



Extensive Regional Telecommunications Coverage in Emergency Condition using Tethered-Balloon Equipped with Antenna Pointing Mechanism – Part 1: Kinematic and Dynamic Modeling

Mohammad Fathi^{1*} and Javad Ranjbar²

1. PhD Candidate, Electrical Engineering Department, Iran University of Science and Technology

2. Assistant Professor, Electrical Engineering Department, Khatam al-Anbia University

*Corresponding Author E-mail: mohammad_fathi@elec.iust.ac.ir

In emergency situations, where there is no possibility of using terrestrial-based or space-based telecommunication platforms or when there is a need for providing telecommunication services in remote, rural or hilly areas which are faced with lacking telecommunication infrastructures, typically using tethered balloon-based telecommunication technology is the best choice. Low operation cost, quick installation, larger coverage area than terrestrial facilities such as BTS and usability in emergency situations are among the advantages of using tethered balloons for telecommunication applications. Despite all the advantages of using this technology, small and limited coverage area is the biggest drawback of using tethered balloon platforms. In this paper, using a tethered balloon equipped with antenna pointing mechanism is proposed in order to, extend their small coverage area to a large region, in addition to benefit from inherent tethered balloons technology advantages. In this regard, dynamic and kinematic modeling of the proposed antenna pointing mechanism is discussed. In this research, the kinematic model is validated using RoboAnalyzer software and Robotics MATLAB toolbox. Antenna pointing mechanism provides the rotation ability for the antenna in two Azimuth and Elevation directions which increased the coverage area dramatically.

Keyword: Kinematic modeling, Antenna pointing mechanism, Tetheredballoon, Coverage area enlargment



پوشش دهی مخابراتی منطقه‌ای وسیع در شرایط اورژانسی با استفاده از بستر بالن مقید مجهز به مکانیزم نشانه‌روی آتن - بخش اول: مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی

محمد فتحی^{۱*} و جواد رنجبر^۲

^۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه خاتم الانبیاء، تهران، ایران

*ایمیل نویسنده مخاطب: mohammad_fathi@elec.iust.ac.ir

در شرایط اورژانسی که امکان استفاده از بسترهای مخابراتی زمینی یا فضایی وجود ندارد و در شرایطی که نیاز به برقراری ارتباطی مخابراتی در مناطقی دور افتاده قادر بسترهای مورد نیاز مخابراتی وجود دارد، به طور معمول از فناوری بالن‌های مقید برای تبادل اطلاعات استفاده می‌شود. هزینه پائین، قابلیت استقرار سریع، میزان پوشش دهی بیشتر نسبت به BTS‌ها و قابلیت استفاده در شرایط اورژانسی از جمله مزایای استفاده از بالن‌های مقید برای برقراری ارتباط مخابراتی به شمار می‌رود. فناوری بالن‌های مقید به رغم تمام مزایایشان، دارای عیوب قابلیت پوشش دهی منطقه‌ای کوچک هستند. در این مقاله، به منظور بهره‌گیری همزمان از مزایای بالن‌های مقید و پوشش دهی یک منطقه وسیع، استفاده از یک بالن مجهز به مکانیزم نشانه‌روی آتن پیشنهاد شده و به مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی مکانیزم پیشنهادی پرداخته شده است. در این کار مدل سینماتیکی استخراج شده توسط نرم‌افزار رویوآنالیزر و همچنین جعبه ابزار ریاتیکس از نرم‌افزار متلب مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. مکانیزیم مدل‌سازی شده قابلیت دوران در دو جهت قوس افقی و قوس عمودی را برای آتن فراهم می‌آورد و بدین ترتیب ناحیه تحت پوشش آتن را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی سینماتیکی، مکانیزم نشانه‌روی آتن، بالن مقید، افزایش پوشش مخابراتی

Earth-Centered, Earth-Fixed
(ECEF)

زمین- مرکز، زمین- ثابت

علامه و اختصارات

مقدمه

امروزه، امکان برقراری ارتباط مخابراتی در هر زمان و مکان یکی از نیازمندی‌های بشر به شمار می‌رود. این نیازمندی، در شرایط اورژانسی که در آن وقوع بلاایی طبیعی همچون زلزله، سیل و غیره بسترهای

Global Positioning System (GPS)

Surrey Satellite Technology Ltd.
(SSTL)

Program on Airship Design
and Development (PADD)

سیستم موقعیت‌یاب جهانی

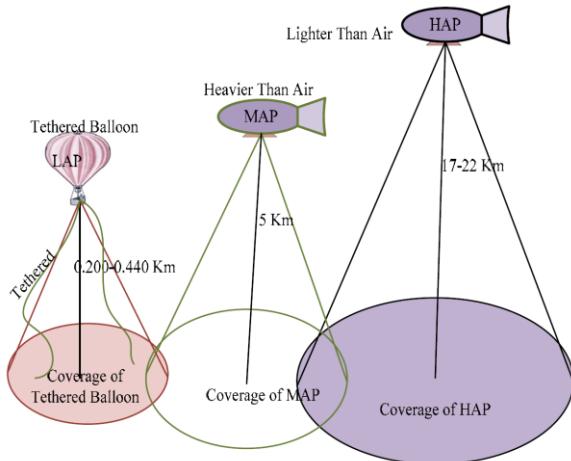
شرکت تکنولوژی ماهواره ساری

پروژه پاد

۱. دانشجوی دکتری (نویسنده مخاطب)

۲. استادیار

موجود در این میان، محدودیت ناحیه تحت پوشش یک بالن مقید نسبت به فناوری های زمینی و فضایی است. بدطور کلی، بالن ها در ارتفاعات مختلفی نسبت به سطح زمین می توانند قرار گیرند که بر این اساس به سه دسته بالن های ارتفاع بالا که در لایه استراتوسفر در ارتفاعی در بازه ۱۷ تا حدود ۱۰۰ کیلومتر قرار می گیرند و بالن های ارتفاع متوسط و ارتفاع کم که در ارتفاعاتی پائین تر در لایه تروپوسفر قرار می گیرند، دسته بندی می شوند. ارتفاعی که یک بالن در آن قرار می گیرد با ناحیه تحت پوشش بالن نسبت مستقیم خواهد داشت. در شکل (۱) ارتباط میان ارتفاع و ناحیه تحت پوشش یک بالن به صورت شماتیک نمایش داده شده است [۱۳].



شکل ۱- ارتباط میان ارتفاع بالن و ناحیه تحت پوشش [۱۳]

همانگونه که در شکل (۱) نمایش داده شده است، یکی از چالش هایی که بالن های مقید با آن مواجه هستند، ناحیه تحت پوشش کوچک است که از ارتفاع پائین آن ها (ارتفاعی میان ۰/۰ تا ۰/۴۴ کیلومتر) ناشی می شود. فرض کنید که به دلایل امدادی یا امنیتی لازم است تا در یک منطقه ارتباطی مخابراتی با استفاده از بستر بالن میان دو خودرو فراهم شود. در چنین شرایطی چنانچه آتن بهره بالای متصل به بالن دارای بیمی 30° درجه باشد، در این صورت منطقه تحت پوشش با درنظر گرفتن بیشترین ارتفاع یک بالن مقید (۴۴۰ متر) برابر با 20.27×10^6 کیلومتر مربع خواهد بود، که چنین منطقه تحت پوششی آزادی حرکت خودروهای مد نظر را صلب کرده و عملیاتی بودن مأموریت را محدود می کند. با توجه به این مهم، چنانچه هدف یک مأموریت برقراری یک ارتباط مخابراتی از طریق بستر بالن مقید در یک منطقه وسیع باشد، با توجه به تکنولوژی روز بالن های مقید، تنها راه چاره به منظور پوشش کلی منطقه، استفاده از تعداد بسیاری از

6. Communications from Aerial PlAtform Networks dellivering broadband commuNicationS for All (CAPANINA)
7. Program on Airship Design and Development (PADD)
8. Loon

مخابراتی زمینی و فضایی را تخریب کرده است، بیش از پیش نیز احساس می شود. علاوه بر شرایط اورژانسی، نیاز به ایجاد یک بستر مخابراتی در مناطق دورافتاده که قادر بسترهای مخابراتی هستند و همچنین در شرایط امنیتی که عدم استفاده از بسترهای مخابراتی عمومی به کاربران الزام شده است، یکی از چالش هایی است که امروزه در جهان مطرح است. در چنین شرایطی، بستری برای برقراری ارتباط مخابراتی مناسب خواهد بود که پنج ویژگی مهم را داشته باشد که این ویژگی ها عبارتند از: زمان راه اندازی کوتاه، هزینه عملیاتی معقول، پوشش منطقه ای مناسب، امکان باز پیکربندی ساده بر حسب نیاز و تضمین برقراری ارتباطی ایمن. از آنجاکه برقراری ارتباط مخابراتی از طریق بستر بالن مقید هر ۵ ویژگی ذکر شده را در بر دارد، امروزه در شرایط اورژانسی یا امنیتی از بالن های مقید برای راه اندازی سریع بستری مخابراتی استفاده می شود.

