکتی از ترکیب رابطه ۱۱ و معادلات حالت اضافی

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ \dot{x} = u \\ \dot{u} = a_x \end{cases} \quad (12)$$

به صورت ذیل حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_l = A_l x_l + B_l u_s \\ \dot{y}_l = C_l x_l + D_l u_s \end{cases} \quad (13)$$

که در آن  $\theta$ ،  $x$  و  $u$  به ترتیب زاویه شیب، موقعیت و سرعت خطی سکوی متحرک در راستای طولی و ماتریس‌های ضرائب  $A_l$ ،  $B_l$ ،  $C_l$  و  $D_l$  مطابق ۱۴ تعریف می‌شوند. همچنین بردار حالت مدل افزوده شامل طول عملگرها و متغیرهای حالت اضافی به صورت  $x_l = [\theta \ x \ u \ l]^T$  است.

$$A_l = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0_{3 \times 6} \\ 0 & 0 & 1 & 0_{3 \times 6} \\ 0 & 0 & 0 & 0_{3 \times 6} \\ 0_{6 \times 1} & 0_{6 \times 1} & J(:,4)_{6 \times 1} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix}_{9 \times 9}$$

$$B_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ J(:,2)_{6 \times 1} & 0_{6 \times 1} \end{bmatrix}_{9 \times 2} \quad (14)$$

$$C_l = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \\ 0_{6 \times 3} & I_{6 \times 6} \end{bmatrix}$$

$$D_l = [0]_{9 \times 2}$$

### ۳. مبانی تقریب فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ

مطابق شکل مفهومی ۳، ایده اصلی در توصیف کامل دینامیک سیستم غیرخطی در رویکرد تاکاگی - سوگنو - کانگ بر ترکیب مجموعه‌ای از زیرسامانه‌های خطی محلی<sup>۸</sup> استوار است که در آن قواعد فازی متناظر با  $i$  امین زیرسامانه خطی سیستم فازی پیوسته به صورت ۱۵ بیان می‌شود [۱۱].

$$R_i: \text{If } \delta_1 \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } \delta_j \text{ is } M_{ij}, \quad (15)$$

$$\text{THEN } \dot{x}_i(t) = A_i x(t) + B_i u(t),$$

$$i = 1, \dots, r$$

به طوری که  $r$  تعداد سامانه‌های خطی،  $A_i$  ماتریس حالت  $i$  امین زیرسامانه خطی،  $B_i$  ماتریس ورودی،  $x(t)$  بردار حالت کلی،  $u(t)$  بردار ورودی،  $M_{ij}$  مجموعه‌های فازی و  $\delta_i$  بردار برنامه‌ریزی<sup>۹</sup> است. مجموعه‌های فازی  $M_{ij}$  شامل توابع عضویت  $\mu_i$  هستند که هر یک میزان تعلق به یک مجموعه فازی مرتبط را تعیین می‌کنند. متغیرهای برنامه‌ریزی  $\delta_i$  در مقدم عبارت‌های فازی، تعیین‌کننده میزان غیرخطی بودن فرایند هستند که با

$${}^A v_p + {}^A \omega \times {}^A b_i = \dot{i}_i {}^A \hat{s}_i + l_i ({}^A \omega_i \times {}^A \hat{s}_i) \quad (4)$$

که در آن  ${}^A v_p (= [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T)$  سرعت نقطه  $P$  و  ${}^A \omega$  سرعت زاویه‌ای سکوی متحرک در مختصات ثابت  $\{A\}$  است. با استفاده از رابطه جابه‌جایی ضرب داخلی و برداری و ضرب داخلی رابطه ۵ در  ${}^A \hat{s}_i$ ، نرخ تغییر طول عملگر نمونه مطابق ذیل حاصل می‌شود [۱۲]:

$${}^A \hat{s}_i \cdot {}^A v_p + ({}^A b_i \times {}^A \hat{s}_i) {}^A \omega = \dot{i}_i \quad (5)$$

به طوری که  $\dot{i}_i (i = 1, \dots, 6)$  نرخ تغییرات زمانی طول عملگر نمونه،  $\omega$  بردار سرعت زاویه‌ای سکوی متحرک و  ${}^A v_p (= [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T)$  سرعت انتقالی نقطه  $P$  در مختصات  $\{A\}$  است. با حذف پیش بالانویس  $A$  و بازنویسی ۵، ژاکوبین حاصل می‌شود [۱۲-۱۳]:

$$\dot{i} = J_1 [\omega \ v_p]^T \quad (6)$$

که  $v_p$  بردار سرعت سکوی متحرک و  $J_1$  ماتریس ژاکوبین است.

$$J_1 = \begin{bmatrix} (b_1 \times \hat{s}_1)^T & \hat{s}_1^T \\ (b_2 \times \hat{s}_2)^T & \hat{s}_2^T \\ \vdots & \vdots \\ (b_6 \times \hat{s}_6)^T & \hat{s}_6^T \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (7)$$

در توصیف جهت‌گیری سکوی متحرک با زوایای اوایلر، بردار  $\omega$  برحسب نرخ زوایای اوایلر  $(\phi \ \theta \ \psi)$  عبارت است از [۲۱]:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \cos(\theta) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\dot{i} = (J_1 J_2) [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi} \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T \quad (9)$$

که در آن  $\dot{\phi}$ ،  $\dot{\theta}$  و  $\dot{\psi}$  نرخ زوایای اوایلر،  $\dot{x}$ ،  $\dot{y}$ ،  $\dot{z}$  مؤلفه‌های سرعت انتقالی  $P$ ،  $J_1$  مطابق ۷ و  $J_2$  مطابق ذیل تعریف می‌شود [۱۳].

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin(\theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \cos(\theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \cos(\theta) & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

با بازنویسی ۹ در قالب فضای حالت:

$$[\dot{i}] = [0][X] + [J][\dot{X}] \quad (11)$$

که  $X (= [\phi \ \theta \ \psi \ x \ y \ z]^T)$  بردار حالت توصیف پیکربندی سکوی متحرک و  $J (= J_1 J_2)$  ماتریس ژاکوبین سامانه حرکتی هستند. باید توجه داشت که درایه‌های  $J$  تابعی از متغیرهای پیکربندی سکوی متحرک هستند که مطابق ساختار ویژه بردار ورودی سامانه حرکت‌ساز، همواره از طریق بردار ورودی در دسترس هستند. در مانور شیب - انتقالی<sup>۷</sup> با بردار ورودی

و موقعیت طولی  $x$  است. بنابراین تعداد چهار قاعده فازی  $(R1, \dots, R4)$  برای توصیف فرایند اصلی با استفاده از زیرسامانه‌های خطی محلی متناظر با قاعده فازی  $R_i$  مطابق حاصل می‌شود [۱۱].

• R1:

$$\text{If } \theta \text{ is } \mu_{min}^\theta \text{ and } x \text{ is } \mu_{min}^x \quad (21)$$

$$\text{THEN } \dot{x}_1(t) = A_1x(t) + B_1u(t)$$

• R2:

$$\text{If } \theta \text{ is } \mu_{max}^\theta \text{ and } x \text{ is } \mu_{min}^x \quad (22)$$

$$\text{THEN } \dot{x}_2(t) = A_2x(t) + B_2u(t)$$

• R3:

$$\text{If } \theta \text{ is } \mu_{min}^\theta \text{ and } x \text{ is } \mu_{max}^x \quad (23)$$

$$\text{THEN } \dot{x}_3(t) = A_3x(t) + B_3u(t)$$

• R4:

$$\text{If } \theta \text{ is } \mu_{max}^\theta \text{ and } x \text{ is } \mu_{max}^x \quad (24)$$

$$\text{THEN } \dot{x}_4(t) = A_4x(t) + B_4u(t)$$

به طوری که  $A_i$  ها و  $B_i$  ها مطابق رابطه ۱۴ تعریف می‌شوند که در آنها درایه‌های ژاکوبین  $J$  به طور خاص برای مانور شیب - طولی، توابعی از متغیرهای حالت  $x$  و  $\theta$  هستند. توابع عضویت مثلثی  $\mu_{min}^\theta, \mu_{max}^\theta, \mu_{min}^x$  و  $\mu_{max}^x$  به عنوان توابعی از متغیرهای حالت  $x$  و  $\theta$ ، مطابق ذیل تعریف می‌شوند.

