

تدوین سامانه حرکت‌ساز زمان واقعی مدل پیش‌بین با استفاده از سینماتیک معکوس سامانه حرکتی

ابولفتح نیک‌رنجبر^۱

دانشکده مکترونیک

دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۰۵)

چکیده

در رویکردهای مرسوم تدوین سامانه‌های حرکت‌ساز، نقش سامانه حرکتی به صورت توصیف ساده‌ای از پیکربندی سامانه حرکتی توسط متغیرهای حالت فضای عملیاتی ظاهر می‌شود. چشم‌پوشی از سینماتیک معکوس غیرخطی سامانه حرکتی به عنوان بخش بنیادین در سامانه‌های حرکت‌ساز فرضی غیرواقعی است که در خصوص نتایج حاصله، گزارشی منتشر نشده است. در این مقاله طراحی روشمند سامانه حرکت‌ساز براساس سینماتیک معکوس غیرخطی سامانه حرکتی ارائه شده است. سامانه حرکت‌ساز مدل پیش‌بین زمان واقعی پیشنهادی، امکان بازتولید دقیق حس حرکتی ضمن محدودسازی موثر حرکت سکوی متحرک در فضای عملیاتی را دارد. در مقام بررسی عملکرد سامانه حرکت‌ساز پیشنهاد شده، از مدل شبه‌خطی سینماتیک معکوس و مدل سینماتیک معکوس با بهره‌های ثابت در حالت خنثی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های مقایسه‌ای، به وضوح نشان از قابلیت برتر رویکرد حرکت‌ساز معرفی شده در بهره‌گیری از فضای عملیاتی سامانه حرکتی با ایجاد حس حرکتی مناسب نسبت به دو روش دیگر بدون مواجه شدن با مشکلات محاسباتی دارد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌ساز پرواز؛ سامانه حرکت‌ساز مدل پیش‌بین؛ سینماتیک معکوس سامانه حرکتی؛ سینماتیک معکوس خطی سکوی

استوارت

Real-time Model Predictive Control Motion Cueing using Motion System Inverse Kinematics

A. Nikranjbar

Faculty of Mechatronics

Islamic Azad University, Karaj Branch

(Received: 06/November/2016 ; Accepted: 24/January/2017)

ABSTRACT

Traditionally, contribution of the motion system in motion cueing algorithm is carried out by a simplistic representation of a set of operational space related state variables. Neglecting the nonlinear inverse kinematics of the motion system as the fundamental part of motion cueing system is an unrealistic simplification with undisclosed consequences. In this paper, the complete motion cueing (MC) potential of the simulator in a more realistic manner is investigated by directly penalizing the general nonlinear inverse kinematics of the motion system. The developed real time model predictive control (MPC) motion cueing strategy enables the faithful reproduction of the perception of motion along with effectively constricting the motions within the limited workspace of the motion system. The partially linearized inverse kinematic model of the motion system specifically developed for the purpose of this study along with the constant coefficient inverse kinematics model at particular so-called neutral state value are employed to examine the performance of the motion cueing based on general nonlinear kinematical model. The results of conducted comparative simulations reveal that nonlinear MPC-based motion cueing algorithm enables more effectively handling the platform workspace while faithfully reproducing the realistic perception of motion with no complicated computational burden.

Keywords: Flight simulator; Model Predictive Motion Cueing; Motion System Inverse Kinematics; Linearized Inverse Kinematics of Stewart mechanism

فهرست علائم و اختصارات

۱- مقدمه

از زمان ورود حرکت در سامانه‌های حرکت‌ساز، تلاش‌های گسترده‌ای برای بهبود کیفیت حس حرکتی صورت گرفته است [۱-۳]. با عنایت به این واقعیت که اصولاً حرکت‌های وسیله نقلیه واقعی خارج از محدوده فضای کاری سامانه حرکتی شبیه‌ساز هستند، تبدیل ورودی‌های حرکت وسیله واقعی به حرکت‌های قابل دستیابی در فضای عملیاتی شبیه‌ساز محرز بوده و این تبدیل یا انتقال اصطلاحاً «سامانه حرکت‌ساز» نامیده می‌شود. وظیفه سامانه حرکت‌ساز، بازتولید بخش مهم حس حرکتی ضمن حفظ حرکت سامانه شبیه‌ساز در فضای کاری آن است. در تدوین اغلب سامانه‌های حرکتی موجود، مشارکت سامانه حرکتی با ساده‌سازی قابل ملاحظه، استفاده از متغیرهای حالت فضای عملیاتی سامانه حرکتی است [۴-۱۰]. البته تاثیر خصوصیات سینماتیک معکوس سامانه حرکتی در کیفیت شبیه‌سازی حس حرکتی انکارناپذیر و ضرورت توسعه کامل سامانه‌های حرکت‌ساز برپایه آن، ضروری است. در همین راستا، علی‌رغم افزایش پیچیدگی تدوین سامانه حرکت‌ساز در رویکرد کاربرد مستقیم از سینماتیک معکوس سامانه حرکتی، برخی مقالات که بیانگر علاقمندی محققین به این موضوع هستند، منتشر شده‌اند [۱۱-۱۳]. در [۱۱] مولفین، نتایج حاصل از مطالعه مقایسه‌ای عملکرد سامانه شبیه‌ساز براساس سینماتیک معکوس سامانه حرکت‌ساز بهینه را منتشر نمودند. نتایج منتشر شده نشان از بهبود عملکرد سامانه حرکت‌ساز در بهره‌گیری مناسب‌تر از فضای کاری سامانه حرکتی برای مدل سینماتیک معکوس سامانه حرکتی در تدوین سامانه حرکت ساز نسبت به روش فیلترهای شستشوی بهینه دارد. اگرچه در پژوهش مذکور از مدل سینماتیک معکوس در نقطه خنثی با فرض جابه‌جایی‌های کوچک سامانه حرکتی با ضرایب ثابت استفاده شده است که در فرض فوق، محل تامل وجود دارد.

مطالعات میدانی مقالات منتشر شده اخیر نشان از تلاش در جهت رفع نقیصه مورد اشاره دارند. با هدف بهبود تقریب سینماتیک معکوس و تلاش در کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی، مدل شبه‌خطی با ضرایب متغیر زمانی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی در مرجع [۱۲] ارائه شده است. مدل افزوده سامانه حرکت‌ساز شامل مدل حس حرکتی انسان همراه با مدل شبه‌خطی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی در تدوین

a, b	بردار مکان، m
a	شتاب انتقالی، m/s^2
A, B	ماتریس ضرایب فضای حالت
C, D	ماتریس ضرایب خروجی فضای حالت
f	نیروی مخصوص، m/s^2
F	ماتریس حالت مدل پیش‌بین
g	شتاب جاذبه، m/s^2
H	ماتریس وزن، کنترل مدل پیش‌بین
I	ماتریس همانی
j	اندیس شمارش (گسسته)
J	ماتریس ژاکوبین
k	متغیر سنگ‌های گوش، اندیس شمارش (گسسته)
l	بردار و طول عملگر خطی، m
M	ماتریس ضرایب قیود، کنترل مدل پیش‌بین
N	تعداد درایه‌های رشته افق پیش‌بین، افق کنترل
P	بردار مکان مبدأ مختصات متحرک در مختصات ثابت
r	درایه‌های ماتریس دوران، ورودی مرجع
R	ماتریس دوران
s	بردار یک جهت‌گیری عملگر خطی نمونه
T_l, T_s, T_a	متغیرهای کانال نیمه مدور گوش
u	بردار ورودی سامانه حرکتی
U	ماتریس تلاش کنترلی (گسسته)
v	سرعت انتقالی، m/s
x, y, z	مختصات مبدأ مختصات متحرک در مختصات اینرسی
y	خروجی مدل فضای حالت (گسسته)
X	بردار حالت فضای عملیاتی سامانه حرکتی
0	ماتریس صفر

علائم یونانی

ψ, θ, ϕ	زوایای اوپلر، rad
ω	سرعت زاویه‌ای، rad/s
τ_l, τ_s, τ_a	متغیرهای مدل سنگ‌های گوش
Δ	اختلاف
ϵ	بردار خطا (گسسته)
Φ	ماتریس ورودی کنترل مدل پیش‌بین
γ	بردار ثابت قیود، کنترل مدل پیش‌بین

زیرنویس

$1, \dots, 6$	اندیس عملگرهای خطی
A	هواپیما
c	افق کنترل
l	عملگر خطی

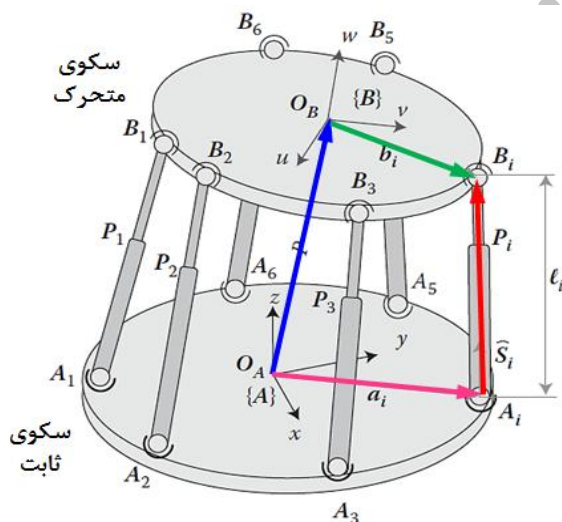
شبه‌خطی استخراج شده برای اهداف این پژوهش، ارائه گردیده است. در ادامه، مبانی کنترل مدل پیش‌بین به اختصار بیان شده است. در خاتمه عملکرد سامانه حرکت ساز مدل پیش‌بین با استفاده از سه مدل سینماتیک معکوس سامانه حرکتی شامل مدل با ضرایب ثابت، مدل شبه‌خطی و مدل عمومی غیرخطی همراه با مدل حس حرکتی انسان ارائه و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- سینماتیک سامانه حرکتی

در این بخش، سینماتیک معکوس موقعیت و سرعت سامانه حرکتی با هدف توسعه سامانه حرکت‌ساز در دست‌یابی مستقیم به حرکت عملگرها ارائه شده است.

۱-۲- سینماتیک معکوس موقعیت

سکوی چندمنظوره، ۶ درجه آزادی استوارت از زمان معرفی در ۱۹۶۵ میلادی، به‌عنوان رایج‌ترین سامانه حرکتی در شبیه‌سازهای پرواز مطرح شده است [۳-۱]. مطابق شکل ۱ سکوی استوارت شامل سکوی متحرک (بالایی)، سکوی ثابت (پایینی) و شش عملگر خطی با مفاصل کروی و یونیورسال است.