بالن های مقید^۳ ساخته راهی هستند که در آنها یک محفظه منعطف توسط یک گاز سبک (به طور معمول هلیوم [۱]) پر شده و بدین وسیله یک محموله (آتن، دوربین یا غیره) به هوا فرستاده می شود. در بالن های مقید، بالن توسط یک کابل نگهدار مهار می شود تا بدین شکل بالن در نقطه پرتاب خود ایستا شود [۲]. بالن های مقید به عنوان یک پلتفرم مناسب برای تجهیزاتی با کاربردهای مخابراتی، پخش چند رسانه ای^۴، مطالعات زیست محیطی و تصویربرداری مورد استفاده قرار می گیرند. در مراجع [۳] و [۴] از فناوری بالن های مقید برای کاربردهای دسترسی به اینترنت و سرویس دهنده باند پهن^۵ استفاده و بیان شده که استفاده از فناوری بالن های مقید در کاهش خطرات ناشی از امواج الکترومغناطیسی بر سلامت جانداران بسیار مؤثر هستند.

در بسیاری از پروژه ها در سرتاسر جهان از فناوری بالن های مقید برای کاربرد در سرویس دهنده های باند پهن و راداری، تصویربرداری و مطالعات متropolی در مناطق صعب العبور و محروم استفاده شده است. از این جمله می توان به پروژه تیتانتوس ناسا [۵]، پروژه کاپانینا^۶ توسط اروپا [۶-۷] و پروژه پاد^۷ در هند [۸-۹] اشاره کرد. از دیگر پروژه هایی که به منظور دسترسی جهانی به اینترنت در هر نقطه از زمین با استفاده از شبکه ای از بالن های مقید تعریف شده، پروژه لوون^۸ است که توسط شرکت گوگل عملیاتی شده است [۱۰-۱۱]. در مرجع [۱۲] نیز از بالن های مقید برای ارائه خدمات مخابراتی به مناطق دور از دسترس و مرتفع مورد استفاده قرار گرفته است.

به رغم تمام مزایای استفاده از بستر مخابراتی بالن های مقید، استفاده از این بستر با چالش هایی نیز مواجه است. بزرگترین چالش

3. Tethered Balloon
4. MediaBroadcasting
5. Broadband

نشانه روی آتن به سمت اهداف مورد نظر را انجام داد، لازم است تا معادلات سینماتیک مستقیم و وارون و همچنین ماتریس‌های تبدیل میان دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی آتن و دستگاه مختصات که موقعیت اهداف مورد در آن‌ها بیان شده (ECEF) را استخراج کرد [۱۷-۱۸]. علاوه بر آن، با در اختیار داشتن مدل سینماتیکی و مسیرهای مرجع استخراج شده، معادلات دینامیکی مکانیزم نشانه روی آتن را نیز باید در اختیار داشت تا بدین ترتیب گشتاورهای موردنیازی که باید توسط عملگرهای مکانیزم تولید شده تا بیم آتن مسیرهای مرجع استخراج شده را دنبال کند، تعیین شوند [۱۸-۲۰].

در این مقاله، هدف آن است که با در نظر گرفتن ساختار یک بالن مقید مجهر به مکانیزم نشانه روی آتن دو درجه آزادی به منظور افزایش ناحیه پوشش‌دهی مخابراتی، به مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ساختار مورد بحث پرداخته شود. در این راستا، توصیف سیستم‌های مختصات مورد نیاز، استخراج ماتریس‌های تبدیل میان سیستم‌های مختصات، مدل سازی سینماتیک مستقیم و وارون و مدل سازی دینامیکی مکانیزم نشانه روی آتن ارائه شده است. در ادامه، استخراج معادلات مورد نیاز برای طراحی مسیر مرجع نشانه روی آتن، طراحی مودهای عملیاتی مکانیزم‌نشانه روی و طراحی کنترل کننده مناسب مورد بحث قرار خواهد گرفت. شایان ذکر است که نوآوری‌های ارائه شده در این مقاله نسبت به مرجع [۱۷] که به عنوان گزارشی اولیه از این پژوهش منتشر شده است را می‌توان علاوه بر ارائه توضیحات تکمیلی و بهروزسانی تصاویر و نتایج حاصل، به صورت زیر بیان کرد:

- اصلاح مدل سازی سینماتیک مستقیم مکانیزم نشانه روی آتن مربوط به شرکت تکنولوژی ماهواره ساری^{۱۱} مطابق با قوانین دناویت-هارتبرگ
- اصلاح مدل سازی سینماتیک وارون مکانیزم نشانه روی آتن مطابق با قوانین دناویت-هارتبرگ^{۱۲}
- اعتبارسنجی مدل سینماتیکی استخراج شده توسط نرم‌افزار روبوآنالیزر و جعبه ابزار رباتیکس از نرم‌افزار متلب
- مدل سازی دینامیکی مکانیزم نشانه روی آتن SSTL بر اساس روش لاگرانژ

ساختار این مقاله بدین صورت تنظیم شده است: در بخش ۲ به معرفی نمادگذاری دناویت-هارتبرگ و قراردادهای مرتبط با آن پرداخته و در بخش ۳ ساختار مکانیزم نشانه روی آتن مورد بحث در این مقاله تشریح شده است. در بخش ۴ به توصیف کامل تمام سیستم‌های مختصات مورد نیاز عنوان شده است. در بخش ۵ به مدل سازی سینماتیک مستقیم و وارون

بالن‌ها و تشکیل یک شبکه از بالن‌های مقید برای پوشش‌دهی خواهد بود. اما به کارگیری چنین رویکردی علاوه بر آنکه پیچیدگی شبکه مخابراتی را افزایش داده و هزینه اقتصادی گزافی را به پژوهه تزریق خواهد کرد و حتی ممکن است با توجه به شرایط اضطراری موجود امکان پذیر نیز نباشد.

در این مقاله به ارائه ساختاری با استفاده از مکانیزم‌های نشانه روی آتن برای بالن‌های مقید پرداخته شده است که مشکل کوچک‌بودن ناحیه تحت پوشش این بالن‌ها را مرتفع می‌سازد. چنانچه برقراری ارتباط مخابراتی میان دو خودرو از طریق بستر بالن مقید به عنوان مأموریت مورد نظر مفروض شده و همچنین فرض شود که مکانیزم نشانه روی آتن متعلق به بالن تنها قادر به تأمین دوران ۳۰ درجه‌ای در جهت قوس عمودی^۹ و ۱۸۰ درجه‌ای در جهت قوس افقی^{۱۰} است، مساحت ناحیه تحت پوشش بالن مقاید از ۰/۲۰۲۷ کیلومتر مربع (در حالت بدون مکانیزم) به ۱/۸۲۴۵ کیلومتر مربع افزایش خواهد یافت. با توجه به این مهم، آزادی تحرک خودروها در صورتی که بالن مقید مجهر به مکانیزم نشانه روی آتن باشد، نسبت به حالت قبل بسیار بیشتر بوده و ناحیه پوشش‌دهی به بیش از ۱۰ برابر افزایش می‌یابد [۱۴ و ۱۷].

در راستای نشانه روی آتن متعلق به بالن مقید به سمت اهداف مورد نظر (خودروها) لازم است تا آتن قابلیت دوران در دو جهت قوس افقی و قوس عمودی را داشته باشد. مکانیزم‌های نشانه روی متعددی (با ساختار مشابه) برای فراهم ساختن این قابلیت در آتن‌ها طراحی گشته‌اند که با استفاده از دو مفصل لولایی، قابلیت دوران در راستاهای قوس افقی و قوس عمودی را برای آتن فراهم می‌سازند [۱۵-۱۶].