$$\mu_{min}^\theta = \begin{cases} \frac{\theta_{max} - \theta}{\theta_{max} - \theta_{min}}, & \theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\mu_{max}^\theta = \mu_{max}(\theta) = 1 - \mu_{min}(\theta)$$

$$\mu_{min}^x = \begin{cases} \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}}, & x_{min} \leq x \leq x_{max} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\mu_{max}^x = \mu_{max}(x) = 1 - \mu_{min}(x) \quad (25)$$

توابع وزن فازی نرمالیزه شده  $\xi_i(\theta, x)$  متناظر با زوج مرتب‌های  $(\theta_{min}, x_{min}), (\theta_{min}, x_{max}), (\theta_{max}, x_{min})$  و  $(\theta_{max}, x_{max})$  به صورت ۲۶ بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned} \xi_1(\theta, x) &= \mu_{min}(\theta)\mu_{min}(x) \\ \xi_2(\theta, x) &= \mu_{min}(\theta)\mu_{max}(x) \\ \xi_3(\theta, x) &= \mu_{max}(\theta)\mu_{min}(x) \\ \xi_4(\theta, x) &= \mu_{max}(\theta)\mu_{max}(x) \end{aligned} \quad (26)$$

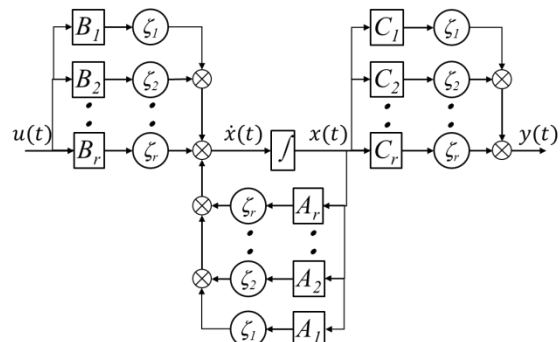
بر این اساس، مدل دینامیکی یکپارچه فازی متناظر ۱۹ و ۲۰، مطابق رابطه ۲۷ بازنویسی می‌شود:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{i=1}^4 \xi_i(\theta, x)[A_i x(t) + B_i u(t)]$$

انتخاب مناسب آنها، امکان توصیف کامل مدل غیرخطی حاصل می‌شود. مدل کامل فازی فرایند از ترکیب وزن دار فازی زیرسامانه‌های خطی محلی متناظر با قاعده فازی  $R_i$  مطابق حاصل می‌شود [۱۱].

$$\dot{x}_i(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_i[\delta(t)][A_i x(t) + B_i u(t)]}{\sum_{i=1}^r \mu_i[\delta(t)]} \quad (16)$$

که وزن‌های  $\mu_i[\delta(t)]$  مقادیر متغیر زمانی در محدوده صفر تا یک بوده و مجموع آنها مقدار مثبتی است.



شکل ۳. ساختار سیستم فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ [۱۱]

$$\sum_{i=1}^r \mu_i[\delta(t)] > 0, \quad (17)$$

$$\mu_i[\delta(t)] \geq 0, \quad \forall i = 1, \dots, r$$

با تعریف تابع وزن نرمالیزه شده  $\xi_i[\delta(t)]$  به صورت

$$\xi_i[\delta(t)] = \frac{\mu_i[\delta(t)]}{\sum_{i=1}^r \mu_i[\delta(t)]} \quad (18)$$

$$0 \leq \xi_i[\delta(t)] \leq 1 \quad \sum_{i=1}^r \xi_i[\delta(t)] = 1$$

و جایگزینی آن با  $\mu_i[\delta(t)]$ ، مدل فازی ۱۶ به صورت ۱۹

بازنویسی

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{i=1}^r \xi_i[\delta(t)][A_i x(t) + B_i u(t)] \quad (19)$$

و در نتیجه مدل فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ فرایند غیرخطی، به صورت ترکیبی فازی از زیرسامانه‌های خطی حاصل می‌شود. همچنین رابطه خروجی تقریب فازی نیز مطابق ۲۰ بیان می‌شود:

$$y(t) = \sum_{i=1}^r \xi_i[\delta(t)][C_i x(t)] \quad (20)$$

### ۳-۱. نرخ سینماتیک معکوس فازی

توصیف مدل فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ سینماتیک معکوس سامانه حرکتی در مانور شیب - طولی، نیازمند بیان قواعد فازی کافی با تالی مدل دینامیکی خطی است. گفتنی است مدل فرایند در مانور شیب - طولی، تابع مقادیر مرزی متغیرهای حالت شیب  $\theta$

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x + g\theta \\ a_y - g\phi \\ a_z - g \end{bmatrix} \quad (30)$$

#### ۴-۱. مدل حس حرکت خطی در مانور شیب-انتقالی

مطابق ۳۰ امکان برپایی سه مدل حس حرکت خطی مستقل برای مانورهای سرج - پیچ<sup>۱۴</sup>، سووی - رول<sup>۱۵</sup> و هیو - یاو<sup>۱۶</sup> فراهم می‌شود. به علت محدودیت ذاتی شبیه‌سازها در شبیه‌سازی حرکت‌های بزرگ واقعی، مدل‌های حس حرکتی مبتنی بر رویکرد حرکت هماهنگ زاویه‌ای<sup>۱۷</sup> و فیلترهای بالا گذر<sup>۱۸</sup> برای فیلترنمودن فرکانس‌های پایین به منظور حفظ سامانه حرکتی در محدوده فضای کاری است. با این تمهید، بخشی از حس حرکت انتقالی از شتاب ثقل بازسازی می‌شود. در این مقاله با هدف معرفی کاربرد سیستم‌های فازی در توسعه روش حرکت‌ساز، بر مانور تک‌کاناله سرج - پیچ (شیب - طولی) تمرکز شده است. دینامیک حسگرهای نیروی مخصوص طولی  $f_x$  با تحریک نیروی مخصوص  $f_x$  توسط سنگ‌های گوش مطابق ذیل است [۲-۱].

$$\hat{f}_x = \frac{k(\tau_a s + 1)}{(\tau_L s + 1)(\tau_s s + 1)} f_x \quad (31)$$

به طوری که  $\tau_s$ ،  $\tau_L$ ،  $\tau_a$  و  $k$  مقادیر عددی معلوم مدل سنگ‌های گوش هستند. با جایگذاری  $f_x$  از رابطه ۳۰، تحقق فضای حالت نیروی مخصوص مطابق ذیل حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_{ot} = A_{ot}x_{ot} + B_{ot}u \\ \hat{f}_x = C_{ot}x_{ot} + D_{ot}u \end{cases} \quad (32)$$

که در آن بردار حالت حسگر نیروی مخصوص،  $u (= [\theta, a_x]^T)$  بردار ورودی و ضرایب  $A_{ot}$ ،  $B_{ot}$ ،  $C_{ot}$  و  $D_{ot}$  مطابق ذیل هستند.