شکل (۱): سکوی استوارت همراه با چارچوب الصاق شده بر سکوی ثابت و متحرک [۱۵]

چارچوب $\{A\}$ بر روی سکوی ثابت با مبدأ مختصات در O_A الصاق و نقاط اتصال مفاصل عملگرها به آن با بردار a_i نشان داده شده‌اند. مختصات متحرک $\{B\}$ با مبدأ O_B به سکوی بالایی الصاق و نقاط اتصال مفاصل عملگرها به آن با بردار b_i مشخص شده‌اند. همچنین عملگرها با نماد l و راستای آن‌ها با

سامانه حرکت‌ساز مورد استفاده قرار گرفته است. گفتنی است براساس تحقیقات انجام‌شده، جابه‌جایی‌های زاویه سکوی استوارت بزرگ‌تر از آن است که فرض باقی‌ماندن حرکت‌های سامانه شبیه‌ساز در محدوده خطی، فرض استواری باشد [۶ و ۱۲-۱۱].

بررسی‌ها بیانگر منابع منتشرشده محدود در کاربرد سینماتیک معکوس غیرخطی سامانه حرکتی بدون هیچ دخل و تصرفی دارد. باید توجه نمود که استفاده از روش حل مناسب مدل سامانه حرکت‌ساز حاصل از بهره‌گیری از سینماتیک معکوس عمومی سامانه حرکتی به علت وابستگی مدل به متغیرهای حالت فضای عملیاتی و در نهایت وابستگی به زمان، محرز است. با گسترش روش کنترل مدل پیش‌بین در تدوین روش‌های حرکت‌ساز، آغاز دوره جدیدی برای سامانه‌های حرکت‌ساز در مسیر تکاملی با عبور از رویکردهای سنتی، تطبیقی و بهینه (فیلترهای شستشو)، مشاهده می‌شود. روش کنترل مدل پیش‌بین به عنوان رویکرد جدیدی از کنترل بهینه، به گمان گزینه حل مناسبی در تدوین سامانه‌های حرکت‌ساز به علت قابلیت‌های ذاتی آن در مواجهه با قیود، فرآیندهای خطی، غیرخطی و چند ورودی - چند خروجی است [۱۴]. کاربرد موثری از سامانه حرکت‌ساز مدل پیش‌بین زمان حقیقی مدل پیش‌بین براساس مدل شبه‌خطی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی در مرجع [۱۲] ارائه شده است. اگرچه مطالعه مقایسه‌ای نشان‌دهنده کاهش کیفیت روش به علت فرض خطی‌سازی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی گزارش نشده است.

در این مقاله، تدوین روشمند سامانه حرکت‌ساز مدل پیش‌بین زمان حقیقی با استفاده از سینماتیک معکوس عمومی غیرخطی سامانه حرکتی ارائه شده است. عملکرد کارآمد و بدون محدودیت روش حرکت‌ساز پیشنهادی در بهره‌گیری از سینماتیک معکوس مختلف سه‌گانه غیرخطی، شبه‌خطی و با ضرایب ثابت در شرایط زمان واقعی^۱ ارائه گردیده است. به‌طور خاص، قابلیت موثر روش سامانه حرکت‌ساز پیشنهادی در حفظ حرکت سکوی متحرک در فضای عملیاتی شبیه‌ساز با مناسب‌ترین حرکت‌های عملگرها ضمن ایجاد حس حرکتی دقیق ارائه گردید. در مقاله حاضر، ابتدا سینماتیک معکوس عمومی سکوی استوارت به‌طور خلاصه ارائه شده و سپس مدل

۲-۲- سینماتیک مستقیم موقعیت

حسب نیاز به پارامترهای فضای عملیاتی، حل مجموعه معادلات «سینماتیک مستقیم»^۲ مطابق روابط (۳) که حاصل از ضرب داخلی رابطه (۲) در خودش است، ضروری است:

$$l_i = [A^P T A^P + B^B b_i^T B^B b_i + A^A a_i^T A^A a_i - 2 A^P T A^A a_i + 2 A^P T (A^R B^B b_i) - 2 (A^R B^B b_i)^T A^A a_i]^{1/2} \quad (3)$$

روش مبتنی بر تعیین بردار موقعیت مبدأ مختصات متحرک یا بدنی سکوی متحرک یعنی A^P و جهت گیری آن $A^R B$ با فرض در اختیار داشتن بردار طول عملگرهای خطی $l (= [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6]^T)$ است. به علت ساختار کاملاً غیرخطی روابط (۳)، حل تحلیلی آنها ممکن نیست [۱۵-۱۶].

به علت نیاز به محاسبه متغیرهای توصیف کننده پیکربندی سکوی متحرک در بخش‌هایی از رویکردهای موردنظر پژوهش، از شبیه‌ساز شبکه عصبی برای تقریب دقیق سینماتیک مستقیم سامانه حرکتی و تعیین این متغیرها، استفاده شده است که جزئیات لازم در ادامه گزارش ارائه شده است. لازم به توضیح است که بردار توصیف پیکربندی سکوی متحرک در فضای کارترین با احتساب مختصات چارچوب متحرک مطابق بردار $[x \ y \ z]^T$ و جهت گیری آن مطابق مجموعه زوایای اوپلر $[\phi \ \theta \ \psi]^T$ ، به صورت $[\phi \ \theta \ \psi \ x \ y \ z]^T$ تعریف می‌شود که طول متناظر عملگرها مطابق رابطه (۳) به مقادیر متغیرهای بردار فوق بستگی دارد.

۲-۳- سینماتیک معکوس سرعت

نرخ ورودی مفصلی مطابق بردار $l_i (= [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6]^T)$ و بردار خروجی «پیچ و تاب»^۳ $\dot{q} (= [A^A \omega^T, A^P v_p^T]^T)$ 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:

$$A^P v_p + A^R B^B b_i + A^R B^B \dot{b}_i = \dot{l}_i A^A \hat{s}_i + l_i A^A \dot{\hat{s}}_i + A^A \dot{a}_i \quad (4)$$

با حذف عبارتهای مشتقات زمانی بردارهای $A^A a_i$ و $B^B b_i$ توجه به ثابت بودن آنها در مختصات محلی و استفاده از عملگر یاد متقارن، رابطه (۴) به صورت ذیل ساده می‌شود [۱۵]:

$$A^P v_p + A^A \omega \times A^A b_i = \dot{l}_i A^A \hat{s}_i + l_i (A^A \omega_i \times A^A \hat{s}_i) \quad (5)$$

بردار یک \hat{s}_i توصیف شده‌اند. موقعیت نقطه O_B سکوی متحرک با بردار پیش بالانویس بیان شده در مختصات ثابت یعنی $A^P (= [x \ y \ z]^T)$ و جهت گیری آن با ماتریس دوران $A^R B$ توصیف می‌شوند. ماتریس دوران با رویکرد استفاده از زوایای اوپلر $(\phi \ \theta \ \psi)$ مطابق رابطه (۱) است [۱۵]:

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

که در آن، درایه‌های ماتریس دوران $r_{i,j}, i, j = 1, \dots, 3$ عبارتند از:

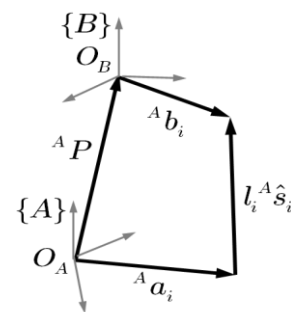
$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos(\psi) \cos(\theta) \\ r_{12} &= \sin(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) - \cos(\phi) \sin(\psi) \\ r_{13} &= \cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi) \\ r_{21} &= \cos(\theta) \sin(\psi) \\ r_{22} &= \sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) + \cos(\phi) \cos(\psi)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

در تحلیل سینماتیک معکوس سکوی استوارت، با فرض معلوم بودن بردار موقعیت و جهت گیری سکوی متحرک یعنی ماتریس دوران $A^R B$ ، هدف تعیین متغیرهای مفصلی $l (= [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6]^T)$ مطابق شکل ۲، برای «حلقه بسته برداری» عملگر نمونه می‌توان نوشت:

$$l_i A^A \hat{s}_i = A^P + A^A b_i - A^A a_i \quad (2)$$

$$= A^P + A^R B^B b_i - A^A a_i, \quad i = 1, \dots, 6$$

که در آن، $A^A \hat{s}_i$ بردار یک هر عملگر در چارچوب ثابت $\{A\}$ است.



شکل (۲): حلقه بسته برداری عملگر نمونه

برای اهداف مورد نظر مقاله حاضر، بازنویسی (۱۰) در قالب فضای حالت ضرورت دارد. بدین منظور، قیود سینماتیک معکوس سامانه حرکتی (۱۰) را می توان به صورت مدل فضای حالت (۱۲) بازنویسی نمود:

$$\dot{l} = [0][X] + [J][\dot{X}] \quad (12)$$

باید توجه داشت که J ماتریس با درایه های وابسته به متغیرهای حالت است. با عنایت به ساختار ویژه بردار ورودی سامانه حرکت ساز، متغیرهای فضای حالت از طریق بردار ورودی در دسترس هستند. به طور نمونه برای مانور «شیب- طولی»^۱ با بردار ورودی $u_s (= [\omega \quad a_x]^T)$ که در آن، ω نرخ زاویه شیب و a_x شتاب انتقالی است، فرمول بندی متنوعی برای بخش سینماتیک معکوس سامانه حرکتی براساس رابطه (۱۲) امکان پذیر است. بدین منظور، در اولین فرمول بندی با تعریف معادله حالت اضافی (۱۳)، می توان ماتریس ژاکوبین در (۱۲) را به دو بخش متناظر با سرعت انتقالی و سرعت زاویه ای تفکیک نمود:

$$\dot{u} = a_x \quad (13)$$

تحقق فضای حالت افزوده حاصل از ترکیب روابط (۱۳-۱۲) در قالب (۱۴) خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{x}_l = A_l x_l + B_l u_s \\ \dot{y}_l = C_l x_l + D_l u_s \end{cases} \quad (14)$$

که در آن، ماتریس های ضرایب A_l, B_l, C_l, D_l مطابق ذیل هستند:

$$\begin{aligned} A_l &= \begin{bmatrix} 0 & 0_{1 \times 6} \\ J(:,4)_{6 \times 1} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix}_{7 \times 7} \quad (15) \\ B_l &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ J(:,2)_{6 \times 1} & 0_{6 \times 1} \end{bmatrix}_{7 \times 2} \\ C_l &= \begin{bmatrix} 0 & 0_{1 \times 6} \\ 0_{6 \times 1} & I_{6 \times 6} \end{bmatrix}_{7 \times 7} \\ D_l &= [0]_{7 \times 2} \end{aligned}$$