با مجهر ساختن بالن مقید به مکانیزم نشانه روی آتن، مهمترین مسئله‌ای که مطرح می‌شود آن است که چگونه می‌توان مسیرهای مرجع مناسبی را برای جهت‌دهی آتن تحت مکانیزم نشانه روی به سوی اهداف مطلوب تولید کرد. به عنوان مثال، فرض کنید اهداف مورد نظر در مأموریت مفروض در این مقاله (خودروهای هدف)، دارای GPS هستند که بردار موقعیتشان را در دستگاه مختصات حسگرهای زمین مرکز-زمین ثابت تولید می‌کنند. در چنین مأموریتی، مسیر مرجع مکانیزم نشانه روی آتن باید چنان استخراج شود که در آن تبدیلات زنجیره دستگاه‌های میان دستگاه مختصات ECEF تا دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی آتن همگی لحاظ شده باشند. بدین ترتیب، باید ارتباط معناداری میان بردار جهت‌گیری آتن نسبت به دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی آتن با بردارهای موقعیت خودروهای هدف که در دستگاه ECEF بیان شده‌اند، ایجاد شود. در همین راستا، به منظور آنکه بتوان به طور صحیح عملیات

11. Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL)
12. Denavit-Hartenberg (D-H)

9. Elevation
10. Azimuth

- محور \hat{X} در هر دستگاه مختصات تعريف شده، باید با محور \hat{Z} از دستگاه مختصات ماقبل خود متقطع باشد.

- با تعريف محورهای \hat{X} و \hat{Z} در هر دستگاه مختصات، محور \hat{Y} در آن دستگاه مختصات باید به نحوی تعريف شود که دستگاه مختصات حاصل شده از قاعدة دست-راست-پیروی کند.

توجه به این نکته لازم است که طبق قوانین دناویت-هارتبرگ برای تعريف دستگاه‌های مختصات، تعريف راستای محور \hat{Z} مربوط به اولین دستگاه مختصات، می‌تواند به دلخواه با لحاظ کردن شرط تعامل محورها در یک دستگاه مختصات، توسط طراح انتخاب شود. در شکل (۲) طرز قرارگیری چهارچوب‌های $\{i\}$ - $\{i-1\}$ و $\{i\}$ - $\{i+1\}$ برای یک مکانیزم / روبات در حالت کلی نشان داده شده است.

پارامترهای دناویت-هارتبرگ

پس از تعريف دستگاه‌های مختصات مورد نیاز به منظور مدل سازی سینماتیکی یک مکانیزم یا روبات، قدم بعد برای دستیابی به ماتریس-های تبدیل همگن میان دستگاه‌های مختصات تعريف شده و توصیف رفتار سینماتیکی مکانیزم یا روبات، تشکیل جدول پارامترهای دناویت-هارتبرگ است. جدول پارامترهای دناویت-هارتبرگ، میان هر دو دستگاه مختصات متواالی تعريف می‌شود و رابطه دورانی^{۱۶} و جابه‌جایی^{۱۷} را توصیف می‌نماید. در تعريف جدول پارامترهای دناویت هارتبرگ از چهار پارامتر a_i (طول رابط)، α_i (زاویه پیچش)، θ_i (زاویه مفصل) و d_i (انحراف رابط) که با نام پارامترهای دناویت هارتبرگ (D-H) شناخته شده‌استند، استفاده می‌شود. در صورتی که میان هر دو دستگاه مختصات تعريف شده، پارامترهای D-H به درستی تعريف شوند، ماتریس تبدیل همگن میان این دو دستگاه به‌طور مستقیم قابل استخراج خواهد بود.

به منظور توصیف پارامترهای D-H دو دستگاه مختصات متواالی با نامهای $\{n-1\}$ و $\{n\}$ را در نظر بگیرید. با این فرض، پارامتر زاویه مفصلی θ میان این دو دستگاه مختصات بیانگر میزان دوران مورد نیز حول محور \hat{Z}_{n-1} به نحوی است که پس از آن محورهای \hat{X}_{n-1} و \hat{X}_n با یکدیگر هم‌راستا شوند. شایان ذکر است چنانچه در این تعريف، دستگاه مختصات $\{1\}$ - $\{n\}$ مربوط به مفصلی لو لا بی باشد، در این صورت میزان دوران این مفصل نیز باید در تعريف زاویه مفصلی θ لحاظ شده باشد. در تعريف پارامترهای D-H، پارامتر زاویه پیچش α بیانگر میزان دوران مورد نیاز دستگاه مختصات $\{1\}$ - $\{n\}$ حول محور \hat{X}_n به نحوی است که پس از آن محورهای \hat{Z}_{n-1} و \hat{Z}_n با یکدیگر هم‌راستا شوند. در تعريف پارامترهای D-H، پارامتر انحراف رابط

مکانیزم، تعیین فضای کار مکانیزم، استخراج ماتریس تبدیل‌های میان دستگاه‌های مختصات و همچنین اعتبارسنجی مدل سینماتیکی استخراج شده پرداخته شده است. مدل سازی دینامیکی مکانیزم نشانه‌روی نیز در بخش ۶ مورد بحث قرار گرفته و در نهایت بخش ۷ به بیان جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

نمادگذاری دناویت-هارتبرگ

به منظور تحلیل سینماتیکی یک مکانیزم، به طور معمول از نمادگذاری دناویت-هارتبرگ برای استخراج مدل سینماتیکی استفاده می‌شود [۲۱-۲۲]. مدل سازی سینماتیکی با استفاده از نمادگذاری D-H بدین صورت انجام می‌گیرد که ابتدا به هر یک از مفصل‌های مکانیزم تحت مطالعه، دستگاه مختصاتی مناسب متصل و تعريف می‌شود. سپس، با استفاده از دستگاه‌های مختصات تعريف شده، برای هر یک از رابطه‌ای مکانیزم، چهار پارامتر که به پارامترهای D-H معروف هستند، تعیین می‌شود. با در اختیار داشتن پارامترهای D-H، ماتریس تبدیل میان دستگاه-های مختصات مختلف تعريف شده استخراج و بدین ترتیب مدل سینماتیکی مکانیزم حاصل می‌شود.

قوانین دناویت-هارتبرگ برای تعريف دستگاه مختصات

به منظور مدل سازی سینماتیکی یک مکانیزم یا یک روبات توسط پارامترهای D-H لازم است به تعريف و اختصاص دستگاه‌های مختصات مناسب برای هر یک از مفصل‌ها و همچنین عملگر-نهایی^{۱۸} مکانیزم مطابق با قوانین دناویت-هارتبرگ پرداخته شود. قوانین دناویت-هارتبرگ برای تعريف دستگاه‌های مختصات را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- به منظور مدل سازی سینماتیکی یک مکانیزم یا روبات، حداقل $n+1$ دستگاه مختصات برای مکانیزم تعريف شود که در اینجا n بیانگر تعداد مفصل‌های مکانیزم یا روبات است، چراکه برای هر مفصل و همچنین عملگر نهایی باید دستگاه مختصات مناسب تعريف شده باشد. توجه به این نکته لازم است که در صورت نیاز می‌توان تعداد بیشتری دستگاه مختصات برای توصیف سینماتیکی روبات یا مکانیزم استفاده نمود با این حال تعريف تعداد کمتر مجاز نیست.

- محور \hat{Z} در هر دستگاه مختصات تعريف شده، باید منطبق بر جهت محور دوران مفصل (در مفصل‌های لو لا بی^{۱۹}) یا راستای حرکت مفصل (در مفصل‌های کشویی^{۲۰}) باشد.

- محور \hat{X} در هر دستگاه مختصات تعريف شده، باید نسبت به محور \hat{Z} از دستگاه مختصات ماقبل خود متعامد باشد.

13. End-Effector

14. RevoluteJoints

15. PrismaticJoints

ساختار مکانیزم نشانه روی آتن

ساختار مکانیزم نشانه روی در این مقاله مشابه با ساختار مکانیزم نشانه روی آتن SSTL که تاکنون در ماهواره های متعددی از جمله TechDemoSat-1 و KazEOSat-2 NigeriaSat-2 استفاده قرار گرفته، درنظر گرفته شده است [۱۵]. ساختار مکانیزم نشانه روی آتن SSTL در شکل (۳) نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل نمایش داده شده، مکانیزم نشانه روی آتن مورب بررسی در این مقاله از دو مفصل لولایی تشکیل شده است که هر یک از این مفصل ها در واقع موتورهایی می باشند که دوران مورد نیاز آتن را فراهم می آورند. موتور -۱، دوران مورد نیاز در جهت قوس افقی و موتور -۲ دوران مورد نیاز در راستای قوس عمودی را برای آتن فراهم می کنند. دوران های حاصل از چرخش موتور -۱ و موتور -۲ از طریق یک شفت که به موتور -۲ متصل است، به آتن منتقل می شوند. ابعاد بخش های مختلف مکانیزم نشانه روی آتن در شکل (۳) به صورت شماتیک ارائه شده است.