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

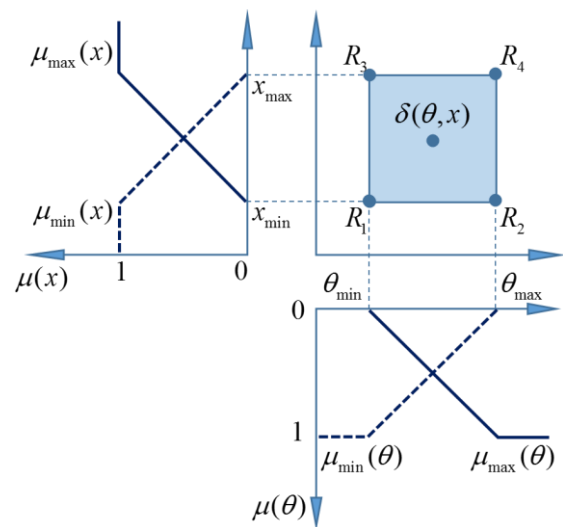
$$B_{ot} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{k\tau_a}{\tau_s \tau_L} \\ \frac{gk\tau_a}{\tau_s \tau_L} & \frac{k}{\tau_s \tau_L} \\ \frac{gk}{\tau_s \tau_L} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{ot} = [1 \quad 0 \quad 0] \quad D_{ot} = [0]$$

همچنین سرعت زاویه‌ای حس شده  $\hat{\omega}$  سرعت زاویه‌ای وسیله حرکتی  $\omega$  (rad/s) توسط کانال‌های نیمه‌مدور عبارت است از [۲-۱]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^4 \xi_i(\theta, x) C_i x(t) \quad (27)$$

توصیف مفهومی از مدل‌سازی فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ سینماتیک معکوس در فضای عملیاتی چهار وجهی مدل دوخطی<sup>۱۹</sup> ۲۷ متناظر با ضرب دکارتی  $\times [\theta_{min}, \theta_{max}]$ ، در شکل ۴ ترسیم شده است. مطابق شکل قواعد فازی چهارگانه ۲۱ الی ۲۴ متناظر با رئوس چهارضلعی بوده و هر یک از وجوه طولی و عرضی نشانگر محدوده تغییرات حداقل و حداکثر زوج متغیر حالت  $x$  و  $\theta$  هستند. توابع عضویت متناظر با هر یک از متغیرها به صورت توابع تعلق شبه‌دورنقهای راست و چپ<sup>۱۱</sup> انتخاب شده‌اند که تشکیل مجموعه فازی کاملی را داده و بدین ترتیب، توصیف کامل مدل مورد نظر تضمین می‌شود [۱۱].



شکل ۴. توصیف فازی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی

#### ۴. مدل حس حرکتی

تشخیص شتاب‌های خطی و زاویه‌ای حرکت سر انسان در مدل حس حرکتی به ترتیب برعهده سنگ‌های گوش<sup>۱۲</sup> و کانال‌های نیمه‌مدور<sup>۱۳</sup> واقع در گوش میانی است. در مدل‌سازی حس حرکت انتقالی، نیروی مخصوص  $f$  (m/s<sup>2</sup>) به صورت ذیل تعریف می‌شود [۲-۱]:

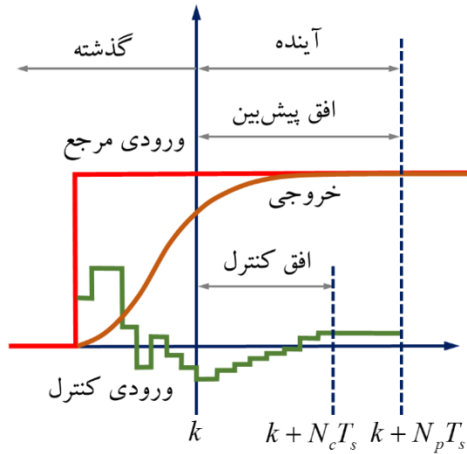
$$f = a - g \quad (28)$$

که در آن انتقال بردار شتاب جاذبه  $g$  به مختصات متحرک با استفاده از رابطه ۱ لازم است.

$${}^B g = {}^B R_A {}^A g = \begin{bmatrix} -g \sin(\theta) \\ g \cos(\theta) \sin(\phi) \\ g \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (29)$$

با فرض حرکت‌های زاویه‌ای کوچک به صورت زیر ساده می‌شود:

حرکت‌ساز مورد اقبال روزافزون قرار گرفته است [۱۵]. در شکل ۵ تصویر مفهومی این روش ترسیم شده است.



شکل ۵. تصویر مفهومی کنترل مدل پیش‌بین

در این رویکرد، خروجی سیستم در طول افق پیش‌بین  $(N_p T_s)$  با اعمال رشته کنترل بهینه در بازه افق کنترل  $(N_c T_s)$ ، بهینه‌سازی می‌شود که در آن  $N_p$  و  $N_c$  به ترتیب تعداد گام افق پیش‌بین و کنترل و  $T_s$  زمان نمونه‌برداری هستند. روش برمبنای کمینه‌سازی تابع هدف بوده و رشته کنترل بهینه در هر زمان نمونه‌برداری، با یک گام به جلوی افق‌های پیش‌بین و کنترل<sup>۳۱</sup> محاسبه می‌شود. مدل گسسته فضای حالت اکیداً سره<sup>۳۲</sup> حرکت‌ساز به صورت ذیل فرض می‌شود [۱۵]:

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (37)$$

$$y(k) = C_m x_m(k)$$

جهت برپایی قابلیت ردیابی انتگرالی کنترل پیش‌بین، متغیر

$\Delta u$  و بردار حالت تفاضلی  $\Delta x_m$  به صورت ذیل تعریف می‌شوند:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (38)$$

$$\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1)$$

با تعریف بردار حالت افزوده سیستم به صورت:

$$x(k) = \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (39)$$

مدل فضای حالت افزوده برحسب متغیرهای جدید عبارت

است از:

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k) \quad (40)$$

$$y(k) = Cx(k)$$

که در آن  $\Delta u(k)$  نمو متغیر کنترل و  $x(k)$  بردار حالت

افزوده است. ضرایب رابطه ۴۱ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\hat{\omega} = \frac{T_L T_a S^2}{(T_L S + 1)(T_s S + 1)(T_a S + 1)} \omega \quad (33)$$

که در آن  $T_a$ ،  $T_L$  و  $T_s$  ثابت‌های زمانی مدل هستند. در توصیف جهت‌گیری سامانه حرکتی با استفاده از زوایای اولیر از معکوس تبدیل ۸ برای زوایای کوچک:

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (34)$$

و جایگذاری در ۳۳ برای مانور شیب - طولی با توجه به مدل فضای حالت کانال نیمه‌مدور عبارت است از:

$$\begin{cases} \dot{x}_{sc} = A_{sc} x_{sc} + B_{sc} u \\ \dot{\theta} = C_{sc} x_{sc} + D_{sc} u \end{cases} \quad (35)$$

که در آن بردار حالت و  $A_{sc}$ ،  $B_{sc}$ ،  $C_{sc}$  و  $D_{sc}$  عبارت‌اند از:

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

$$C_{sc} = [1 \quad 0 \quad 0] \quad D_{sc} = [0]$$

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

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

نمایش روابط ۳۲ و ۳۵ در قالب یک پارچه به نام مدل حس

حرکتی انسان<sup>۱۹</sup>، به صورت رابطه ۳۶ خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{x}_v = A_v x_v + B_v u \\ \dot{y}_v = C_v x_v + D_v u \end{cases} \quad (36)$$

که در آن بردار افزوده حس حرکتی،  $\hat{y}_v$  حرکت حس شده

و  $A_v$ ،  $B_v$ ،  $C_v$  و  $D_v$  ضرایب مدل حس حرکتی افزوده می‌باشند.