بردار حالت $x_l = [u \quad l]^T$ شامل طول عملگرهای خطی و متغیر حالت اضافی u که سرعت خطی سکوی متحرک در راستای x است، می باشد. دومین فرمول بندی با تعریف دو متغیر حالت اضافی دیگر علاوه بر رابطه (۱۳) مطابق ذیل حاصل می شود:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \\ \dot{u} = a_x \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (16)$$

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

$${}^A \hat{s}_i \cdot {}^A v_p + ({}^A b_i \times {}^A \hat{s}_i) \cdot {}^A \omega = \dot{l}_i \quad (6)$$

با حذف پیش بالانویس A برای سادگی و مرتب کردن رابطه (۶) در قالب ماتریسی، بیان کلی ژاکوبین ارتباط دهنده نرخ زمانی مختصات مفصلی با مختصات فضای عملیاتی مطابق (۷) حاصل می شود:

$$\dot{l} = J_1 \dot{q} = J_1 \begin{bmatrix} \omega \\ v_p \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

که در آن، ماتریس ژاکوبین J_1 ماتریس مربعی 6×6 به صورت (۸) است:

$$J_1 = \begin{bmatrix} (b_1 \times \hat{s}_1)^T & \hat{s}_1^T \\ (b_2 \times \hat{s}_2)^T & \hat{s}_2^T \\ \vdots & \vdots \\ (b_6 \times \hat{s}_6)^T & \hat{s}_6^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

به جهت ضرورت استفاده از زوایای اوپلر در توصیف جهت گیری، بازنویسی بردار سرعت زاویه ای $\omega (= [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T)$ بر حسب نرخ تغییرات زوایای اوپلر $[\dot{\phi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}]^T$ لازم است. بدین منظور با مشتق زمانی از ${}^A R_B$ از رابطه (۱) و استفاده از عملگر پاد متقارن [۱۶]، مولفه های بردار سرعت زاویه ای بر حسب نرخ زوایای اوپلر مطابق رابطه (۹) خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \cos(\theta) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

با جایگذاری از رابطه (۹) در رابطه (۷) و مرتب کردن آن، رابطه نرخ زمانی سینماتیک معکوس بر حسب زوایای اوپلر حاصل می شود:

$$\dot{l} = (J_1 J_2) [\dot{\phi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi} \quad \dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]^T \quad (10)$$

که در آن، $\dot{\phi}$ ، $\dot{\theta}$ ، و $\dot{\psi}$ نرخ زوایای اوپلر، \dot{x} ، \dot{y} و \dot{z} مولفه های سرعت انتقالی نقطه P ، J_1 مطابق رابطه (۸) و J_2 مطابق ماتریس ذیل تعریف می شود:

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\tilde{b}_i = \begin{bmatrix} 0 & b_{zi} & -b_{yi} & 1 & 0 & 0 \\ -b_{zi} & 0 & b_{xi} & 0 & 1 & 0 \\ b_{yi} & -b_{xi} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

طول هر عملگر از ضرب داخلی رابطه (۲۰) در خود آن محاسبه می‌شود.

$$l_i = (X^T \tilde{b}_i^T \tilde{b}_i X + X^T \tilde{b}_i^T \tilde{d}_i + \tilde{d}_i^T \tilde{b}_i X + \tilde{d}_i^T \tilde{d}_i)^{0.5} \quad (22)$$

رابطه (۲۲) در قالب فشرده‌تر با تعریف متغیرهای تابع پارامترهای عملگرهای $\tilde{H}_i (= [\tilde{b}_i^T \tilde{d}_i])$ ، $\tilde{B}_i (= [\tilde{b}_i^T \tilde{b}_i])$ ، $\tilde{K}_i (= [\tilde{d}_i^T \tilde{b}_i])$ و $\tilde{M}_i (= [\tilde{d}_i^T \tilde{d}_i])$ به صورت (۲۳) می‌شود:

$$l_i = (X^T \tilde{B}_i X + X^T \tilde{H}_i + \tilde{K}_i X + \tilde{M}_i)^{0.5} \quad (23)$$

طول عملگر l_i کماکان به صورت غیرخطی و تابعی از بردار حالت X است. بازنویسی (۲۳) به صورت فضای حالت خطی ضروری است که این امر با بسط تیلور آن حول بردار حالت نمونه X_0 و صرف نظر از عبارت‌های غیرخطی به دست می‌آید.

$$l_i(X) = l_i(X_0) + \frac{1}{4l_i(X_0)} (2X_0^T \tilde{B}_i + \tilde{H}_i^T + \tilde{K}_i)(X - X_0) \quad (24)$$

بیان (۲۴) را می‌توان به صورت فشرده‌تر زیر نوشت:

$$\Delta l_i(X) = C_i \Delta X \quad (25)$$

که در آن:

$$\Delta l_i(X) = l_i(X) - l_i(X_0) \quad (26)$$

$$\Delta X = X - X_0$$

$$C_i = \frac{1}{4l_i(X_0)} (2X_0^T \tilde{B}_i + \tilde{H}_i^T + \tilde{K}_i)$$

با بازنویسی رابطه (۲۶) برای کلیه طول عملگرها $\Delta l_i, i = 1, 2, \dots, 6$ ، مدل فضای حالت خطی سینماتیک معکوس حول نقطه کارکرد نمونه X_0 مطابق (۲۷) حاصل می‌شود:

$$\Delta l(X) = C \Delta X \quad (27)$$

که در آن، C ماتریس ضرایب حقیقی 6×6 وابسته به هندسه عملگرها مدل سینماتیک خطی‌سازی شده معکوس سامانه حرکتی است. نرخ تغییرات زمانی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی از مشتق زمانی رابطه (۲۸) مطابق ذیل حاصل می‌شود:

$$\Delta \dot{l}(X) = C \Delta \dot{X} \quad (28)$$

ضمن یادآوری حرکت عملگر حول نقطه کارکرد X_0 در (۲۸)، می‌توان از علامت Δ در رابطه فوق برای سادگی

در این حالت، ماتریس‌های ضرایب فضای حالت مدل افزوده سینماتیک معکوس مرکب از روابط (۱۲) و (۱۶) مطابق ذیل می‌باشند:

$$A_l = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0_{3 \times 6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0_{6 \times 1} & 0_{6 \times 1} & J(:,4)_{6 \times 1} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (17)$$

$$B_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_l = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \\ 0_{6 \times 3} & I_{6 \times 6} \end{bmatrix}_{9 \times 9}$$

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

بردار حالت مدل افزوده دوم شامل طول عملگرها و متغیرهای حالت اضافی بصورت $x_l = [x \ u \ \theta \ l]^T$ است.

۲-۴- خطی‌سازی سینماتیک معکوس در زوایای کوچک

به علت حرکت‌های نسبتاً کوچک زاویه‌ای سامانه حرکتی در مانورهای ساده و متداول، فرمول‌بندی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی خطی‌سازی شده فرضی نسبتاً منطقی است. در برپایی مدل خطی سامانه حرکت‌ساز با مشارکت طول عملگرها، بیان رابطه غیرخطی (۲) به صورت خطی ضرورت دارد. منشأ اصلی رفتار غیرخطی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی ناشی از ماتریس دوران (۱) است که با فرض حرکت‌های زاویه‌ای کوچک، به صورت ساده‌شده (۱۸) بیان می‌شود:

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} 1 & -\psi & \theta \\ \psi & 1 & -\phi \\ -\theta & \phi & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

بدین ترتیب، مدل سینماتیک معکوس خطی‌سازی شده عملگر i ام مطابق رابطه (۱۹) خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} l_{xi} \\ l_{yi} \\ l_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -\psi & \theta \\ \psi & 1 & -\phi \\ -\theta & \phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{xi} \\ b_{yi} \\ b_{zi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{xi} \\ a_{yi} \\ a_{zi} \end{bmatrix} \quad (19)$$

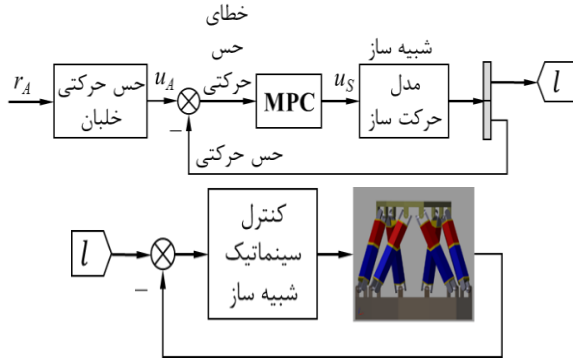
رابطه (۱۹) را می‌توان به صورت فشرده ماتریسی (۲۰) نمود:

$$\vec{l}_i = \tilde{b}_i X + \tilde{d}_i \quad (20)$$

که در آن، $X (= [\phi \ \theta \ \psi \ x \ y \ z]^T)$ بردار حالت سامانه حرکتی و \tilde{b}_i, \tilde{d}_i مطابق ذیل تعریف می‌شوند:

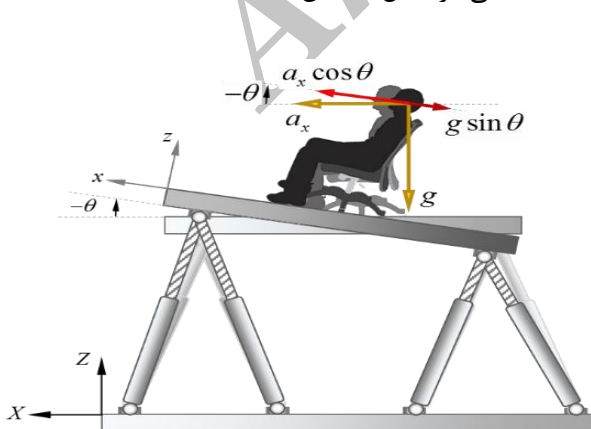
$$\tilde{d}_i = \begin{bmatrix} b_{xi} - a_{xi} \\ b_{yi} - a_{yi} \\ b_{zi} - a_{zi} \end{bmatrix} \quad \tilde{b}_i = \begin{bmatrix} l_{xi} \\ l_{yi} \\ l_{zi} \end{bmatrix} \quad (21)$$

دینامیک ایده آل شبیه ساز، وظیفه بخش کنترل پیش بین تامین سرعت زاویه ای و شتاب خطی (نیروی مخصوص) مناسب برای ردیابی حس حرکتی خلبان وسیله واقعی یا u_A است.