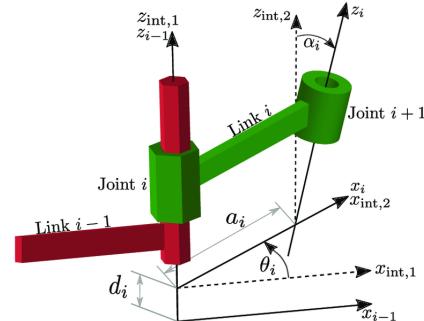
توصیف دستگاه های مختصات مورد نیاز

در راستای مدل سازی سینماتیکی مکانیزم نشانه روی آتن، سیستم های مختصات مورد نیاز باید به نحوی تعریف شوند که به واسطه آنها، بردارهای موقعیتی خودروها (اهداف مفروض در این مقاله) که توسط گیرنده های GPS در دستگاه مختصات ECEF تولید می شوند را بتوان به دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی منتقل کرد. بدین وسیله زوایای مرجع مناسب عملگرهای مکانیزم نشانه روی آتن (موتور -۱ و موتور -۲) را به نحوی استخراج کرد که آتن به سمت هدف مطلوب جهت گیری کند. به منظور انتقال بردارهای موقعیتی اهداف از دستگاه مختصات ECEF به دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی آتن و در نتیجه آن استخراج مسیر مرجع مطلوب برای عملگرهای روند نمایش داده شده در فلوچارت شکل (۴) باید دنبال شود. در ادامه به توصیف کامل هر یک از دستگاه های مختصات نامبرده در فلوچارت شکل (۴) پرداخته خواهد شد.

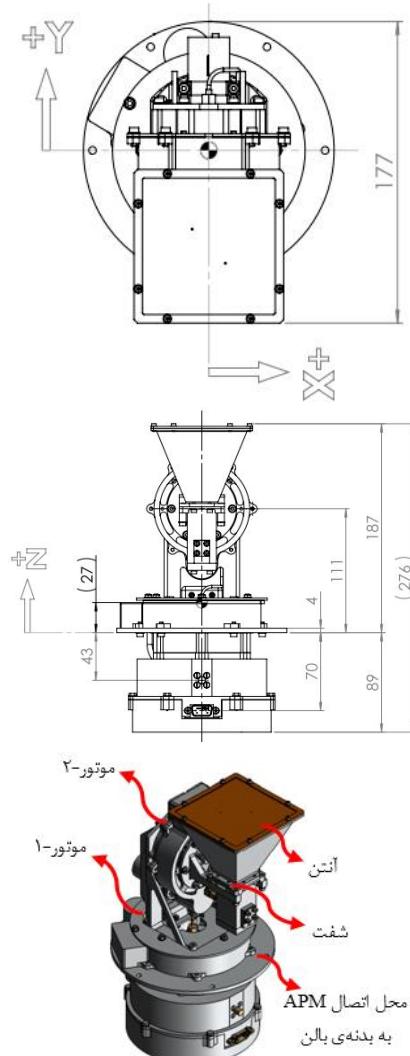


شکل ۴- روند استخراج مسیر مرجع برای موتور -۱ و موتور -۲ بر اساس GPS بردارهای موقعیت تولید شده توسط ECEF

بیانگر فاصله میان مبدأ دستگاه های مختصات $\{n-1\}$ و $\{n\}$ در راستای محور $n-1$ است. در نهایت، پارامتر طول رابطه a_i نیز بیانگر فاصله میان مبدأ دستگاه های مختصات $\{n-1\}$ و $\{n\}$ در راستای محور n است. نمایش شماتیک چهار پارامتر $D-H$ (d_i , θ_i , α_i , a_i) در شکل (۲) ارائه شده است.

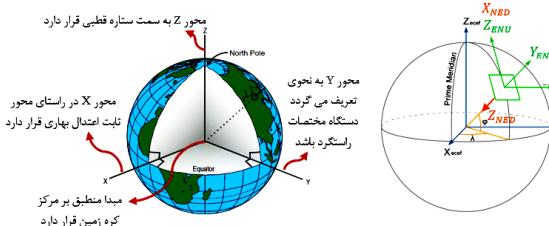


شکل ۲- نمادگذاری دناویت هارتبرگ



شکل ۳- ساختار مکانیزم نشانه روی آتن SSTL [۱۵]

که در آن سمت پایین از بستر هوایی با اعداد مثبت بیان گردد. چنین دستگاه مختصاتی با نام ان-ای-دی²⁰ شناخته شده است. دستگاه ENU و NED در حقیقت دستگاهی معادل اما با دو تعريف مجزا می‌باشد. در دستگاه مختصات NED، راستای شمال جغرافیایی به عنوان محور X، راستای شرق جغرافیایی به عنوان محور Y و راستای پایین (به سوی مرکز کره زمین) به عنوان محور Z در نظر گرفته می‌شود. این دستگاه در شکل (۵) با رنگ نارنجی نمایش داده شده است.



شکل ۵- توصیف شماتیک دستگاه‌های مختصات ECI، NED، ECEF و ENU

دستگاه مختصات مرجع بالن (BR)

می‌دانیم که به دلیل وجود اختشاشات گوناگونی همچون باد، بدنه بالن می‌تواند دچار تغییر وضعیت و انحراف از راستای مطلوب خود شود. از آنجاکه مکانیزم نشانه‌روی آتنن بر روی بدنه بالن نصب شده است، تغییر وضعیت بدنه بالن به صورت زنجیره‌وار سبب تغییر وضعیت مکانیزم نشانه‌روی آتنن نیز خواهد شد. اگر این موضوع مغفول بماند، با فرض تغییر وضعیت بدنه بالن، مکانیزم نشانه‌روی آتنن قادر به انجام نشانه‌روی صحیح به سوی هدف مطلوب نخواهد بود. بنابراین، به توصیف سیستم مختصاتی نیازمندیم که جهت‌گیری آن همواره با نظر خود می‌چرخد. مرکز این دستگاه مختصات منطبق بر مرکز کره زمین و محور X آن در راستای نصف‌النهار مبدأ قرار گرفته است. محور Z از این دستگاه مختصات نیز در جهت ستاره قطبی شمال در نظر گرفته می‌شود. در نهایت محور Y از این دستگاه مختصات نیز به گونه‌ای تعريف می‌شود که یک دستگاه مختصات سه محور عمود برهم راستگرد را تشکیل شود. در شکل (۶) این دستگاه مختصات با رنگ آبی به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

دستگاه مختصات بدنه بالن (BB)

پس از تعريف دستگاه مختصات مرجع بالن، حال نیاز به تعريف دستگاه مختصاتی داریم که بیانگر وضعیت بدنه بالن باشد. به این منظور دستگاه مختصاتی را به بدنه بالن متصل می‌کنیم به طوری که با تغییر وضعیت بدنه بالن، این دستگاه مختصات نیز تغییر جهت دهد.