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

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

## ۵. مبانی کنترل پیش‌بین

امروزه کنترل پیش‌بین از جمله روش‌های پیشرفته و پرکاربرد محسوب می‌شود. گونه متداول این روش، که به نام کنترل ماتریس دینامیک<sup>۴۰</sup> شناخته می‌شود، برمبنای پاسخ پله فرایند همراه با تابع هدف مرتبه دوم در بازه افق پیش‌بین محدود بنا شده است. نخستین گزارش کاربرد نسخه توسعه‌یافته روش کنترل ماتریس دینامیک با قابلیت مواجهه با محدودسازی ورودی‌ها و خروجی‌ها، در سال ۱۹۸۶ م منتشر شد [۱۴]. این روش با ویژگی ممتاز در مواجهه مؤثر با قيود، سیستم‌های چندورودی - چندخروجی خطی یا غیرخطی یا با بدون تأخیر، به دور از ایجاد پیچیدگی‌های مرسوم، به عنوان روش کنترل عمومی در توسعه سامانه‌های

$$J(\Delta U) = \frac{1}{2} \Delta U^T H \Delta U + 2f \Delta U + g \quad (48)$$

$$H \triangleq 2(\Phi^T Q \Phi + R)$$

$$f \triangleq -\Phi^T Q [Y_{ref} - Fx(k)]$$

$$g \triangleq [Y_{ref} - Fx(k)]^T Q [Y_{ref} - Fx(k)]$$

در رابطه ۴۸،  $H$  و  $f$  ماتریس و بردار تابع هدف مرتبه دوم استاندارد و  $g$  مقدار ثابتی است که در تأثیری در متغیر طراحی  $\Delta U$  ندارد. رابطه ۴۸ به عنوان تابع هدف استاندارد کنترل پیش بین خطی در حالت بی قید دارای پاسخ صریح  $\Delta U = -H^{-1}f$  است. حل مسئله کنترل پیش بین قیددار، به مسئله بهینه سازی مرتبه دوم قیددار تبدیل شده و بازنویسی روابط قیود در مطابقت با مسئله بهینه سازی قیددار مرتبه دوم ضرورت می یابد. برای پیاده سازی قیود مطابق با ساختار بهینه ساز مرتبه دوم، قید روی نرخ تغییرات ورودی کنترلی  $\Delta U$  مطابق ذیل [۱۶]

$$\Delta U_{min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{max} \quad (49)$$

به صورت مجموعه نامعادلات ماتریسی ۵۰ بازنویسی می شود:

$$I \Delta U \leq \Delta U_{max} \quad (50)$$

$$-I \Delta U \leq -\Delta U_{min}$$

با بازنویسی قیود روی ورودی در قالب رابطه ۵۱

$$U_{min} \leq U \leq U_{max} \quad (51)$$

و تعریف ورودی کنترل بر حسب گام قبل به علاوه نرخ افزایش

کنترل

$$U = U_{k-1} + T \Delta U \quad (52)$$

که در آن ماتریس های  $U$ ،  $T$  و  $U_{k-1}$  به صورت زیر می باشند:

$$U = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N_c-1) \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$T = \begin{bmatrix} I & \cdots & 0 & 0 \\ I & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & I & \cdots & I \end{bmatrix} \quad U_{k-1} = \begin{bmatrix} u(k-1) \\ u(k-1) \\ \vdots \\ u(k-1) \end{bmatrix}$$

مجموعه قیود با جایگذاری از ۵۳ در ۵۲ و مرتب کردن آن،

به صورت زیر حاصل می شوند:

$$T \Delta U \leq U_{max} - U_{k-1} \quad (54)$$

$$-T \Delta U \leq -U_{min} + U_{k-1}$$

همچنین با ساماندهی مجموعه قیود خروجی به صورت

$$Y_{min} \leq Y \leq Y_{max} \quad (55)$$

مجموعه قیود خروجی با استفاده از ۴۲ حاصل می شوند [۱۶]:

$$\Phi \Delta U \leq Y_{max} - Fx_k \quad (56)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & I \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \quad C = [0_m \quad I]$$

با تعریف متغیر حالت و خروجی پیش بینی بعد از  $N_p$  زمان نمونه برداری، روابط پیش بینی حالت و خروجی فرایند از ۴۰ به صورت زیر بازنویسی می شوند:

$$x(k+N_p|k) = A^{N_p} x(k) + A^{N_p-1} B \Delta u(k) + A^{N_p-2} B \Delta u(k+1) + \cdots + A^{N_p-N_c} B \Delta u(k+N_c-1) \quad (42)$$

$$y(k+N_p|k) = CA^{N_p} x(k) + CA^{N_p-1} B \Delta u(k) + CA^{N_p-2} B \Delta u(k+1) + \cdots + CA^{N_p-N_c} B \Delta u(k+N_c-1)$$

با تعریف متغیرهای  $\Delta U$  و  $Y$  به صورت

$$Y = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ y(k+2|k) \\ \vdots \\ y(k+N_p|k) \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1) \end{bmatrix}$$

رابطه بین  $Y$ ،  $x$  و  $\Delta U$  به صورت زیر تعریف می شود [۱۵]:

$$Y = Fx(k) + \Phi \Delta U \quad (44)$$

که در آن  $F$  و  $\Phi$  عبارت اند از:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & \cdots & 0 & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1} B & CA^{N_p-2} B & \cdots & CA^{N_p-N_c} B \end{bmatrix} \quad (45)$$

هدف اصلی در کنترل مدل پیش بین، کمینه سازی تابع هدف

ذیل است [۱۶]:

$$J(\Delta U) = (Y_{ref} - Y)^T Q (Y_{ref} - Y) + \Delta U^T R \Delta U \quad (46)$$

که در آن  $Y_{ref}$  بردار خروجی مرجع در گام جاری و

$Q \in R^{N_p \times N_p}$  و  $R \in R^{N_c \times N_c}$  ماتریس های وزن متقارن

نیمه معین خطا و نرخ ورودی اند. با جایگذاری از ۴۶، برای تابع

هدف بهینه سازی بر حسب متغیر طراحی بردار ورودی کنترلی  $\Delta U$

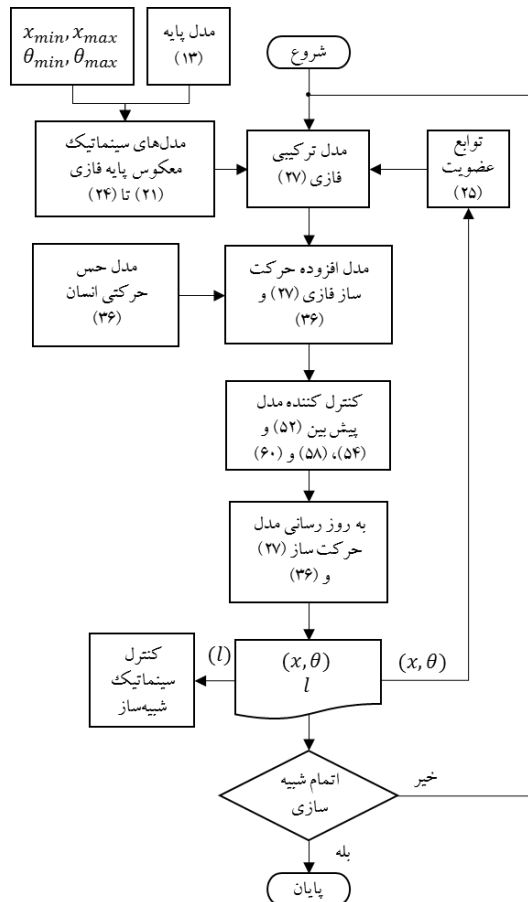
داریم:

$$J(\Delta U) = \Delta U^T (\Phi^T Q \Phi + R) \Delta U - 2\Phi^T Q [Y_{ref} - Fx(k)] \Delta U + [Y_{ref} - Fx(k)]^T Q [Y_{ref} - Fx(k)] \quad (47)$$

رابطه فوق در قالب فشرده، مطابق رابطه ۴۸ است [۱۵]:



به روزرسانی حرکت عملگرها ارسال می‌شود. سامانه حرکتی واکنش مناسب نسبت به تحریک ورودی تحت فرایند کنترل شده تا دریافت نمونه بعدی را انجام می‌دهد.



شکل ۷. چرخه محاسباتی سامانه حرکت ساز مدل پیش بین فازی

## ۶. شبیه سازی و بحث

در این بخش نتایج شبیه سازی مدل حرکت ساز کنترل پیش بین فازی و مقایسه کیفی نتایج با روش حرکت ساز سینماتیک معکوس غیرخطی عمومی ارائه شده است. در شبیه سازی، از حس حرکتی خلبان وسیله نقلیه واقعی به عنوان ورودی های مرجع استفاده شده است. به علاوه دقت لازم در انتخاب مناسب ضرایب وزن  $R$ ،  $Q$  و متغیرهای افق پیش بین  $N_p$  و افق کنترل  $N_c$  به عنوان مؤثرترین پارامترها در دستیابی به مصالحه ای رضایت بخش بین بازتولید با کیفیت حس حرکتی با عنایت به محدودیت زمان محاسباتی در کاربردهای زمان واقعی صورت گرفته است.