شکل (۳): ساختار حرکت ساز کنترل مدل پیش بین

تامین حرکت «همانگ زاویه ای» در ایجاد حس حرکت طولی (شتاب دار)، مهمترین وظیفه مدل حرکت ساز در شبیه سازهای دینامیک است. با توجه به ضعف سنگ های گوش داخلی که قادر به تمیز دادن نیروی جاذبه از نیروی (شتاب) طولی نیستند [۱۴] از دوران غیر صفر شیب به منظور تحریک حس حرکتی خلبان شبیه ساز و ایجاد احساس غیر واقعی از حرکت (شتاب) طولی را استفاده می شود. حس حرکتی همانگ ناشی از حرکت زاویه ای در تامین حرکت های طولی فرکانس پایین شبیه ساز با حذف حرکت بزرگ حالت دایم به منظور حفظ حرکت سامانه در فضای کاری آن، از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار است که به آن «سامانه حرکت ساز» اطلاق می شود. شکل مفهومی از حرکت همانگ زاویه ای در مانور شیب- انتقالی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): تصویر مفهومی از حرکت همانگ زاویه ای در مانور شیب- انتقالی

صرف نظر نمود. ماتریس ضرایب مدل افزوده فضای حالت خطی سامانه حرکتی شامل متغیرهای اضافی رابطه (۱۶) با رابطه (۲۸) مطابق ذیل خواهد بود:

$$A_l = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0_{3 \times 6} \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & \\ 0_{6 \times 1} & 0_{6 \times 1} & (K_u)_{6 \times 1} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (29)$$

$$B_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ (K_\omega)_{6 \times 1} & 0_{6 \times 1} \end{bmatrix}_{9 \times 2}$$

$$C_l = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \\ 0_{6 \times 3} & I_{6 \times 6} \end{bmatrix}_{9 \times 9}$$

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

که در آن، بردارهای وابسته متغیرهای حالت K_ω و K_u به صورت (۳۰) تعریف می شوند:

$$K_u = \left[\frac{1}{l_i} k_{u_i} \right]^T, i = 1, \dots, 6 \quad (30)$$

$$K_\omega = \left[\frac{1}{l_i} k_{\omega_i} \right]^T, i = 1, \dots, 6$$

که درایه های وابسته به متغیرهای حالت k_{ω_i} و k_{u_i} در حالت مانور «شیب- طولی» به صورت زیر می باشند:

$$k_{u_i} = x - a_{x_i} + b_{x_i} + \theta b_{z_i}$$

$$k_{\omega_i} = x b_{z_i} - a_{x_i} b_{z_i} + a_{z_i} b_{x_i} - b_{x_i} z_n + \theta (b_{x_i}^2 + b_{z_i}^2)$$

۳- سامانه حرکت ساز مدل پیش بین

از منظر الگوریتم حرکت ساز، روش حرکت ساز مدل پیش بین به مفهوم تعیین نگاشت از فضای حس حرکت واقعی u_A به ورودی شبیه ساز u_S با هدف ردیابی دقیق حس حرکتی خلبان وسیله واقعی، توسط خلبان شبیه ساز براساس روش کنترل پیش بین است. الزام محدودسازی حداکثری حرکت های ورودی واقعی در فضای کار محدود شبیه ساز کاملاً محرز است. ساختار پایه روش حرکت ساز کنترل پیش بین در شکل ۳ ترسیم شده است.

مطابق شکل، الگوریتم شامل مدل حس حرکتی انسان، دینامیک شبیه ساز، مدل حرکت ساز شامل حس حرکتی انسان و سینماتیک سامانه حرکتی و بخش کنترل مدل پیش بین است که در قالب سیستم مدار بسته ترسیم شده است. با فرض

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

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

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

سرعت زاویه‌ای حس شده $\hat{\theta}$ در ارتباط با سرعت زاویه‌ای وسیله حرکتی θ که توسط «کانال‌های نیمه مدور» مطابق رفتار دینامیکی مطابق رابطه (۳۴) حس می‌شود [۵]:

$$\hat{\theta} = \frac{T_L T_a s^2}{(T_L s + 1)(T_s s + 1)(T_a s + 1)} \theta \quad (34)$$

که در آن، T_s و T_L ، T_a ، ثابت‌های زمانی مدل هستند.

مدل فضای حالت «کانال‌های نیمه مدور» به صورت فشرده (۳۵) بیان می‌شود:

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

که در آن، بردار حالت کانال‌های نیمه مدور بوده و

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

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

و T_0 ، T_1 ، T_2 و T_3 مطابق ذیل تعریف می‌شوند:

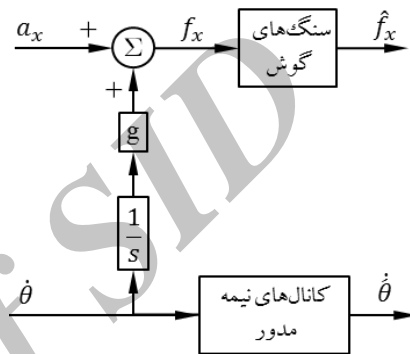
$$T_0 = \frac{1}{T_L T_s T_a} \quad T_1 = \frac{T_L + T_s + T_a}{T_L T_s T_a}$$

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

نمایش روابط (۳۳) و (۳۵) در قالب یک پارچه که به نام مدل «حس حرکتی انسان» نامیده می‌شود به صورت رابطه (۳۶) خواهد بود:

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

در شکل ۵ نقش حرکت زاویه‌ای شیب در جبران‌سازی حس حرکتی طولی ترسیم شده است که در آن $\hat{\theta}$ و f_x نیروی مخصوص و سرعت زاویه‌ای حس شده توسط خلبان و θ و a_x ورودی‌های وسیله یعنی شتاب طولی و سرعت زاویه‌ای شیب هستند. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود برای مانور شیب- طولی، در کانال نیروی مخصوص برای ایجاد حس حرکت طولی از ویژگی حرکت هماهنگ زاویه‌ای استفاده می‌شود.



شکل (۵): مدل حس حرکتی انسان تحت حرکت انتقالی طولی و حرکت زاویه‌ای شیب.

مطابق شکل ۵، مدل دینامیک حسگرهای نیروی مخصوص f_x با تحریک (ورودی) نیروی مخصوص، توسط «سنگ‌های گوش» مطابق رابطه (۳۱) بیان می‌شود [۵]:

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

که در آن، τ_s ، τ_L ، τ_a و k مقادیر عددی معلوم مدل سنگ‌های گوش هستند. نیروی مخصوص در مرکز سکوی متحرک با توجه به مشارکت حرکت هماهنگ زاویه‌ای شیب مطابق شکل (۵) به صورت رابطه (۳۲) بیان می‌شود:

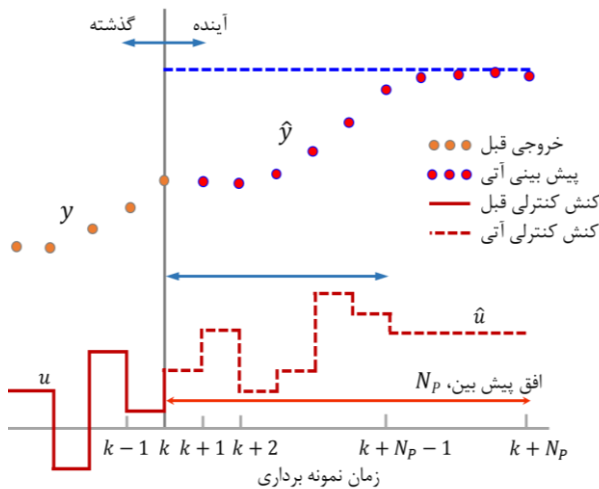
$$f_x(s) = a_x(s) + g \frac{1}{s} \hat{\theta}(s) \quad (32)$$

با جایگذاری در رابطه (۳۱) و بازنویسی رابطه حاصل به صورت فضای حالت، مدل حس نیروی مخصوص سنگ‌های گوش به صورت رابطه (۳۳) است:

$$\begin{cases} \dot{x}_{ot} = A_{ot} x_{ot} + B_{ot} u \\ \hat{f}_x = C_{ot} x_{ot} + D_{ot} u \end{cases} \quad (33)$$

که در آن، معرف بردار حالت حسگر نیروی مخصوص بوده و ضرایب A_{ot} ، B_{ot} ، C_{ot} و D_{ot} مطابق ذیل می‌باشند:

جدید تکرار می شود.



شکل (۶): تصویر مفهومی از روال کنترل مدل پیش بین اساسی.

۴-۱- مدل فرآیند

گونه‌های مختلفی از فرمول‌بندی رویکرد کنترلی مدل پیش بین ارائه شده‌اند. در این مقاله، از روش کنترل مدل پیش بین «ماتریس دینامیک» [۱۷] در تدوین سامانه حرکت ساز استفاده شده است. فرآیند به صورت گسسته «اکیداً سره»^۲ با نمایش فضای حالت با p ورودی و q خروجی مطابق (۳۸) فرض می‌شود:

$$\begin{aligned} x_m(k+1) &= A_m x_m(k) + B_m u(k) \\ y(k) &= C_m x_m(k) \end{aligned} \quad (38)$$

در رویکرد کنترل پیش بین ماتریس دینامیک، از ورودی تفاضلی پله $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ استفاده می‌شود. بنابراین، معادله حالت متناظر با ورودی فوق مطابق رابطه (۳۹) خواهد بود:

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (39)$$

که در آن، $\Delta x_m(k)$ بردار حالت تفاضلی است. مشابه (۳۹) رابطه خروجی تفاضلی نیز مطابق (۴۰) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \Delta y(k) &= y(k+1) - y(k) \\ &= C_m A_m x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) \end{aligned} \quad (40)$$

که در آن، x_v بردار ترکیبی حس حرکتی، \hat{y}_v حرکت حس شده و A_v, B_v, C_v, D_v ضرایب مدل‌های حس حرکتی مدل افزوده می‌باشند.

$$\begin{aligned} A_v &= \begin{bmatrix} A_{sc} & 0 \\ 0 & A_{ot} \end{bmatrix} & B_v &= \begin{bmatrix} B_{sc} \\ B_{ot} \end{bmatrix} \\ C_v &= \begin{bmatrix} C_{sc} & 0 \\ 0 & C_{ot} \end{bmatrix} & D_v &= \begin{bmatrix} D_{sc} \\ D_{ot} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

۴- مبانی کنترل مدل پیش بین

کنترل مدل پیش بین گونه مهمی از روش کنترل بهینه است که از زمان ارائه در سال ۱۹۸۰ میلادی با اقبال زیادی مواجهه شده است [۴]. ویژگی روش در مواجهه موثر با قیود، سیستم‌های چندورودی-چندخروجی خطی یا غیرخطی همراه یا بدون تاخیر بدون ایجاد پیچیدگی‌های مرسوم [۱۷]، به عنوان روش کنترل عمومی در توسعه سامانه‌های حرکت ساز مورد اقبال روزافزون قرار گرفته است.