دستگاه مختصات اینرسی (ECI)

طبق تعریف، مرکز یک دستگاه مختصات اینرسی¹⁸ نسبت به ستاره‌های دور دست، نباید شتاب گرفته و همین‌طور موقعیت چرخشی این دستگاه نسبت به ستاره‌های خیلی دور نباید تغییر یابد. مرکز این سیستم مختصات منطبق بر مرکز جرم زمین قرار داشته، محور X_1 در جهت نقطه اعتدال بهاری، محور Z_1 در جهت ستاره قطبی شمالی و محور Y_1 نیز در جهتی تعريف می‌شود که این سیستم مختصات راستگرد باشد. از آنجاکه محور اعتدال بهاری یک محور ثابت اینرسی بوده و محور ستاره قطبی شمالی نیز ثابت است، این دستگاه مختصات دارای دوران نبوده و صرفاً مبدأ آن با حرکت کره زمین در فضا جایه‌جا خواهد شد اما به همراه دوران کره زمین حول خود، دورانی نخواهد داشت. سیستم مختصات اینرسی در شکل (۵) به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

دستگاه مختصات ECEF

دستگاه مختصات زمین مرکز-زمین ثابت که به دستگاه مختصات ECEF مشهور است به زمین چسبیده و همواره با دوران کره زمین حول خود می‌چرخد. مرکز این دستگاه مختصات منطبق بر مرکز کره زمین و محور X آن در راستای نصف‌النهار مبدأ قرار گرفته است. محور Z از این دستگاه مختصات نیز در جهت ستاره قطبی شمال در نظر گرفته می‌شود. در نهایت محور Y از این دستگاه مختصات نیز به گونه‌ای تعريف می‌شود که یک دستگاه مختصات سه محور عمود برهم راستگرد را تشکیل شود. در شکل (۵) این دستگاه مختصات با رنگ آبی به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

دستگاه مختصات ناوبری جغرافیایی (ENU)

مرکز این دستگاه مختصات بر مرکز جرم شی مورد نظر بر روی سطح زمین منطبق است. محور X از این دستگاه مختصات در راستای شرق جغرافیایی، محور Z از این دستگاه مختصات در راستای شمال جغرافیایی و محور Y نیز عمود بر سطح زمین به سمت بالا (در خلاف جهت مرکز زمین) تعريف شده است. در شکل (۵) این دستگاه مختصات با رنگ سبز رنگ به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

شایان ذکر است در راستای آنکه زنجیره دستگاه‌های مختصات (از دستگاه ECEF تا دستگاه آتنن متصل به مکانیزم نشانه‌روی) تکمیل شود، مرکز دستگاه مختصات ای-ان-یو¹⁹ باید در نقطه‌ای از سطح زمین در نظر گرفته شود که بالن در فراز آن نقطه قرار گرفته است. در مأموریت‌هایی که در آنها از بسترهای هوایی همچون هوایپیما یا بالن استفاده می‌شود، از آنجاکه از نگاه ناظر اکثر اشیا در پایین بستر هوایی وجود دارند، بنابراین معقول است که دستگاه مختصاتی تعريف شود

با تعریف دستگاه مختصات مبنای APMR، مطابق با اصول دناویت-هارتبرگ برای تعریف دستگاههای مختصات مورد نیاز، به منظور آنکه بتوان وضعیت قرارگیری آتن و در نتیجه راستای نشانه روی شده توسط بیم آتن را بیان نمود، باید برای هر یک از مفصلهای مکانیزم نشانه روی آتن و همچنین برای آتن متصل به مکانیزم دستگاه مختصاتی مناسب را تعریف کرد. در این راستا، برای هر یک از عملگرهای مکانیزم نشانه روی آتن (موتور-۱ و موتور-۲) که مفصلهای این مکانیزم به حساب می‌آیند و همچنین برای آتن متصل به مکانیزم که نقش عملگر نهایی را بر عهده دارد، دستگاههای مختصات مناسبی تعریف می‌شود. دستگاه مختصات متصل به موتور-۱ را دستگاه M1²⁴ نامیده و مبدأ آن را در مرکز جرم موتور-۱ مفروض نموده و جهت محورهای آن را مطابق با قوانین D-H تعریف می‌نماییم. دستگاه مختصات M1 که در شکل (۷-الف) به صورت شماتیک نمایش داده شده است. تأثیر دوران ایجاد شده توسط موتور-۱ در جهت قوس افقی را بر جهت‌گیری آتن اعمال می‌نماید.

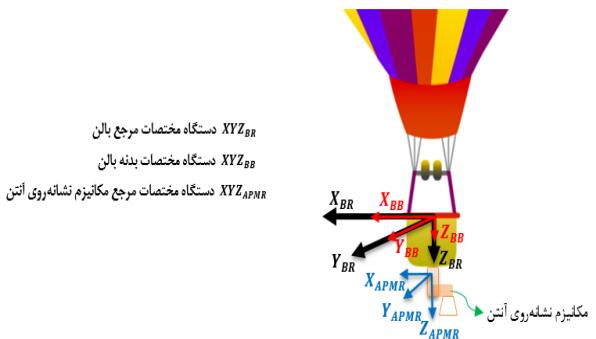
دستگاه مختصات متصل به موتور-۲، دستگاه M2²⁵ نامیده شده که مبدأ آن در مرکز جرم موتور-۲ منطبق شده و جهت محورهای آن مطابق با قوانین D-H انتخاب شده‌اند. به کمک این دستگاه، اثر دوران‌های ایجاد شده توسط موتور-۲ در جهت قوس عمودی به راستای نشانه روی شده توسط بیم آتن اعمال می‌شود. با تعریف دستگاههای مختصات M1 و M2، برای هر یک از مفصلهای مکانیزم نشانه روی آتن دستگاه مختصاتی مطابق با M2 اصول دناویت-هارتبرگ تعریف شده است. دستگاه مختصات که در شکل (۷-الف) به صورت شماتیک نمایش داده است.

با در اختیار داشتن دستگاههای مختصات APMR، M1 و M2، به دستگاه مختصاتی نیاز است که به کمک آن بتوان راستای نشانه روی شده توسط آتن را بیان نمود. این دستگاه مختصات را نامیده و مبدأ آن در مرکز جرم آتن لحاظ می‌کنیم. جهت محورهای این دستگاه مطابق با قوانین D-H لحاظ شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود، راستای محور Z از این دستگاه مختصات بیانگر جهتی که بیم آتن به آن سمت نشانه روی کرده است. لازم به ذکر است که در شکل (۷-ب)، ساختار مکانیزم نشانه روی آتن به همراه دستگاههای مختصات تعریف شده برای این مکانیزم به صورت ساده‌تر نمایش داده شده است. با این توصیف تمام دستگاه مختصات مورد نیاز تعریف شد و حال با استفاده از آن‌ها می‌توان مدل سینماتیکی مکانیزم نشانه روی آتن را استخراج کرد.

24. Motor-1 frame (M1)

25. Motor-2 frame (M2)

چنین دستگاهی را دستگاه مختصات بدن²² می‌نامیم و مبدأ آن را بر روی مرکز جرم بالن مفروض می‌کنیم. محورهای این دستگاه مختصات را نیز به نحوی تعریف می‌نماییم که در صورتی که بدن به بالن در وضعیت ایستا و مطلوب خود قرار داشته باشد (بدین معنی که به دلیل وجود اغتشاشاتی همچون باد، بدن به بالن در هوا از راستای عمودی خود منحرف نگردیده باشد)، دستگاههای مختصات بدن و مرجع بالن بر روی یکدیگر منطبق شوند. لازم به ذکر است که مطابق تعریف‌های انجام شده، دستگاه مختصات مرجع بالن دستگاهی همواره نسبت به دستگاه ENU ثابت بوده که جهت محورهای آن به هیچ نحوی تغییر نمی‌یابد، اما دستگاه مختصات بدن به بدن بالن متصل شده است و همراه با تغییر وضعیت بدن، محورهای آن تغییر جهت خواهند داد. در شکل (۶) دستگاه مختصات بدن در کنار دستگاه مختصات مرجع با رنگ قرمز نمایش داده شده است.



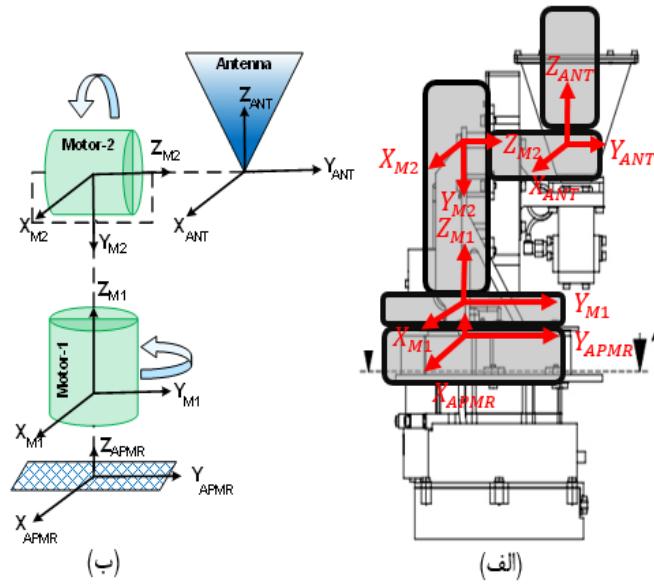
شکل ۶- نمایش شماتیک دستگاههای مختصات مرجع بالن (BR)، بدن بالن (APMR) و مرجع مکانیزم نشانه روی آتن (BB)

دستگاههای مختصات متصل به مکانیزم نشانه روی آتن

در راستای توصیف سیستم‌های مختصات مورد نیاز برای مکانیزم نشانه روی آتن مطابق با اصول دناویت-هارتبرگ، اولین دستگاه مختصات مورد نیاز در محل اتصال مکانیزم نشانه روی آتن به بدن بالن باید قرار گیرد تا به عنوان مرجعی برای بیان وضعیت سایر بخش‌های مکانیزم نشانه روی آتن (مفصل‌ها و آتن) استفاده شود. چنین دستگاهی را دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی آتن²³ نامیده، مبدأ آن را در محل اتصال مکانیزم به بالن مفروض و جهت محورهای آن را نیز همراستا با جهت محورهای دستگاه مختصات BR تعریف می‌کنیم. دستگاه مختصات APMR در شکل (۶) به صورت شماتیک با رنگ آبی و همچنین در شکل (۷) نمایش داده شده است.