### ۶-۱. داده های عددی

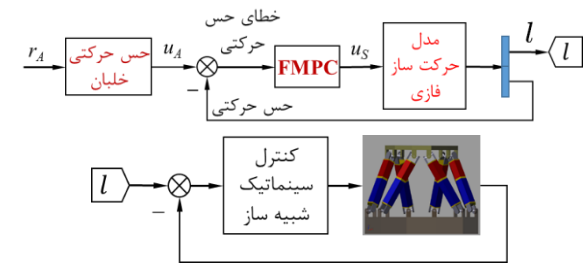
مقادیر عددی حس حرکتی انسان که از مرجع [۲] اقتباس شده اند در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده اند.

$$-\Phi \Delta U \leq -Y_{min} + F x_k$$

که مسئله کنترل پیش بین در قالب مسئله بهینه سازی مرتبه دوم با بردار متغیر طراحی  $\Delta U$  در افق کنترل، از تجمیع روابط ۴۸ و مجموعه نامعادلات خطی ۵۰، ۵۴ و ۵۶ حاصل می شود [۱۶].

## ۵-۱. سامانه حرکت ساز مدل پیش بین فازی

ساختار کلی روش حرکت ساز کنترل پیش بین فازی در شکل ۶ ترسیم شده است.



شکل ۶. ساختار سامانه حرکت ساز کنترل مدل پیش بین فازی

مطابق شکل، روش شامل مدل حس حرکتی انسان، مدل حرکت ساز مرکب از حس حرکتی انسان و مدل فازی سینماتیک سامانه حرکتی و بخش کنترل مدل پیش بین است. با فرض دینامیک ایده آل شبیه ساز، وظیفه بخش کنترل پیش بین فازی (FMPC)، محاسبه دقیق ورودی سامانه حرکت ساز برای ردیابی حس حرکتی خلبان وسیله واقعی است. طول عملگرهای محاسبه شده به عنوان ورودی مرجع به سکوی استوارت ارسال می شود. در این بخش سامانه حرکتی با دریافت ورودی های مرجع، در طی فرایند مدار بسته، حرکت های مناسب برای ایجاد حس حرکتی محاسبه شده را انجام می دهد.

## ۵-۲. چرخه محاسباتی سامانه حرکت ساز مدل پیش بین فازی

چرخه محاسباتی سامانه حرکت ساز مدل پیش بین فازی در شکل ۷ ترسیم شده است. با آغاز محاسبات، تا زمانی که شرط خاتمه شبیه سازی فرانسیده است، مقادیر متغیرهای بیکریندی سکوی متحرک؛ یعنی  $x$  و  $\theta$  برای محاسبه مقادیر توابع عضویت چهارگانه ۲۳ ارسال و مدل حرکت ساز افزوده فازی از ۲۵ و ۳۴ و با استفاده از مدل های پایه ۱۱ محاسبه می شوند. مدل افزوده حاصل در بخش کنترل پیش بین مورد استفاده قرار گرفته و خروجی طول عملگرها به عنوان ورودی مرجع سامانه حرکتی برای

در مطالعه حاضر از مشخصات هندسی و آرایش عملگرها همراه با مختصات الصاق شده بر سکوی ثابت و متحرک مرجع [۱۷] استفاده شده است. تصویر مفهومی نشان‌دهنده اجزای اصلی سامانه حرکتی همراه با چارچوب‌های ثابت و متحرک در شکل ۸ الف و هندسه اتصال عملگرها به سکوی ثابت و متحرک با

مختصات مفاصل  $A_i$  و  $B_i$  که  $(i = 1, \dots, 6)$  در (ب) و (ا) ارائه شده‌اند. مقادیر  $r_a$  و  $r_b$  شعاع‌های سکوی ثابت و متحرک و  $\theta_A$  و  $\theta_B$  نیز زوایای بین مفاصل هستند. آرایش هندسی مفاصل در چارچوب‌های محلی با روابط ۵۷ و ۵۸ توصیف می‌شوند [۱۷].

جدول ۱. پارامترهای مدل حس نیروی مخصوص (طولی) [۵]

| $k$  | $\tau_a$ | $\tau_s$ | $\tau_L$ |
|------|----------|----------|----------|
| ۵/۳۳ | ۰/۶۶     | ۱۳/۲     | ۰/۴      |

جدول ۲. پارامترهای مدل حس حرکت دورانی (شیب) [۵]

| $T_L$ | $T_s$ | $T_a$ |
|-------|-------|-------|
| ۳۰    | ۰/۱   | ۵/۳۳  |

جدول ۳. مقادیر عددی هندسه سکوی استوارت [۱۷]

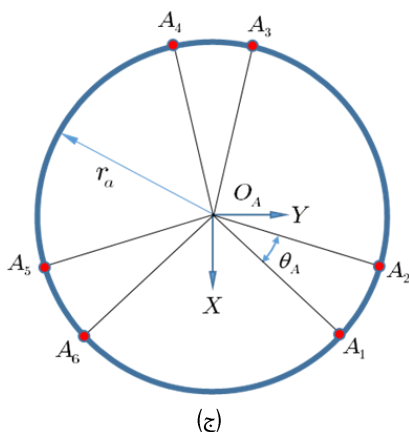
| $z_n$ | $\theta_A$ | $\theta_B$ | $r_a$   | $r_b$   |
|-------|------------|------------|---------|---------|
| (mm)  | (deg)      | (deg)      | (mm)    | (mm)    |
| ۲۵۰   | ۱۴۶/۶۳۳    | ۹۴/۳۴۰     | ۱۶/۴۱۴۵ | ۲۵/۶۸۱۴ |

جدول ۴. مقادیر محدوده تغییرات پارامترهای سامانه حرکت‌ساز

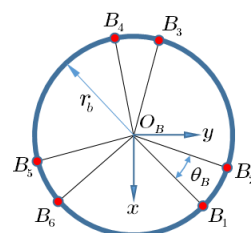
| $\hat{\omega}$ | $\hat{a}_x$ | $\theta$             | $x$           |
|----------------|-------------|----------------------|---------------|
| (deg/s)        | (deg/s)     | (deg)                | (m)           |
| $\pm\infty$    | $\pm\infty$ | $\pm 30$             | $\pm 0.05$    |
| $u$            | $l$         | $\Delta u_{control}$ | $u_{control}$ |
| $0.1 \pm$      | $\pm 0.05$  | $\pm 0.1$            | $\pm 0.05$    |

جدول ۵. مقادیر پارامترهای کنترل پیش‌بین

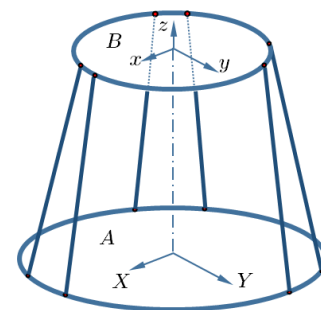
| Q                                   |       |       | R                  |
|-------------------------------------|-------|-------|--------------------|
| $diag([0.2, 0.2, 0.1, \dots, 0.1])$ |       |       | $diag([0.1, 0.1])$ |
| $N_p$                               | $N_c$ | $T_s$ |                    |
|                                     |       | (sec) |                    |
| ۸                                   | ۴     | ۱     |                    |



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۸. اجزای اصلی و چارچوب‌های الصاقی به سامانه حرکتی

نیروی مخصوص برای خلبان وسیله نقلیه واقعی و شبیه‌ساز برای سامانه‌های حرکت‌ساز فازی و غیرخطی، در شکل ۱۱ ترسیم شده است. مطابق شکل قابلیت مؤثر روش پیشنهادی در ردیابی دقیق حس حرکت خلبان واقعی ضمن بهره‌گیری از زاویه شیب (شکل ۱۱ الف) برای جبران‌سازی حس حرکت طولی (شکل ۱۱ ب) به شکل مطلوبی مشاهده می‌شود. اگرچه به علت نقض قید زاویه مطابق شکل (۱۵ ج)، امکان ردیابی ورودی مرجع توسط رویکرد سامانه حرکت‌ساز غیرخطی مقدور نشده است که نشان از برتری حرکت‌ساز فازی دارد.