مدل فضای حالت زمان گسسته فرآیند و ورودی مرجع $r(t|k), t \geq k$ در لحظه k معلوم و متغیرهای حالت سیستم قابل اندازه‌گیری یا تخمین فرض می‌شوند. با توجه به شکل ۶، روش با تخمین رشته خروجی $\hat{y}(k+i|k), i=1, \dots, N_p$ متناظر با رشته ورودی $\hat{u}(k+i|k), i=0, \dots, N_c-1$ در هر مرحله زمانی آغاز می‌شود که متغیرهای N_c و N_p به ترتیب افق پیش بینی و افق کنترل هستند.

در این رویکرد، فرمول‌بندی محاسبه ورودی کنترل معمولاً به مسئله بهینه‌سازی قیددار منجر می‌شود. مسئله بهینه‌سازی قیددار تعیین رشته ورودی $\hat{u}(k+j|k), j=0, \dots, N_c-1$ با هدف کمینه‌سازی تابع هزینه درجه دوم شامل عبارت‌های مربعات خطای ردیابی (۳۷) و انرژی کنترلی همراه با رعایت کلیه قیود حاکم است [۱۴]:

$$\epsilon(k+i|k) = r(k+i|k) - \hat{y}(k+i|k) \quad (37)$$

در هر مرحله با محاسبه رشته ورودی کنترلی، کلیه نمونه‌های تخمینی آتی از رشته کنترل حذف و فقط نمونه ورودی کنترل زمان جاری $u(k) = \hat{u}(k|k)$ برای محاسبه خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروجی جدید $y(k+1)$ در زمان $k+1$ توسط حسگر اندازه‌گیری و روش کنترلی برای زمان

1- Dynamic Matrix Control (DMC)
2- Strictly proper

$$J(\Delta U) = \frac{1}{2}(\Delta U)^T H(\Delta U) + (\Delta U)^T F \quad (47)$$

در نتیجه مسئله بهینه‌سازی قیددار به صورت مسئله بهینه‌سازی درجه دوم^۱ تبدیل می‌شود. لازم به ذکر است که فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی بدون قیود (۴۲) آسان‌تر بوده و در کاربردهای زمان حقیقی تا مادامی که نگرانی جدی از بابت نقض قیود وجود نداشته باشد، روشی بسیار مناسب است. در غیر این صورت، استفاده از فرمول‌بندی (۴۷) با روش‌های متنوع حل موجود نظیر توابع داخلی نرم‌افزار متلب^۲ یا بسته‌های نرم‌افزاری موجود توصیه می‌شود [۱۴].

۳-۴ - ملاحظات مدل‌های حرکت ساز مدل پیش بین

مدل‌های افزوده حرکت‌ساز در مانور شیب- طولی از ترکیب مدل حس حرکتی انسان (۳۶) با گونه‌های مختلف سینماتیک معکوس سامانه حرکتی مطابق فهرست ذیل حاصل می‌شوند:

- مدل سینماتیک معکوس غیرخطی (۱۷) در پیکربندی حالت خنثی

- مدل خطی‌شده سینماتیک معکوس (۲۹)

- مدل عمومی سینماتیک معکوس غیرخطی (۱۷)

در مورد مدل‌های حرکت‌ساز کلی فوق، نکات ذیل حائز اهمیت هستند:

- رویکرد کنترل مدل پیش‌بین صریح برای حل مدل حرکت‌ساز اول کفایت می‌کند.

- استفاده از رویکرد کنترل مدل پیش‌بین تطبیقی برای حل مدل‌های دوم و سوم که درایه‌های ماتریس‌های ضرایب، تابعی از بردار حالت پیکربندی آتی سیستم هستند، ضروری است.

- متغیرهای فضای عملیاتی سامانه حرکتی در مانور شیب- طولی یعنی موقعیت (x) و زاویه شیب (θ) در هر مرحله زمانی برای محاسبه درایه‌های ماتریس‌های ضرایب مدل حرکت‌ساز مورد نیاز هستند.

همچنین، انتخاب ورودی‌های مرجع مناسب برای تنظیم متغیرهای خروجی لازم است. بدیهی است مناسب‌ترین ورودی‌ها برای حس حرکتی، خروجی حس حرکتی خلبان و سیله نقلیه واقعی مطابق شکل ۲ هستند. به علاوه، در رویکرد کنترل پیش‌بین، دقت لازم در انتخاب مناسب ضریب وزن \bar{R} ، متغیرهای افق پیش‌بین N_p و افق کنترل N_c به عنوان موثرترین پارامترها در دستیابی به مصالحه‌ای رضایت‌بخش

مدل فضای حالت افزوده تفاضلی حاصل از ترکیب روابط

(۳۹-۴۰) و در قالب رابطه (۴۱) تعریف می‌شود:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & I_{q \times q} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (41)$$

$$y(k) = [0_m \quad I_{q \times q}] x_m(k)$$

که در آن، $x(k) = [\Delta x_m^T(k) \quad y^T(k)]^T$ بردار حالت جدید فرآیند و $I_{q \times q}$ ماتریس یک‌به‌یک با ابعاد $q \times q$ و $\Delta u(k)$ ورودی کنترلی است که از روش بهینه‌سازی محاسبه می‌شود.

۲-۴ - تابع هزینه و ورودی کنترلی

رشته ورودی بهینه $\Delta \hat{u}(k+i|k), i=0, \dots, N_c-1$ از کمینه‌سازی تابع هزینه (۴۲) حاصل می‌شود [۱۷]:

$$J(\Delta U) = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (42)$$

که در آن، $\bar{R} = r_w I_{N_c \times N_c} (r_w \geq 0)$ پارامتر تنظیم، R_s بردار ورودی با ابعاد مناسب و ΔU و Y مطابق ذیل تعریف می‌شوند:

$$\Delta U = [\Delta u^T(k|k) \quad \Delta u^T(k+1|k) \quad \dots \quad \Delta u^T(k+N_c-1|k)]^T \quad (43)$$

$$Y = [y^T(k+1|k) \quad y^T(k+2|k) \quad \dots \quad y^T(k+N_p|k)]^T \quad (44)$$

ورودی کنترلی گام به گام در پنجره بهینه‌سازی براساس ماتریس‌های مرتبط با مدل فرآیند Φ و F مطابق (۴۵) تعریف می‌شود [۱۷]:

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R}^T)^{-1} \Phi^T [R_s - Fx(k)] \quad (45)$$

با محاسبه ورودی تفاضلی بهینه ΔU ، تعداد q درایه اول آن به‌عنوان بردار ورودی در مدل فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که در صورت ضرورت اعمال قیود، محدودیت‌ها بر روی ورودی و خروجی فرآیند در بردار کنترل بهینه گام به گام ΔU مطابق رابطه (۴۵) گردآوری شده و در مسئله بهینه‌سازی قیددار لحاظ می‌شوند [۱۷]:

$$M \cdot \Delta U \leq \gamma \quad (46)$$

که در آن، M و γ ماتریس و بردار ناشی از اعمال قیود می‌باشند. تابع هزینه نیز به صورت تابع درجه دوم از بردار ورودی گام به گام ΔU بازنویسی می‌شود [۱۷].

1- Quadratic Problem (QP)

2- Matlab

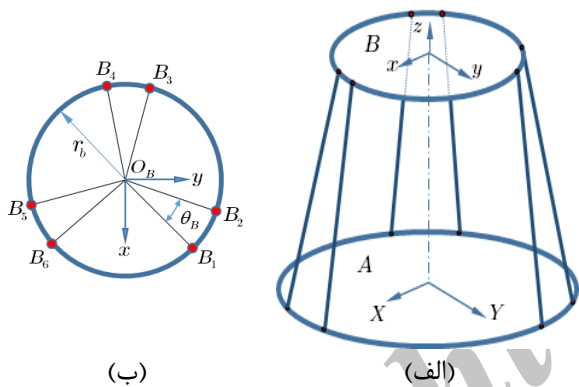
۷- ج ارائه شده‌اند. همچنین، r_b و r_a به ترتیب شعاع‌های سکوه‌های ثابت و متحرک و θ_B و θ_A به ترتیب زوایای بین مفاصل هستند. آرایش مفاصل در چارچوب‌های محلی با روابط (۴۸-۴۹) توصیف می‌شوند:

$${}^A a_i = \begin{bmatrix} {}^A a_{xi} \\ {}^A a_{yi} \\ {}^A a_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a \cos(\lambda_i) \\ r_a \sin(\lambda_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (48)$$

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

$${}^B b_i = \begin{bmatrix} {}^B b_{xi} \\ {}^B b_{yi} \\ {}^B b_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_b \cos(v_i) \\ r_b \sin(v_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

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



شکل (۷): آرایش هندسی و نمادگذاری سامانه حرکتی. همچنین، مقادیر عددی هندسه سکوی استوارت اخذ شده [۱۸] در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول (۳): مقادیر عددی هندسه سکوی استوارت.

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

بین بازتولید با کیفیت حس حرکتی با عنایت به محدودیت‌های زمان محاسباتی در کاربردهای زمان واقعی، ضرورت دارد. تنظیم زمان نمونه‌برداری گسسته‌سازی مدل حس حرکتی ترکیبی نیز با توجه به نقش آن در کیفیت نتایج، از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، خاطر نشان می‌گردد که ادغام اثر جاذبه در سیستم حس حرکتی انسان، سهم مهمی در ردیابی سیگنال‌های شبیه‌ساز حس حرکتی دارد. با استفاده از الگوریتم حرکت‌ساز مدل پیش‌بین قابلیت مدیریت مشارکت موثر زاویه‌ای در فرکانس‌های پایین که به‌عنوان مزیت مهم الگوریتم‌های حرکت‌ساز محسوب می‌شود، فراهم می‌گردد.

۵- نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا اطلاعات هندسی سامانه حرکت‌ساز و داده‌های حس حرکتی ارائه و سپس نتایج مقایسه‌ای شبیه‌سازی سامانه حرکت‌ساز براساس سه مدل سینماتیک معکوس سامانه حرکتی، به‌صورت منحنی ارائه و مورد بحث قرار گرفته است.

۵-۱- مشخصات هندسی و مقادیر عددی

مقادیر عددی حس حرکتی انسان شامل متغیرهای مدل حس نیروی مخصوص «طولی» و متغیرهای مدل حس حرکتی دورانی «شیب» که از مرجع [۵] اقتباس گردیده‌اند در جداول ۱-۲ ارائه شده‌اند.