22. Balloon Body (BB)

23. Antenna Pointing Mechanism Reference (APMR)

دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی آتن XYZ_{AMPR} دستگاه مختصات متصل به موتور-۱ XYZ_{M1} دستگاه مختصات متصل به موتور-۲ XYZ_{M2} دستگاه مختصات متصل به شفت XYZ_{SHT} دستگاه مختصات متصل به آتن XYZ_{ANT} 

شکل ۷ - نمایش شماتیک دستگاههای مختصات توصیف شده برای مکانیزم نشانه روی آتن مطابق با اصول دنایویت هارتبرگ

با استفاده از رابطه (۱) و جایگزین نمود پارامترهای دنایویت-هارتبرگ از جدول (۱) می‌توان تبدیلهای میان سیستم‌های مختصات تعریف شده برای مکانیزم نشانه روی آتن را به شکل معادله‌های (۲)-(۴) بدست آورد.

$${}^{APMR}T_{M1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.07 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^{M1}T_{M2} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0.111 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} {}^{M2}T_{ANT} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.085 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

که در این روابط، θ_1 و θ_2 به ترتیب بیانگر دوران ناشی از موتور-۱ و موتور-۲ می‌باشند. برای استخراج تبدیل کلی ${}^{APMR}T_{ANT}$ با خواص متوالی ماتریس‌های تبدیل بدست آمد در روابط (۴-۲) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} {}^{APMR}T_{ANT} &= {}^{APMR}T_{M1} {}^{M1}T_{M2} {}^{M2}T_{ANT} \\ &= \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 & -s\theta_1 & c\theta_1 s\theta_2 & -0.085 s\theta_1 \\ s\theta_1 c\theta_2 & c\theta_1 & s\theta_1 s\theta_2 & 0.085 c\theta_1 \\ -s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & 0.181 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5) \end{aligned}$$

در رابطه (۵) پارامترهای s و c به ترتیب بیانگر مخفف توابع \sin و \cos هستند. بدین صورت تبدیل میان دستگاه مختصات آتن و دستگاه مرجع مکانیزم مطابق معادله (۵) بدست آمد.

مدل سازی سینماتیکی

در بخش قبل به تعریف دستگاههای مختصات مناسب برای مکانیزم نشانه روی آتن پرداخته شد. همان‌طور که بیان شد، هر مکانیزم را می‌توان به صورت سینماتیکی با چهار کمیت (d_i , θ_i , α_i , a_i) تعریف نمود. چهار پارامتر مورد نیاز برای تعریف سینماتیکی مکانیزم نشانه روی آتن مورد بررسی در این مقاله، با توجه به دستگاههای مختصات تعریف شده و مشخصات ساختاری مکانیزم نشانه روی آتن SSTL در شکل (۳) به صورت ارایه شده در جدول (۱) هستند.

جدول ۱ - کمیت‌های معرف سینماتیک مکانیزم نشانه روی آتن

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
۱	.	.	۰/۷۰	.
۲	.	$-\frac{\pi}{2}$	۰/۱۱۱	θ_1
۳	.	$\frac{\pi}{2}$	۰/۰۸۵	θ_2

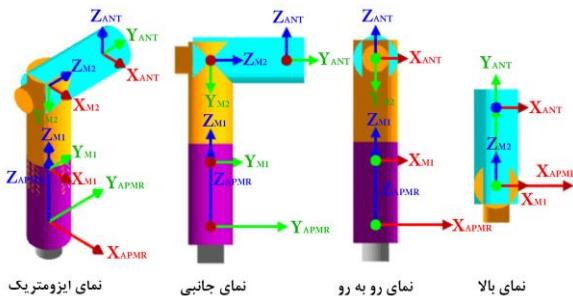
ماتریس‌های تبدیل میان دستگاههای مختصات

مطابق با اصول نمادگذاری دنایویت-هارتبرگ، ماتریس تبدیل همگن B_{i-1} به دستگاه مختصات دلخواه B_i از دستگاه مختصات دلخواه B_{i-1} توسط رابطه زیر بدست می‌آید [۲۱-۲۲].

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \alpha_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \alpha_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

اعتبارسنجی مدل سینماتیکی

در این بخش به منظور اعتبارسنجی مدل سینماتیکی استخراج شده برای مکانیزم نشانه‌روی آتنن دو درجه آزادی SSSL، از نرم‌افزار روبوآنالیز [۲۳] و همچنین جبهه ابزار روباتیک نرم‌افزار متلب [۲۴] استفاده می‌شود. با تعریف پارامترهای D-H استخراج شده در جدول (۱) در نرم‌افزار روبوآنالیز، این نرم‌افزار مدل مکانیزم نشانه‌روی آتنن را مطابق با شکل (۸) تولید می‌کند. همان‌طور که با مقایسه خروجی این نرم‌افزار در شکل (۸) و ساختار مکانیزم نشانه‌روی آتنن SSSL در شکل (۳) می‌توان مشاهده کرد، مدل استخراج شده برای مکانیزم نشانه‌روی صحیح می‌باشد. در این شکل مکانیزم نشانه‌روی آتنن مدل شده در نرم‌افزار روبوآنالیز از نهایات ایزومتریک، جانبی، رو به رو و بالا نمایش داده شده است.



شکل ۸- مدل سینماتیکی مکانیزم نشانه‌روی آتنن SSSL در نرم‌افزار روبوآنالیز

به منظور بررسی بیشتر، با تعریف یک مسیر مرجع دلخواه برای موتور-۱ و موتور-۲ که به عنوان مفصل‌های مکانیزم هستند، عملکرد مکانیزم نشانه‌روی آتنن را در جهت‌دهی بیم آتنن مطالعه می‌نماییم. بدین منظور با در نظر گرفتن زاویه دوران اولیه موتور-۱ و موتور-۲ برابر با صفر و همچنین تعریف زاویه دوران نهایی 90° و -90° به ترتیب برای موتور-۱ و موتور-۲، عملکرد مکانیزم در جهت‌دهی آتنن به صورت نمایش داده شده در شکل (۹) حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که در این شکل محور Z_{ANT} بیانگر راستای بیم آتنن متصل به مکانیزم نشانه‌روی آتنن می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، تأثیر زوایای چرخش موتور-۱ و موتور-۲ در جهت‌دهی بیم آتنن با عملکرد واقعی مکانیزم نشانه‌روی آتنن SSSL مطابق است که این مسئله صحت مدل سینماتیکی استخراج شده در این پژوهش را نمایش می‌دهد. توجه به این نکته لازم است که محور Z_{ANT} بیانگر راستای جهت‌گیری شده توسط بیم آتنن متصل به مکانیزم است. در این سناریو، زوایای اختیارشده توسط موتور-۱ و موتور-۲ از مکانیزم نشانه‌روی آتنن و همچنین موقعیت آتنن در دستگاه مختصات APMR در نرم‌افزار روبوآنالیز به ترتیب به صورت نمایش داده شده در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) حاصل شده است.