تغییر طول عملگرهای شماره ۱ تا ۳ برای سامانه‌های حرکت‌ساز فازی و غیرخطی نسبت به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ ترسیم شده‌اند. قیود فیزیکی حد بالا و پایین تغییر طول عملگرها در منحنی‌ها با خطچین قرمز ترسیم شده است. مطابق شکل، در تغییر طول عملگرها در روش حرکت‌ساز فازی (FMPC) در هر سه عملگر نسبت به سامانه غیرخطی عمومی (NMPC) تفاوت قابل ملاحظه‌ای از نظر همواری و میزان حرکت مشاهده می‌شود. باید توجه داشت که اثر نقض قید زاویه در محدوده زمانی بین ۱۰ تا ۱۵ ثانیه در تغییر طول کلیه عملگرها کاملاً مشهود بوده و طول عملگر شماره ۳ در بخشی از مانور به حداقل مقدار مجاز خود می‌رسد. کیفیت حرکت عملگرها در رویکرد حرکت‌ساز (FMPC) به‌وضوح نشان‌دهنده افزایش قابلیت سامانه در مواجهه با مانورهای پیچیده‌تر برای شبیه‌سازها در مقیاس واقعی است. براساس هندسه شبیه‌ساز و با انتخاب محورهای مختصات ثابت و متحرک و مانور شیب - طولی، تقارن بین حرکت عملگرهای شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب با عملگرهای شماره ۴، ۵ و ۶ حفظ می‌شود. بنابراین منحنی حرکت زمانی عملگرهای فوق ارائه نشده‌اند. متغیرهای حالت پیکربندی سامانه حرکتی در مانور مورد نظر یعنی  $x$ ،  $u$  و  $\theta$  در رتبه‌بندی کیفیت روش‌های حرکت‌ساز مورد مطالعه، نقش مؤثری دارند. بدین‌منظور تغییرات زمانی این سه متغیر در شکل ۱۵ ترسیم شده‌اند. مطابق شکل ۱۵ الف، پیش‌بینی حرکت‌های طولی نسبتاً بزرگی برای سکوی متحرک با استفاده از هر دو رویکرد حرکت‌ساز در ابتدای مانور انتظار می‌رود. در ادامه جابه‌جایی طولی سکو ناشی از رویکرد حرکت‌ساز (FMPC) به سمت صفر میل نموده و در طول مانور تقریباً ثابت باقی می‌ماند. در حالی‌که مطابق نتایج شبیه‌سازی، پیش‌بینی جابه‌جایی قابل

$${}^A a_i = \begin{bmatrix} {}^A a_{xi} \\ {}^A a_{yi} \\ {}^A a_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a \cos(\lambda_i) \\ r_a \sin(\lambda_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$\lambda_i = \begin{cases} \frac{(2i-1)\pi}{3} - \frac{\theta_A}{2}, & i = 1,3,5 \\ \lambda_{i-1} + \theta_A, & i = 2,4,6 \end{cases}$$

$${}^B b_i = \begin{bmatrix} {}^B b_{xi} \\ {}^B b_{yi} \\ {}^B b_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_b \cos(v_i) \\ r_b \sin(v_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$v_i = \begin{cases} \frac{(2i-1)\pi}{3} - \frac{\theta_B}{2}, & i = 1,3,5 \\ v_{i-1} + \theta_B, & i = 2,4,6 \end{cases}$$

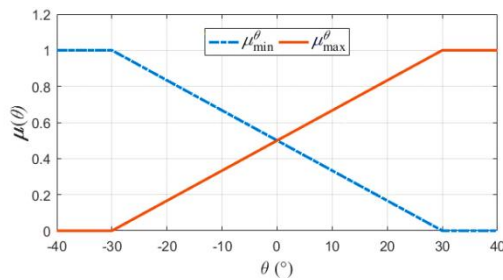
مقادیر عددی هندسه سکوی استوارت در جدول ۳ ذکر شده است. محدوده تغییرات پارامترهای سامانه حرکت‌ساز ناشی از محدودیت‌های فیزیکی سامانه حرکتی، که به‌عنوان قیود در کنترل پیش‌بین وارد می‌شوند، در جدول ۴ و مقادیر ضرائب وزنی، ضرائب افق پیش‌بین و افق کنترل و زمان گسسته‌سازی در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

## ۶-۲. نتایج شبیه‌سازی و بحث

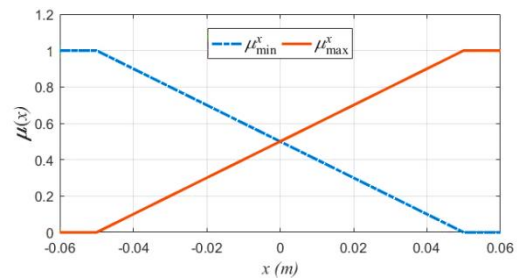
توابع تعلق شبه‌دوژنقه‌ای متناظر با متغیرهای مؤثر  $x$  و  $\theta$  در مانور شیب - طولی، با محدوده پیش‌فرض  $-0.05 \leq x \leq 0.05(m)$  و  $-30^\circ \leq \theta \leq 30^\circ(deg)$  مطابق قید هندسی سامانه حرکتی، در شکل‌های ۹ و ۱۰ ترسیم شده‌اند. با توجه به مجموعه کامل فازی مفروض با همپوشانی با نسبت تقاطع  $0.5$ ، تقریب کامل مدل ترکیبی حاصل می‌شود. به‌منظور نمایش قابلیت سامانه حرکت‌ساز طراحی‌شده در استفاده از حرکت هماهنگ زاویه‌ای در ایجاد حس حرکت انتقالی، نتایج شبیه‌سازی برای مانور نسبتاً پیچیده موج مربعی با دامنه ۴ متر بر مجذور ثانیه در بازه زمانی  $0 \leq t \leq 10(sec)$  و  $-4$  متر بر مجذور ثانیه در بازه زمانی  $10 \leq t \leq 20(sec)$  سپس سرعت ثابت در ورودی نیروی مخصوص و ورودی صفر در کانال سرعت زاویه‌ای شیب مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سامانه حرکت‌ساز پیشنهادی و مقایسه نتایج با مدل غیرخطی عمومی در شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ ارائه شده‌اند. به‌منظور تفکیک منحنی‌ها، از نماد  $(\hat{\quad})$  برای نمایش حس حرکتی خلبان، زیرنویس (A) برای خلبان وسیله واقعی و زیرنویس‌های (ref) برای ورودی مرجع و (FMPC) و (NMPC) نیز به‌ترتیب برای تفکیک منحنی‌های حس حرکت خلبان شبیه‌ساز توسط مدل حرکت‌ساز فازی و مدل غیرخطی استفاده شده است. تغییر زاویه شیب و حس حرکت

از نقض قید زاویه است. براساس منحنی مذکور عملکرد مناسب روش (FMPC) در مقایسه با رویکرد (NMPC) مجدداً تأکیدی بر بهبود قابل توجه عملکرد سامانه حرکتی در استفاده از رویکرد حرکت‌ساز (FMPC) است که سبب حفظ سامانه حرکتی در محدوده فضای کاری با حرکات کیفی بوده و امکان استفاده از آن در مانورهای پیچیده‌تر را افزایش می‌دهد.