جدول (۱): متغیرهای مدل حس نیروی مخصوص «طولی»

τ_L	τ_s	τ_a	k	dTH
۵/۳۳	۰/۶۶	۱۳/۲	۰/۴	۰/۱۷

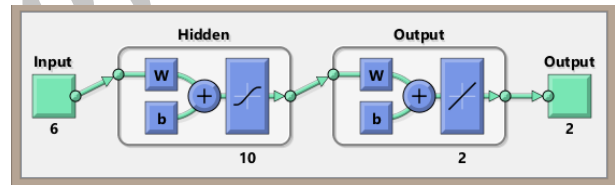
جدول (۲): متغیرهای مدل حس حرکتی دورانی «شیب»

T_L	T_s	T_a
۵/۳	۰/۱	۳۰

نمادگذاری و آرایش هندسی همراه با سیستم‌های مختصات الصاق شده بر روی مکانیزم استوارت در شکل ۷ ارائه شده‌اند. تصویر مفهومی سه‌بعدی نشان‌دهنده اجزای اصلی سامانه حرکتی حاوی چارچوب‌های ثابت و متحرک در شکل ۷- الف ترسیم شده است. آرایش هندسی اتصال عملگرها به سکوه‌های ثابت و متحرک یا مختصات مفاصل که با A_i و B_i برای $i = 1, \dots, 6$ نشان داده می‌شوند، در اشکال ۷- ب و

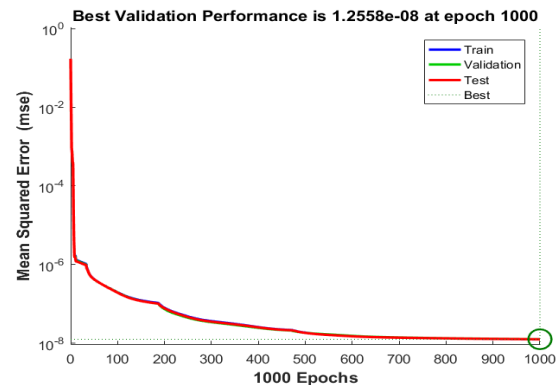
۵-۲- تقریب شبکه عصبی سینماتیک مستقیم

با عنایت به بخش (۳-۲) و با توجه به مانور «شیب- طولی» مورد توجه این پژوهش، بردار حالت پیکربندی سکوی متحرک $[z \ y \ x \ \psi \ \theta \ \phi]^T$ با صفرشدن عناصر غیرمرتبط در مانور موردنظر، به صورت $[0 \ \theta \ 0 \ x \ 0 \ z_n]^T$ می‌شود که در آن، z_n ارتفاع (ثابت) بین دو سکوی بالا و پایین در حالت خنثی است. با این توصیف، بسته محاسباتی نرم سینماتیک مستقیم سامانه حرکتی با احتساب زوج متغیرهای حالت موثر فضای عملیاتی یعنی x و θ در محاسبه طول عملگرها تهیه شد. مجموعه داده‌ها با انتخاب تصادفی مقادیر زوج مرتب $(x \ \theta)$ با پوشش مناسب محدوده $-0.05 \leq x \leq 0.05 (m)$ و $-30^\circ \leq \theta \leq 30^\circ (deg)$ و حل روابط سینماتیک مستقیم (۳) جهت محاسبه طول عملگرهای متناظر فراهم گردید. از داده‌های فوق برای آموزش شبکه عصبی پیشرو با ساختار دولایه با ۱۰ نرون^۱ در لایه اول با تابع تحریک سیگموئید^۲ و ۲ نرون در لایه دوم با تابع تحریک خطی، مطابق شکل ۸ استفاده شد که نتایج حاصل در اشکال (۹-۱۰) ترسیم شده‌اند.



شکل (۸): ساختار شبکه عصبی تقریب زنده سینماتیک مستقیم سامانه حرکتی.

روند تغییرات تابع هزینه در فرآیند آموزش شبکه عصبی با داده‌های سینماتیک مستقیم سامانه حرکتی در شکل ۹ ترسیم شده است.

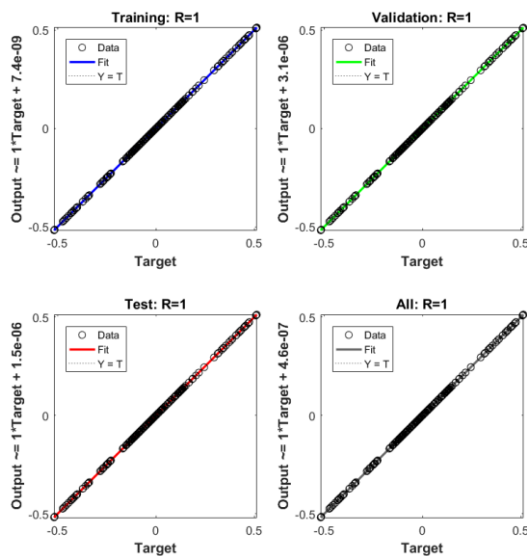


شکل (۹): روند تغییرات عملکرد شبکه عصبی در حین

آموزش داده‌های سینماتیک مستقیم سامانه حرکتی.

مطابق شکل تطابق منحنی داده‌های آموزش، صحت‌سنجی و آزمون شبکه عصبی با همگرایی سریع و دقت بالا، نشان از کیفیت مناسب شبکه عصبی آموزش‌دیده در تقریب مسئله دارد. گفتنی است تکرار عملیات به دفعات دسترسی به نتایج مشابه و بنابراین اطمینان از صحت محاسبات را نشان می‌دهد.

منحنی همبستگی شبکه عصبی در تقریب داده‌ها در شکل ۱۰، ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج آموزش نشان از تطابق نتایج هر سه مجموعه داده‌ها و دقت بسیار بالا در تقریب داده‌ها دارد.

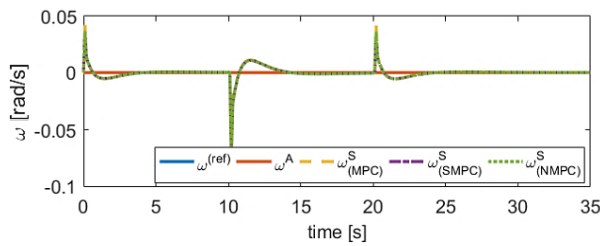


شکل (۱۰): میزان همبستگی شبکه عصبی در تقریب داده‌های سینماتیک مستقیم سامانه حرکتی.

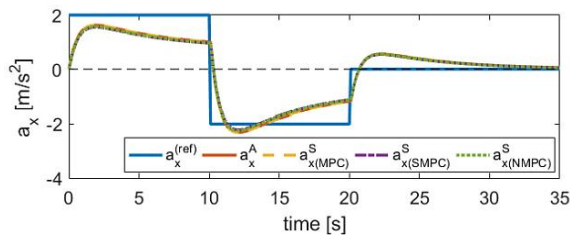
۵-۳- شبیه‌سازی و بحث

در ادامه این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل‌های افزوده سه‌گانه «با ضریب ثابت (MPC)»، «مدل خطی‌سازی شده در زوایای کوچک (SMPC)» و «مدل غیرخطی عمومی سینماتیک معکوس (NMPC)» سامانه حرکتی نسبت به ورودی‌های موج مربعی در کانال نیروی مخصوص و زاویه شیب صفر در کانال زاویه شیب در مانور شیب- طولی با هدف نمایش قابلیت ویژه روش در جبران‌سازی مناسب حس حرکت طولی با تنظیم هدفمند زاویه شیب در شبیه‌ساز ارائه شده است. خاطر نشان می‌گردد که در هر مرحله زمانی به‌روزرسانی ضرایب ماتریس‌ها در روابط (۱۷) و (۲۷) که تابع متغیر حالت

1- Neuron
2- Sigmoid



(الف)



(ب)

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

مطابق شکل در هر سه رویکرد حرکت‌ساز، حرکت‌های زاویه‌ای شیب قابل‌ملاحظه به‌خصوص در زمان‌های متناظر با تغییرات شدید ورودی مرجع در کانال شتاب انتقالی و در مطابقت با ایجاد حس حرکت انتقالی برای شبیه‌ساز پیش‌بینی می‌شود.

در بررسی عملکرد حس حرکتی انتقالی شبیه‌ساز، نتایج شبیه‌سازی برای ورودی موج کامل مربعی با دامنه 2 m/s^2 در بازه زمانی 20 sec در شکل ۱۱-ب ارائه شده است. در این شکل، شتاب انتقالی طولی a_x برای ورودی مرجع، حس حرکتی خلبان هواپیما و حس حرکتی خلبان شبیه‌ساز حاصل از سه رویکرد مدل‌سازی سامانه سینماتیک معکوس ترسیم شده‌اند. مطابق شکل، قابلیت موثر روش در ردیابی دقیق حس حرکتی خلبان واقعی به عنوان ورودی مرجع ضمن بهره‌گیری به هنگام از زاویه شیب (شکل ۱۱-الف)، در کلیه مدل‌های حرکت‌ساز برای جبران‌سازی حس حرکت طولی (شکل ۱۱-ب) به روشنی مشاهده می‌شود. تغییر طول عملگرهای شماره (۳-۱) برای سه مدل مجزای حرکت‌ساز نسبت به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص در اشکال ۱۴-۱۲ ترسیم شده‌اند.

براساس شکل ۱۲ تغییر زمانی طول عملگر برای مدل‌های حرکت‌ساز که از مدل خطی $SMPC$ و غیرخطی $NMPC$

هستند، ضرورت دارد. مقادیر متغیرهای حالت فضای عملیاتی از حل همزمان روابط فضای حالت (۱۶) با مدل حرکت‌ساز حاصل می‌شوند. شبیه‌سازی مدل‌ها، نشان‌دهنده نتایج بسیار رضایت‌بخش تری نسبت به حالت استفاده از مدل شبکه عصبی آموزش داده شده برای تقریب سینماتیک مستقیم سامانه حرکتی است. به منظور تفکیک منحنی‌ها از بالانویس و زیرنویس‌های متفاوتی استفاده شده است. بالانویس‌های ref ، A و S به ترتیب بیانگر «ورودی مرجع»، «خلبان وسیله نقلیه واقعی» و «خلبان شبیه‌ساز» هستند. زیرنویس‌های MPC^1 ، $SMPC^2$ و $NMPC^3$ نیز به ترتیب برای تفکیک منحنی‌های مربوط به «مدل با ضرایب ثابت»، «مدل خطی‌سازی شده در زوایای کوچک» و «مدل عمومی غیرخطی» استفاده شده‌اند. برای صحت‌سنجی نتایج نیز از رویکرد «حقیقت مجازی»^۴ برپاشده در محیط «متلب/سیمولینک»^۵ استفاده شده است.