از آنجا که دستگاه‌های مختصات بدن بالن (BB) و مرجع مکانیزم نشانه‌روی آتنن (APMR) هر دو دارای محورهای هم جهت بوده و فقط مبدأ آنها متفاوت است، بنابراین ماتریس تبدیل میان دستگاه مختصات بدن بالن و دستگاه پایه مکانیزم نشانه‌روی آتنن نیز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$${}_{APMR}^{BBT} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ماتریس تبدیل میان دستگاه مختصات بدن بالن (BB) و

دستگاه مختصات مرجع بدن (BR) نیز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$${}_{BR}^{BBT} = \begin{bmatrix} c\xi c\varsigma & -c\xi s\varsigma & s\xi \\ s\xi s\xi c\varsigma + c\xi s\varsigma & -s\xi s\xi c\varsigma + c\xi c\varsigma & -s\xi c\xi \\ -c\xi s\xi c\varsigma + s\xi s\varsigma & c\xi s\xi c\varsigma + s\xi c\varsigma & c\xi c\xi \end{bmatrix} \quad (7)$$

که در رابطه فوق پارامترهای s و c به ترتیب بیانگر مخفف توابع \sin و \cos هستند و پارامترهای ζ و ξ نیز به ترتیب بیانگر زوایای دوران بدن بالن حول محورهای Z_{BR} , X_{BR} , Y_{BR} از دستگاه مختصات مرجع (BR) می‌باشند. رابطه انتقال میان دستگاه‌های مختصات مرجع بدن و ENU به صورت زیر می‌باشد [۱۷]:

$${}_{RENU} = {}_{ENU}^{ECEF} T {}_{ECEF} + \varrho \quad (8)$$

که در رابطه (۸)، R_{ECEF} و R_{ENU} به ترتیب بیانگر بردارهای موقعیت $ECEF$ در دستگاه‌های مختصات ENU و ENU بوده، $ECEF$ بیانگر ماتریس دوران میان این دو دستگاه مختصات و ϱ نیز بیانگر بردار انتقال مبدأ میان این دو دستگاه مختصات می‌باشد. ${}_{ECEF}^{ENU} T$ دارای تعاریف زیر هستند [۱۷]:

$${}_{ECEF}^{ENU} T = \begin{bmatrix} -\sin\Lambda & \cos\Lambda & 0 \\ -\sin\Delta\cos\Lambda & -\sin\Delta\sin\Lambda & \cos\Delta \\ \cos\Delta\cos\Lambda & \cos\Delta\sin\Lambda & \sin\Delta \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\varrho = \begin{bmatrix} X_U \sin\Lambda \cos\Lambda - Y_U \sin\Lambda \sin\Lambda - Z_U \cos\Lambda \\ X_U \sin\Delta \cos\Lambda - Y_U \sin\Delta \sin\Lambda - Z_U \cos\Delta \\ -X_U \cos\Delta \cos\Lambda - Y_U \cos\Delta \sin\Lambda - Z_U \sin\Delta \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در رابطه (۱۰)، X_U , Y_U و Z_U بیانگر مولفه‌های موقعیت بدن بوده و Λ و Δ نیز به ترتیب بیانگر طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی محلی بدن می‌باشند. بدین ترتیب ارتباط میان دستگاه‌های مختصات ECEF و NED نیز تشریح شد. در نهایت ماتریس تبدیل میان دستگاه‌های مختصات NED و ENU نیز به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

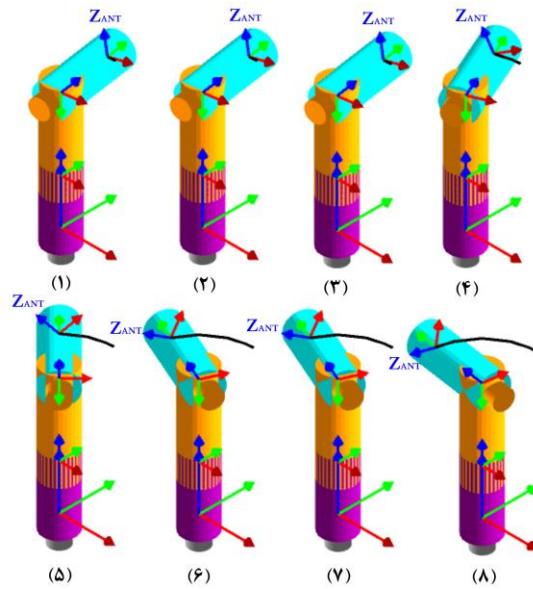
$${}_{NED}^{ENU} T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

بدین ترتیب، تمامی ماتریس‌های تبدیل میان دستگاه‌های مختصات نمایش داده شده در شکل‌های (۵) تا (۷) توصیف شدند.

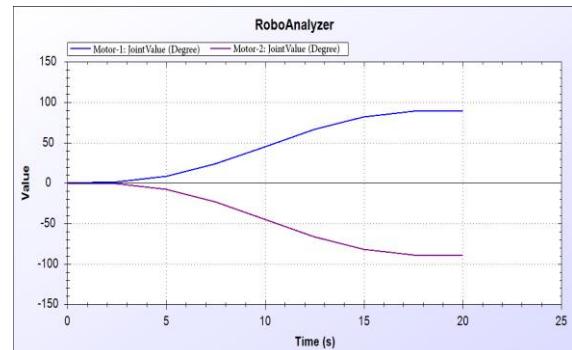


شکل ۱۱- مؤلفه های موقعیتی آتن نسبت به دستگاه APMR در مسیر مرجع شکل (۹)

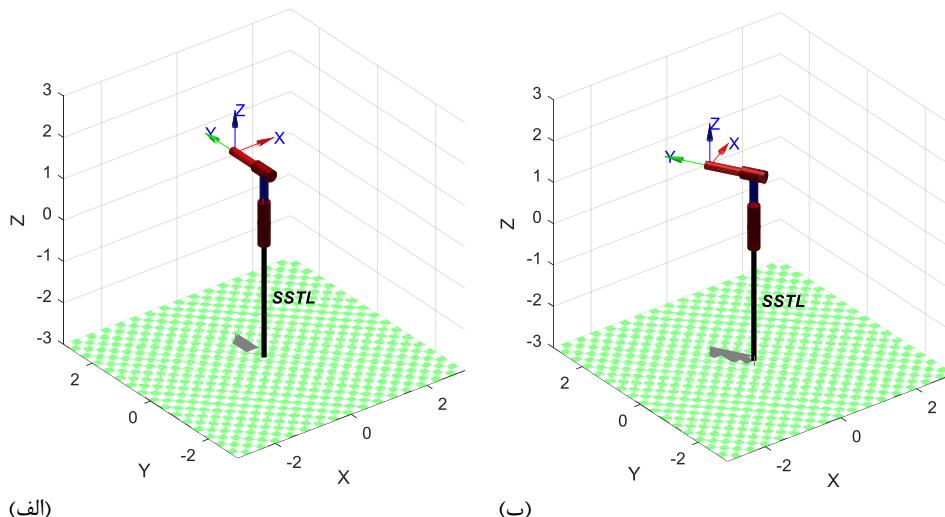
با توضیحات ارائه شده، مدل سینماتیکی استخراج شده برای مکانیزم نشانه روی آتن SSTL توسط نرم افزار روبوآنالیزر مورد تأیید قرار گرفت. به منظور بررسی بیشتر، مدل استخراج شده در این پژوهش توسط جعبه ابزار روباتیک نرم افزار متلب نیز مورد صحت سنجی قرار می دهیم. با تعریف پارامترهای D-H استخراج شده در جدول (۱) در این جعبه ابزار، خروجی مدل سینماتیکی به صورت نمایش داده شده در شکل (۱۲) حاصل می شود. شایان ذکر است که در انجام شبیه سازی بخش (الف) از این شکل، زوایای دوران موتور-۱ و موتور-۲ به ترتیب برابر با $\theta_1 = 0^\circ$ و $\theta_2 = 0^\circ$ در بخش (ب) برابر با $\theta_1 = 30^\circ$ و $\theta_2 = 0^\circ$ در بخش (ج) برابر با $\theta_1 = 0^\circ$ و $\theta_2 = 30^\circ$ و در نهایت در بخش (د) برابر با $\theta_1 = 45^\circ$ و $\theta_2 = 45^\circ$ اختیار شده اند. همان طور که در شکل (۱۲) مشاهده می شود، تأثیر زوایای موتور-۱ و موتور-۲ در جهت گیری آتن متصل به مکانیزم نشانه روی آتن SSTL به طور کامل مطابقت دارد و با براین مدل سینماتیکی استخراج شده برای مکانیزم نشانه روی آتن SSTL توسط جعبه ابزار روباتیک نرم افزار متلب نیز مورد تأیید قرار می گیرد.