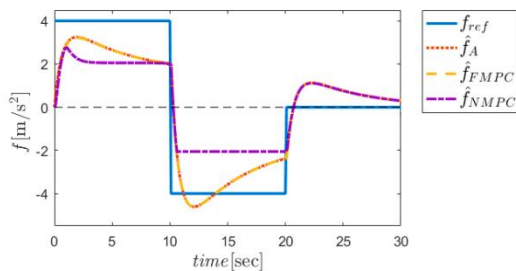
توجه همراه با تغییرات شدید سکوی متحرک در رویکرد سامانه حرکت‌ساز (NMPC) طی مدت زمان تغییرات ورودی نیروی مخصوص وجود دارد. اگرچه سکو در ابتدای مانور، جابه‌جایی مثبتی خواهد داشت، اما سکو عموماً در موقعیت منفی قرار داشته و در بخش ورودی منفی نیروی مخصوص، این جابه‌جایی بزرگتر است. این نحوه عملکرد سامانه حرکت‌ساز (NMPC) به نظر متأثر



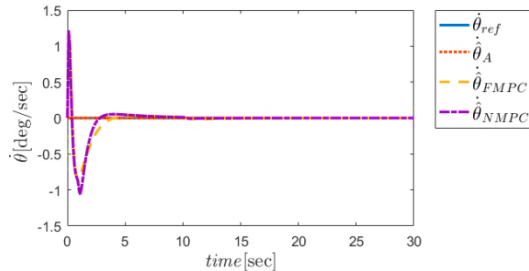
شکل ۱۰. توابع تعلق حداکثر و حداقل متغیر شیب  $\theta$



شکل ۹. توابع تعلق حداکثر و حداقل متغیر طولی  $x$

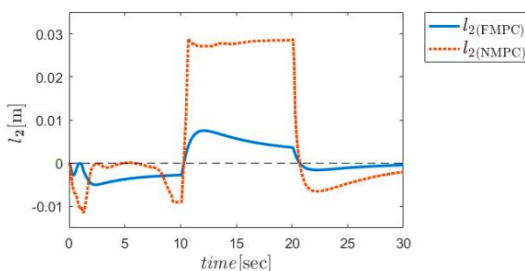


(ب)

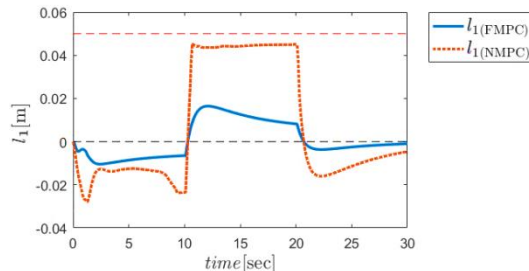


(الف)

شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ای حس حرکت خلبان وسیله واقعی و شبیه‌ساز؛ (الف) سرعت زاویه‌ای، (ب) نیروی مخصوص



شکل ۱۳. تغییر زمانی طول عملگر شماره ۲ به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص



شکل ۱۲. تغییر زمانی طول عملگر شماره ۱ به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص

می‌شود. تغییرات زمانی زاویه شیب  $\theta$  در جبران‌سازی حس حرکت طولی برای هر دو روش همراه با محدوده حداکثر و حداقل این متغیر، در شکل ۱۵ ج ترسیم شده است. مطابق شکل در هر دو روش، تلاش در استفاده از زاویه شیب برای جبران‌سازی حس حرکت انتقالی به‌وضوح مشاهده می‌شود. اگرچه در رویکرد (NMPC) این متغیر در هر دو محدوده تغییرات مثبت و منفی نیروی مخصوص ورودی، به قیود بیشینه و کمینه خود رسیده

سرعت طولی سکوی متحرک  $u$  در طول زمان برای دو رویکرد FMPC و NMPC در شکل ۱۵ ب ترسیم شده‌اند. مطابق شکل تغییرات سرعت قابل توجهی در ابتدای مانور برای رویکرد حرکت‌ساز (FMPC) در مقایسه با (NMPC) مشاهده می‌شود. در ادامه سرعت خطی سکو در رویکرد حرکت‌ساز (NMPC) بر نتیجه رویکرد (FMPC) غلبه پیدا کرده و سرعت انتقالی سکو تقریباً از حوالی ثانیه پنجم در هر دو روش تا انتهای مانور برابر صفر

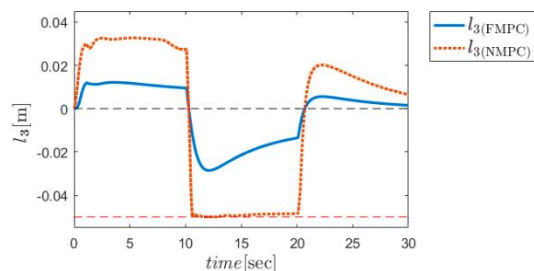
## ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله روش طراحی سامانه حرکت‌ساز زمان واقعی مدل پیش‌بین فازی شبیه‌ساز پرواز ۶ درجه آزادی ارائه شد. در برپایی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی با استفاده از قابلیت سیستم‌های فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ در تقریب مدل دینامیکی غیرخطی که بر پایه ترکیب فازی مجموعه مناسبی از مدل‌های خطی توصیف‌کننده دینامیک سیستم مورد مطالعه استوار است، استفاده شد. برای حل مدل افزوده توصیف‌کننده سینماتیک معکوس فازی سامانه حرکتی همراه با مدل حس حرکتی انسان، از رویکرد کنترل مدل پیش‌بین قیددار زمان واقعی به‌عنوان رویکرد جدید در عرصه طراحی سامانه‌های حرکت‌ساز جهت ردیابی حس حرکتی خلبان وسیله نقلیه واقعی استفاده شد. با هدف نمایش کیفیت عملکرد رویکرد حرکت ساز فازی در جبران‌سازی مناسب حس حرکت طولی با تنظیم هدفمند زاویه شیب، پاسخ سامانه حرکت‌ساز به ورودی‌های مرجع موج مربعی در کانال نیروی مخصوص و زاویه شیب صفر در کانال زاویه شیب، در مانور شیب - طولی ارائه گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه‌ای به‌وضوح نشان از برتری عملکرد رویکرد حرکت‌ساز فازی پیشنهادی در مقایسه با مدل حرکت ساز سینماتیک معکوس غیرخطی زمان واقعی در تأمین حس حرکتی مطلوب همراه با حرکت‌های هموارتر و محدودتر عملگرهای خطی بدون مواجهه با مشکلات محاسباتی با استفاده موثرتر از فضای کاری سامانه حرکتی داشته و نشان‌دهنده قابلیت توسعه روش به کاربردهای واقعی با سامانه‌های حرکتی در مقیاس واقعی است.

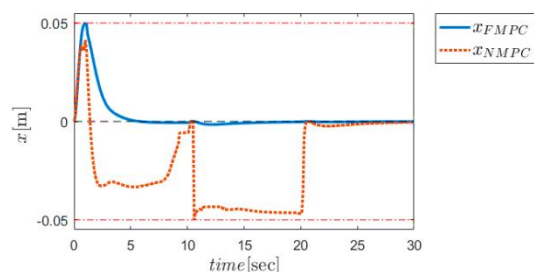
## فهرست علائم و اختصارات

|        |   |
|--------|---|
| $a, b$ | بردار مکان                                |
| $a$    | شتاب انتقالی                              |
| $A, B$ | ماتریس ضرائب فضای حالت                    |
| $C, D$ | ماتریس ضرائب خروجی فضای حالت              |
| $f$    | نیروی مخصوص، بردار تابع هدف کنترل پیش‌بین |
| $F$    | ماتریس حالت مدل پیش‌بین                   |
| $g$    | شتاب جاذبه، مقدار ثابت در کنترل پیش‌بین   |
| $H$    | ماتریس وزن، ماتریس در کنترل مدل پیش‌بین   |
| $I$    | ماتریس همانی                              |
| $J$    | ماتریس ژاکوبین                            |
| $k$    | متغیر سنگ‌های گوش، اندیس شمارش (گسسته)    |
| $l$    | بردار و طول عملگر خطی                     |

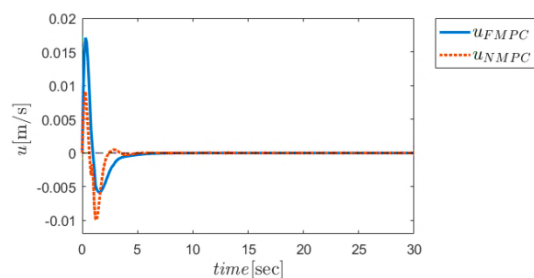
است. البته مطابق انتظار، تغییرات این پارامتر در محدوده پیش فرض مطابق با هندسه سیستم، به‌صورت مؤثر توسط روش کنترل پیش‌بین حفظ شده است. در مقایسه با رویکرد (NMPC)، روش (FMPC) نتیجه بسیار قابل قبولی با حداکثر تغییرات زاویه شیب حدود ۱۰ درجه در بخش شتاب مثبت و حدود ۲۰- درجه در بخش شتاب منفی مشاهده می‌شود که با کاهش نیروی مخصوص به صفر، تغییرات زاویه به صفر میل می‌کند.