نتایج شبیه‌سازی نسبت به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص بصورت شتاب 2 m/s^2 به مدت 10 sec و سپس شتاب منفی 2 m/s^2 به مدت 10 sec و متعاقباً حرکت با سرعت ثابت تا ثانیه ۳۵ ام با فرض سرعت زاویه‌ای صفر در کانال شیب، در شکل‌های ۱۶-۱۱ ترسیم شده‌اند. تغییر زاویه شیب و حس حرکتی نیروی مخصوص در طول زمان برای خلبان وسیله نقلیه واقعی و شبیه‌ساز برای سه مدل حرکت‌ساز مورد بحث در مقاله، در شکل ۱۱ ترسیم شده‌اند.

در شکل ۱۱-الف نرخ زاویه شیب $\omega (= \dot{\theta})$ به ترتیب برای ورودی مرجع « ref » که با هدف تبیین موثر «حرکت هماهنگ زاویه‌ای» سامانه حرکت‌ساز، برابر صفر منظور شده، پاسخ حس حرکتی خلبان هواپیما « A » که دقیقاً ورودی مرجع را دنبال می‌کند همراه با پاسخ حس حرکتی خلبان شبیه‌ساز « S » برای سامانه‌های حرکت‌ساز با رویکردهای به ترتیب «سینماتیک معکوس با ضرایب در پیکربندی خنثی (MPC)»، «سینماتیک معکوس خطی‌سازی شده در زوایای کوچک ($SMPC$)» و «سینماتیک معکوس غیرخطی ($NMPC$)» ترسیم شده است.

1- Model Predictive Control (MPC)

2- Semi linear Model Predictive Control (SMPC)

3- Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)

4-Virtual reality

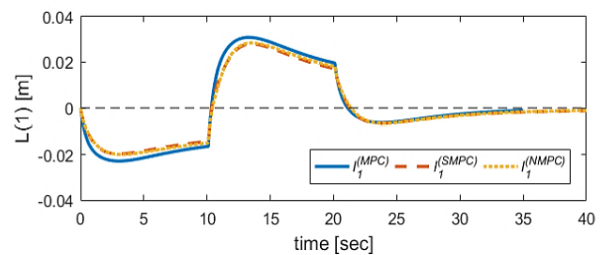
5- Matlab/Simulink

قابل ملاحظه است. جالب توجه این که در این بخش رویکرد MPC پیش‌بینی نسبتاً یکسانی با روش $NMPC$ دارد که به علت عملکرد تقریباً موجه آن در مقایسه با روش‌های دیگر، از نقطه نظر کاهش حجم محاسباتی، از جمله مزایای این مدل محسوب می‌شود. براساس هندسه شبیه‌ساز، انتخاب محورهای مختصات ثابت و متحرک و مانور «شیب- طولی» مورد توجه این مقاله، تقارن بین حرکت عملگرهای شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب با عملگرهای شماره ۴، ۵ و ۶ حفظ می‌شود. لذا از ارائه منحنی حرکت زمانی عملگرهای فوق خودداری شده است.

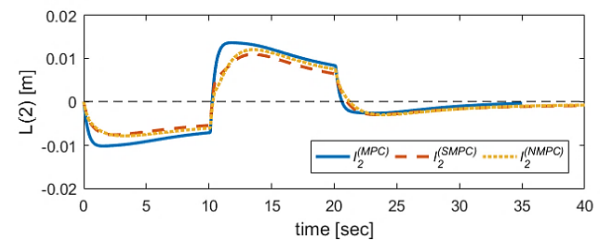
مطالعه متغیرهای تحریک‌شده بردار حالت پیکربندی سامانه حرکتی یعنی x ، u و θ نیز در رتبه‌بندی کیفیت روش‌های مورد مطالعه نقش موثری دارند. بدین منظور، تغییرات زمانی این سه متغیر در شکل ۱۵ ارائه شده‌اند.

مطابق شکل ۱۵-الف، مناسب‌ترین پیش‌بینی برای میزان جابه‌جایی طولی سکوی متحرک در دستیابی به حس حرکتی مطلوب حسب ورودی مورد اشاره، مربوط به رویکرد $NMPC$ است. در این رویکرد، ضمن مطابقت عملکرد پیش‌بینی‌شده سامانه حرکتی با واقعیت، حس حرکتی مطلوب با جابه‌جایی بسیار کوچک در محدوده $1 \text{ cm} \geq x \geq -1$ محقق می‌شود. این نتایج در سامانه‌های حرکتی در مقیاس واقعی حائز اهمیت بوده و نشان از قابلیت برتر رویکرد $NMPC$ در مقایسه با روش‌های دیگر در دستیابی به حس حرکتی مناسب با حرکت‌های مقرون‌به‌صرفه است که امکان استفاده از شبیه‌ساز برای مانورهای پیچیده‌تر با اطمینان بیشتر از حفظ سامانه حرکتی در محدوده فضای کاری آن دارد. در رویکرد $SMPC$ روند تغییرات مشابه با $NMPC$ حفظ می‌شود، اگرچه میزان جابه‌جایی سکوی متحرک به بیش از ۲ برابر رویکرد $NMPC$ افزایش می‌یابد که برای سامانه‌های حرکتی در مقیاس واقعی، این تفاوت قابل ملاحظه است. در استفاده از رویکرد MPC اگرچه نتایج نشان‌دهنده رفتار تقریباً مشابه با $NMPC$ برای بخش اول حرکت شتابدار است ولی در بخش دوم حرکت شتابدار، نتایج ضمن مغایرت با حالت واقع، با هیچ یک از دو روش دیگر مطابقت ندارد. با توجه به این که متغیرهای فضای عملیاتی در رویکرد MPC از تقریب شبکه عصبی سینماتیک مستقیم سامانه حرکتی که برای این مقاله طراحی شده است بهره می‌برند، لذا قضاوت در صحت عملکرد تقریب سینماتیک

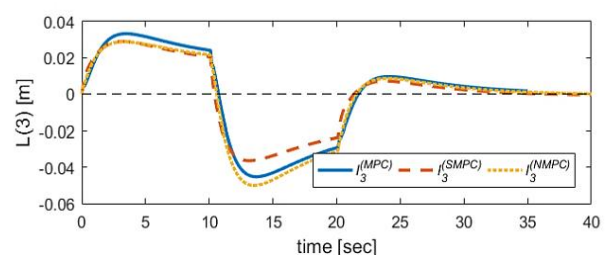
سینماتیک معکوس سامانه حرکتی بهره می‌برند، یکسان است. همچنین، پیش‌بینی مدل حرکت‌ساز براساس مدل با بهره‌های ثابت سینماتیک معکوس سامانه حرکتی MPC ، نسبتاً رضایت‌بخش است. اگر چه مقداری تفاوت با دو روش دیگر مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۱۳ تفاوت مشهودی در بخش‌هایی از حرکت عملگر در طول زمان بین نتایج MPC با دو روش $SMPC$ و $NMPC$ دیده می‌شود.



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



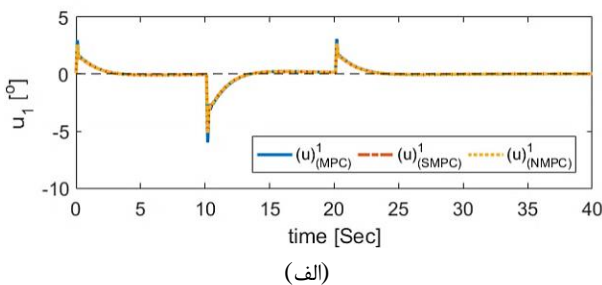
شکل (۱۳): تغییر زمانی طول عملگر شماره ۲ به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص.



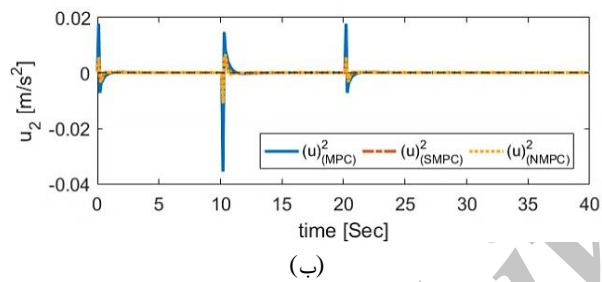
شکل (۱۴): تغییر زمانی طول عملگر شماره ۳ به ورودی موج مربعی در کانال نیروی مخصوص.

در شکل ۱۴، تفاوت اندکی در بخش اول حرکت با شتاب مثبت است، بین رویکرد MPC با دو روش $SMPC$ و $NMPC$ مشاهده می‌شود. اگرچه این اختلاف در بخش دوم منحنی که حرکت با شتاب منفی است بین روش MPC با روش $SMPC$

مثبت و تا حدود ۳۰- درجه در بخش شتاب منفی پیش‌بینی می‌شود که با کاهش شتاب به صفر، تغییرات زاویه به صفر میل می‌کند. مطابق شکل ۱۵- ج تغییرات زاویه شیب θ در یک مانور ساده به اندازه کافی بزرگ است که استفاده از مدل عمومی غیرخطی به وضوح موجه محسوب گردد. همچنین، برتری رویکرد $NMPC$ از نقطه نظر عملکرد نیز تایید مجددی بر این امر می‌باشد.



(الف)



(ب)

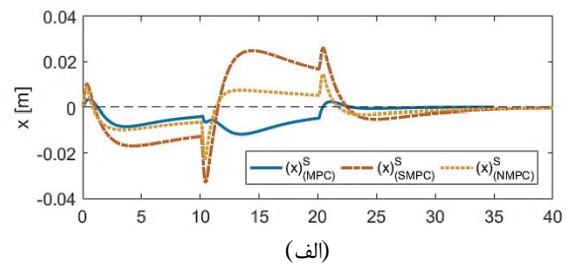
شکل (۱۶): سیگنال‌های خروجی از بلوک کنترل‌کننده مدل پیش‌بین.

سیگنال‌های خروجی از بلوک کنترل مدل پیش‌بین در اشکال (۱۶- الف و ب) ترسیم شده‌اند. مطابق این اشکال، تغییرات قابل‌ملاحظه در زمان‌های متناظر با تغییرات ورودی مرجع در کلیه مدل‌ها مشاهده می‌شوند که این تغییرات در رویکرد MPC نسبت به دو روش دیگر خصوصاً برای سیگنال دوم یعنی شتاب خطی بسیار بزرگ‌تر است.

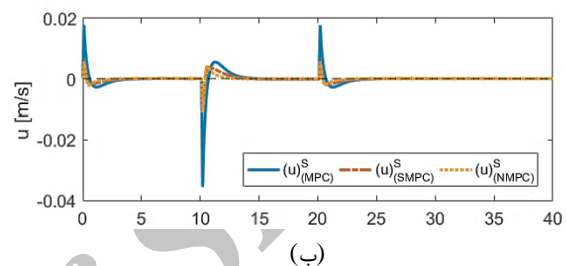
۴-۵- صحت‌سنجی نتایج

مدل «حقیقت مجازی» سکوی استوارت برپاشده در محیط سیمولینک برای تحقیق نتایج مورد استفاده قرار گرفت. با انتخاب مانور تک کاناله مورد نظر این پژوهش، امکان صحت‌سنجی قابل‌اطمینان نتایج فراهم می‌گردد. مطابق شکل ۶ بخش طول عملگرهای خروجی از مدل حرکت‌ساز کنترل

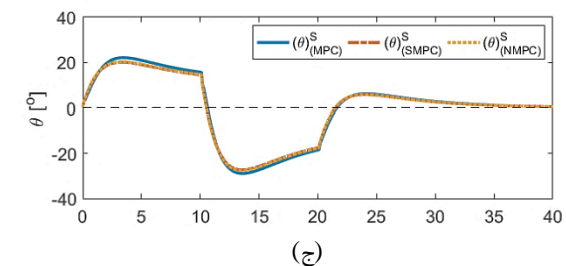
مستقیم با سایر رویکردها دشوار بوده و نیازمند مطالعات تجربی است.



(الف)



(ب)



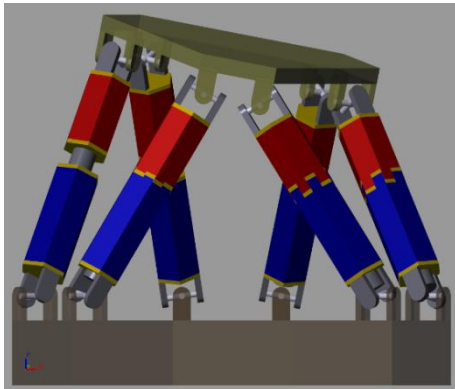
(ج)

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

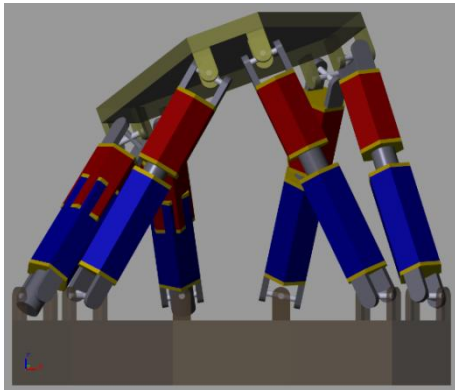
سرعت طولی سکوی متحرک u در طول زمان برای سه رویکرد MPC ، $SMPC$ و $NMPC$ در شکل ۱۵- ب ترسیم شده‌اند. مطابق شکل، تغییرات سرعت شدیدی در زمان‌های متناظر با تغییر شتاب طولی ورودی در رویکرد MPC مشاهده می‌شود که از نقاط ضعف رویکرد مذکور محسوب می‌شود. برای دو روش دیگر سرعت در موقعیت‌های گذار قابل‌ملاحظه نبوده و پیش‌بینی نسبتاً یکسانی از هر دو روش برای این متغیر می‌رود.

تغییرات زمانی زاویه شیب θ در جبران‌سازی حس حرکت طولی برای هر سه روش، در شکل ۱۵- ج ترسیم شده است. مطابق شکل، هر سه روش تقریباً یکسان عمل نموده و مطابقت کامل در دو رویکرد $SMPC$ و $NMPC$ وجود دارد. براساس شکل تغییرات زاویه شیب تا حدود ۲۰ درجه در بخش شتاب

هر سه گونه سینماتیک سامانه حرکتی، دلالت بر قابلیت کامل رویکرد حرکت‌ساز مدل پیش‌بین تطبیقی با بهره‌گیری از سینماتیک معکوس عمومی غیرخطی دارد. تامین حس حرکتی مطلوب همراه با حرکت‌های هموارتر و محدودتر عملگرهای خطی در مقایسه با دو گونه دیگر سامانه‌های حرکت‌ساز در رویکردی زمان واقعی بدون مواجهه با مشکلات محاسباتی، نشان‌دهنده قابلیت توسعه روش به کاربردهای واقعی را دارد که دستاورد برجسته پژوهش محسوب می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل (۱۸): پیکربندی سکوی ماهر مجازی در الف) بزرگترین و ب) کوچکترین زاویه شیب در مانور شیب- طولی.

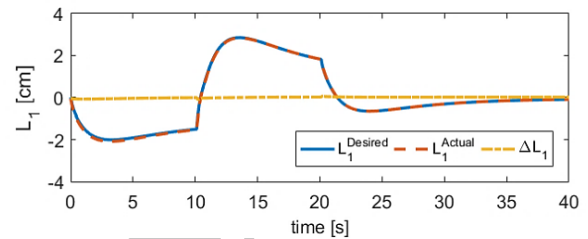
۷- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج به دلیل پشتیبانی از این پژوهش در قالب طرح پژوهشی، قدردانی می‌شود.

۸- مراجع

1. Reid, L.D., Nahon M.A. "Flight Simulation Motion-Base Drive Algorithms: Part 1.

پیش‌بین به عنوان ورودی مرجع در بخش صحت‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سامانه مجازی حرکتی در رویکرد مدار بسته دقیقاً حرکت‌های موردنظر عملگرها را ردیابی می‌کند. تغییرات طول عملگر شماره ۱ به عنوان ورودی مرجع نمونه در رویکرد NMPC به بخش سامانه حرکتی مجازی و خروجی متناظر به همراه خطای بین دو مقدار در شکل ۱۷ ترسیم شده‌اند.



شکل (۱۷): طول عملگر مطلوب، کنترل‌شده (واقعی) و خطای ردیابی عملگر شماره ۱ از رویکرد NMPC.

مطابق شکل، دقت قابل توجه در ردیابی ورودی محرز است. همچنین، پیکربندی سکوی استوارت مجازی متناظر با بزرگترین و کوچکترین زاویه شیب با هدف نمایش اثر بخشی روش در کاربردهای واقعی در اشکال ۱۸- الف و ب ترسیم شده‌اند. فایل پویانمایی نمونه همراه مقاله نیز تاکیدی بر دست آوردهای اشاره شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تدوین روشمند سامانه حرکت‌ساز تطبیقی مدل پیش‌بین با قابلیت کنترل بهینه و براساس بهره‌گیری از سینماتیک معکوس سامانه حرکتی ارائه گردید. سه گونه سینماتیک معکوس سامانه حرکتی شامل (۱) ضرایب محاسبه‌شده در پیکربندی خنثی، (۲) مدل خطی در پیکربندی آنی طراحی‌شده مخصوص پژوهش حاضر و (۳) مدل غیرخطی عمومی در برپایی سامانه حرکت ساز مورد استفاده قرار گرفتند. با هدف مطالعه کیفیت عملکرد رویکرد حرکت‌ساز پیشنهادی، پاسخ مدل به ورودی‌های موج مربعی در کانال نیروی مخصوص و زاویه شیب صفر در کانال زاویه شیب در مانور شیب- طولی با هدف نمایش قابلیت ویژه روش در جبران‌سازی مناسب حس حرکت طولی با تنظیم هدفمند زاویه شیب در شبیه‌ساز ارائه گردید. نتایج صحت‌سنجی حاصل از مدل حقیقت مجازی برای

10. Maran, F., Bruschetta, M., Beghi, A. "Study of a Real-time, MPC Based Motion Cueing Procedure with Time-Varying Prediction for Different Classes of Drivers", IEEE American Control Conference (ACC), Boston, MA, USA, pp. 1711-1716, 2016.
11. Aminzadeh, M., Mahmoodi, A., Sabzehparvar, M. "Optimal Motion-Cueing Algorithm using Motion System Kinematics", European Journal of Control, Vol. 18, No. 4, pp. 363-375, 2012.
12. Garrett, N.J., Best, C.M. "Model Predictive Driving Simulator Motion Cueing Algorithm With Actuator-Based Constraints", International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 51, No. 8, pp. 1151-1172, 2013.
13. Pradipta, J., Sawodny, O. "Actuator Constrained Motion Cueing Algorithm for a Redundantly Actuated Stewart Platform", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 138, No. 6, 2016.
14. Beghi, A., Bruschetta, M., Maran, F., and Minen, D. "A Model-based Motion Cueing Strategy for Compact Driving Simulation Platforms", Driving Simulation Conference, France, pp. 1-8, 2012.
15. Taghirad, H.D. "Parallel Robots: Mechanics And Control", CRC press, 2013.
16. Harib, K., Srinivasan, K. "Kinematic and dynamic analysis of Stewart Platform-based Machine Tool Structures", Robotica, Vol. 21, No. 5, pp. 541-554, 2003.
17. Wang, L. "Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB", Springer Science & Business Media, 2009.
18. Bingul, Z., Karahan, O. "Dynamic Modeling and Simulation of Stewart Platform", Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization, INTECH Open Access Publisher, pp. 19-42, 2012.
- Developing and Testing Equations", University of Toronto, 1985.
2. Reid, L.D., Nahon M.A. "Flight Simulation Motion-Base Drive Algorithms. Part 3. Pilot Evaluations", University of Toronto, 1986.
3. Reid, L.D., Nahon, M.A. "Flight Simulation Motion-Base Drive Algorithms: Part 2. Selecting The System Parameters", University of Toronto, 1986.
4. Houck, J.A., Telban, R.J., Cardullo, F.M., Kelly, L.C. "Motion Cueing Algorithm Development: New Motion Cueing Program Implementation and Tuning", NASA Langley Research Center, 2005.
5. Chen, S.H., Fu, L.C. "An Optimal Washout Filter Design For A Motion Platform With Senseless And Angular Scaling Maneuvers", IEEE American Control Conference (ACC), Baltimore, MD, USA, pp. 4295-4300, 2010.
6. Baseggio, M., Beghi, A., Bruschetta, M., Maran, F., Minen, D. "An MPC Approach To The Design Of Motion Cueing Algorithms For Driving Simulators", 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington, DC, USA, pp. 692-697, 2011.
7. Fang, Z., Kemeny, A. "Explicit MPC Motion Cueing Algorithm For Real-Time Driving Simulator", 7th International IEEE in Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), Harbin, China, pp. 874-878, 2012.
8. Bruschetta, M., Maran, F., Beghi, A., Minen, D. "An MPC Approach to the Design of Motion Cueing Algorithms for a High Performance 9 DOFs Driving Simulator", In Driving Simulation Conference, No. 12, Paris, France, pp. 1-7, 2014.
9. Maran, F., Bruschetta, M., Beghi, A., Minen, D. "Improvement of an MPC-based Motion Cueing Algorithm with Time-Varying Prediction and Driver Behaviour Estimation", DSC Europe, Germany, pp. 1-8, 2015.

Archive of SID