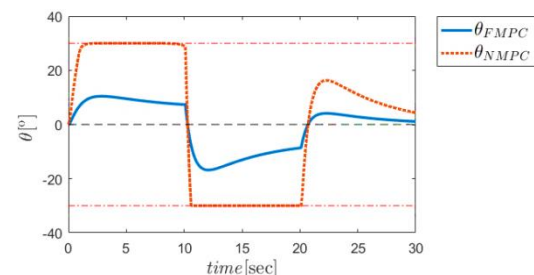
شکل ۱۴. تغییر زمانی طول عملگر شماره ۳ به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۵. تغییر زمانی موقعیت و سرعت طولی و زاویه شیب نسبت به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص

|                                |                          |   |                      |
|--------------------------------|--------------------------|---|----------------------|
| زاویه                          | $v$                      | مجموعه فازی                                 | $M$                  |
| متغیرهای مدل سنگ‌های گوش       | $\tau_a, \tau_l, \tau_s$ | تعداد درایه‌های رشته افق پیش بین، افق کنترل | $N$                  |
| زیرمجموعه                      | $\epsilon$               | بردار مبدأ مختصات متحرک در مختصات ثابت      | $P$                  |
| ماتریس ورودی کنترل مدل پیش بین | $\Phi$                   | ماتریس وزن                                  | $Q$                  |
| هواپیما                        | $A$                      | درایه‌های ماتریس دوران، ورودی مرجع (گسسته)  | $r$                  |
| افق کنترل                      | $c$                      | ماتریس دوران، ماتریس وزن                    | $R$                  |
| اندیس شمارش                    | $i, j$                   | بردار یکه جهت گیری عملگر خطی نمونه          | $s$                  |
| مدل گسسته                      | $m$                      | زمان گسسته $sec$ ، ترانهاده                 | $T$                  |
| سنگ‌های گوش                    | $ot$                     | سرعت انتقالی                                | $u$                  |
| کانال نیمه‌مدور                | $sc$                     | ماتریس تلاش کنترلی (گسسته)                  | $U$                  |
| افق پیش بین                    | $p$                      | حس حرکتی                                    | $v$                  |
| کنترل مدل پیش بین فازی         | $FMPC$                   | مبدأ مختصات متحرک در مختصات اینرسی          | $x, y, z$            |
| کنترل مدل پیش بین غیرخطی       | $NMPC$                   | بردار حالت فضای عملیاتی سامانه حرکتی        | $X$                  |
| نمونه برداری                   | $s$                      | خروجی مدل فضای حالت (گسسته)                 | $y$                  |
| شبه ساز و هواپیما              | $A, S$                   | ماتریس یا بردار صفر                         | $0$                  |
| ورودی مرجع                     | $ref$                    | زوایای اویلر                                | $\phi, \theta, \psi$ |
| ترانهاده                       | $T$                      | سرعت زاویه‌ای                               | $\omega$             |
| نرخ تغییرات زمانی              | $(\dot{\quad})$          | متغیر فضای گفتگو در سیستم فازی              | $\delta$             |
| بردار یکه، مقدار تخمینی        | $(\hat{\quad})$          | تابع تعلق فازی                              | $\mu$                |
| سیستم مختصات                   | $A, B$                   | تابع وزن فازی                               | $\xi$                |
| چارچوب (سیستم مختصات)          | $\{ \quad \}$            | اختلاف                                      | $\Delta$             |
|                                |                          | زاویه                                       | $\lambda$            |

## 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).
- [2] A. Nikranjbar, Motion Cueing Algorithm Design using Model Predictive Control, *Aerosapce Knowledge and Technology Journal*, Vol. 6, No. 2, pp. 8-8, 2017 (in Persian).
- [3] M. Baseggio, A. Beghi, M. Bruschetta, F. Maran, D. Minen, An MPC approach to the design of motion cueing algorithms for driving simulators, 14<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), *IEEE*, 5-7 Oct., pp. 692-697, 2011.
- [4] A. Beghi, M. Bruschetta, F. Maran, D. Minen, A Model-based Motion Cueing strategy for compact driving simulation platforms, Driving Simulation Conference, 6-7 Sep., Paris, France, pp. 1-8, 2012.
- [5] M. Bruschetta, F. Maran, A. Beghi, D. Minen, An MPC Approach to the Design of Motion Cueing Algorithms for a High Performance 9 DOFs Driving Simulator, Driving Simulation Conference, 4-5 Sep., Paris, France, pp. 12.1 - 12.7, 2014.
- [6] F. Maran, M. Bruschetta, A. Beghi, D. Minen, Improvement of an MPC-based Motion Cueing Algorithm with Time-Varying Prediction and Driver Behaviour Estimation, Driving Simulation Conference, 16 -18 Sep., Germany, Europe, pp. 1-8, 2015.
- [7] F. Maran, M. Bruschetta, A. Beghi, Study of a real-time, MPC based motion cueing procedure with time-varying prediction for different classes of drivers, American Control Conference (ACC), 6-8 July, USA, pp. 1711-1716, 2016.

- [8] N. J. Garrett, C. M. Best, Model predictive driving simulator motion cueing algorithm with actuator-based constraints, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 51, No. 8, pp. 1151-1172, 2013.
- [9] K. Fellah, M. Guiatni, Y. Morsly, Fuzzy/PSO Based Washout Filter for Inertial Stimuli Restitution in Flight Simulation, the Seventh International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM, 25-31 Aug. Barcelona Spain, pp. 236-242, 2013.
- [10] H. Asadi, S. Mohamed, S. Nahavandi, Incorporating Human Perception with the Motion Washout Filter Using Fuzzy Logic Control, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20, No. 6, pp. 3276-3284, 2015.
- [11] K. Tanaka, O. H. Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis*, John Wiley & Sons, 2001.
- [12] D. H. Taghirad, *Parallel robots: mechanics and control*, CRC press, 2013.
- [13] K. Harib, K. Srinivasan, Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures, *Robotica*, Vol. 21, No. 5, pp. 541-554, 2003.
- [14] D. J. Currie, Practical Applications of Industrial Optimization: From High-Speed Embedded Controllers to Large Discrete Utility Systems, PhD Thesis, School of Engineering, Auckland University of Technology, New Zealand, 2014.
- [15] L. Wang, *Model predictive control system design and implementation using MATLAB*, Springer Science & Business Media, 2009.
- [16] J. Currie, *JMPC Toolbox*, ver. 3.21, Industrial Information and Control, Auckland University of Technology, New Zealand, September 25, 2014. Available from: <http://www.i2c2.aut.ac.nz/Resources/Software/jMPCToolbox.html> (accessed 1 April 2018).
- [17] Z. Bingul, O. Karahan, *Dynamic Modeling and Simulation of Stewart Platform*, Chapter 2, INTECH Open Access Publisher, pp.19-41, 2012.

پی نوشت

- 
1. Hexapod
  2. Tripod
  3. particle swarm optimization
  4. membership functions
  5. twist vector
  6. skew-symmetric
  7. surge-pitch
  8. locally linearized subsystems
  9. scheduling vector
  10. bilinear
  11. right and left trapezoidal memberships functions
  12. otolith
  13. semicircular canal
  14. surge-pitch
  15. sway-roll
  16. heave-yaw
  17. tilt coordination
  18. high pass filters
  19. human vestibular model
  20. dynamic matrix control (Dmc)
  21. receding horizons
  22. strictly proper
  23. ross-point ratio