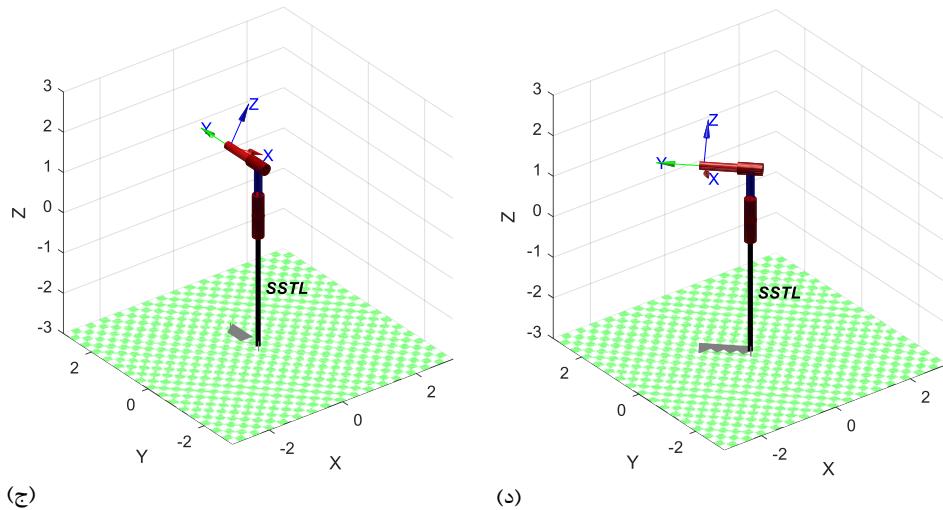
شکل ۹- تغییر جهت گیری بیم آتن با توجه به دوران موتور-۱ و موتور-۲ در نرم افزار روبوآنالیزر



شکل ۱۰- زوایای دورانی اختیار شده توسط موتور-۱ و موتور-۲ در مسیر مرجع شکل (۹)



شکل ۱۲- عملکرد مکانیزم نشانه روی آتن مدل شده در جعبه ابزار روباتیک نرم افزار متلب



ادامه شکل ۱۲ - عملکرد مکانیزم نشانه روی آتن مدل شده در جعبه ابزار روباتیک نرم افزار متلب

باشد، بردارهای $Target_{APMR}$ و $Beam_{APMR}$ باید بر یکدیگر مطابق باشند. بدین منظور با توجه به رابطه (۱۲) می‌توان نوشت:

$$\cos \theta_2 = Z_R \Rightarrow \theta_2 = \cos^{-1} Z_R \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 \sin \theta_2 &= X_R \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 &= Y_R \end{aligned} \Rightarrow \tan \theta_1 = \frac{Y_R}{X_R} \Rightarrow \theta_1 = \tan^{-1} \frac{Y_R}{X_R} \quad (14)$$

روابط (۱۳) و (۱۴) بیانگر معادلات سینماتیک وارون مکانیزم نشانه روی آتن هستند. با در اختیار داشتن مسیرهای مرجع مربوط به خودروهای هدف، روابط (۱۳) و (۱۴) بیان می‌کنند که باید آنکه بیم آتن مسیر مرجع را دنبال کند، زوایای عملگرهای مکانیزم یعنی θ_1 و θ_2 باید چه مقادیری را اختیار کنند.

فضای کار مکانیزم نشانه روی آتن

فضای کاری^۶ یک مکانیزم یا روبات در واقع فضایی را توصیف می‌کند که مکانیزم با تمام درجات آزادی در اختیار خود در مفصل‌ها قادر است المان متصل به عملگرنهای مکانیزم که در این مقاله یک آتن است را در آن موقعیت قرار دهد. چنین فضایی در واقع بیان می‌کند که مسیر مرجع می‌تواند در چه محدوده‌ای فضایی تعريف شود. در این بخش فضای کاری مکانیزم نشانه روی آتن مدل شده در این مقاله نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن ساختار مکانیزم نشانه روی آتن SSTL که در آن آتن به شفتی با طول ۴۰ متر متصل شده است، فضای کاری مکانیزم به صورت نمایش داده شده در تصاویر فوقانی (نمایی جانبی و نمایی بالا) از شکل (۱۳) است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، فضایی کاری مکانیزم دارای ساختاری شبیه-استوانه است که مرکز آن در فضای کاری وجود ندارد.

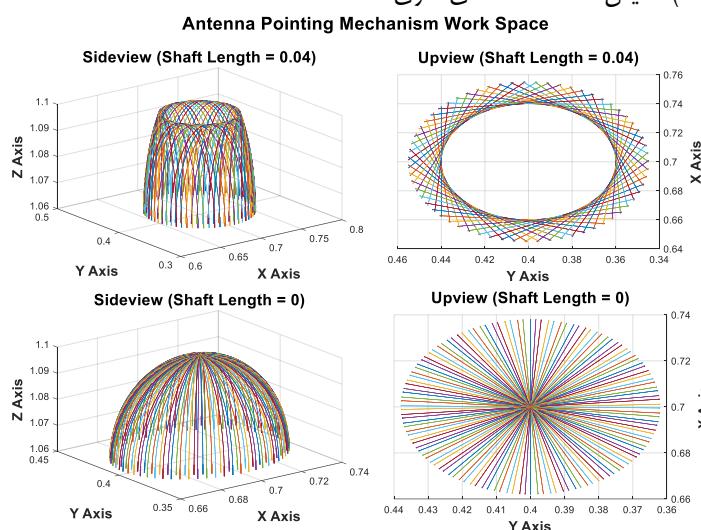
سینماتیک وارون مکانیزم نشانه روی آتن

به منظور استخراج مسیرهای مرجع مناسب برای عملگرهای مکانیزم نشانه روی آتن به نحوی که بیم آتن قادر به ردیابی مسیر مرجع مربوط به خودروهای هدف باشد، باید معادلات سینماتیک وارون مکانیزم نشانه روی آتن را در اختیار داشت. معادلات سینماتیک وارون در واقع بیان می‌کنند که به منظور آنکه بیم آتن به سمت یک هدف معین جهت‌دهی شود، هر یک از عملگرهای مکانیزم (موتور-۱ و موتور-۲) باید چه زوایایی را اختیار کنند. با توجه به شکل (۷)، جهت بیم آتن مطابق بر بردار واحد $[0 \ 0 \ 1]^T$ از دستگاه مختصات متصل به آتن (ANT) است. به منظور استخراج معادلات سینماتیک وارون، این بردار واحد که بیانگر جهت‌گیری بیم آتن است، با استفاده از رابطه (۵) به دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی آتن (APMR) منتقل می‌شود که نتیجه این انتقال به صورت زیر است:

$$Beam_{APMR} = {}_{ANT}^{APMR}T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $Beam_{APMR}$ بیانگر بردار نشانه روی بیم آتن بیان شده در در دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی آتن می‌باشد. از سوی دیگر، فرض کنید که مسیر مرجع مربوط به خودروهای هدف با استفاده از روابط (۶) تا (۱۱) از دستگاه مختصات دستگاه مختصات مرجع مکانیزم نشانه روی آتن منتقل شده باشد و $Target_{APMR} =$ پس از نرمال‌سازی به صورت $[X_R \ Y_R \ Z_R]^T$ نمایش داده شود. در راستای آنکه جهت نشانه روی بیم آتن مطابق بر مسیر مرجع مربوط به خودروهای هدف

مکانیزم با در نظر گرفتن طول شفت صفر، نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها می‌توان دریافت، اگر طول شفت صفر باشد، فضای کاری دارای ساختاری شبه-کره خواهد بود که تمام ناحیه حول مکانیزم را پوشش خواهد داد.



شکل ۱۳- فضای کاری مکانیزم نشانه‌روی آنتن با طول شفت صفر و ۰.۰۴

روش‌های متعددی برای بیان ماتریس ممان اینرسی وجود دارد که در این مقاله از بیان استفاده شده در مراجع [۳۹-۳۵] استفاده می‌شود. فرض کنید که زیر-ماتریس‌های ممان اینرسی^{۳۷} مربوط به بخش‌های دوران‌ساز قوس افقی و قوس عمودی از مکانیزم نشانه‌روی آنتن به ترتیب به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) باشند.

$$J_{\text{Azimuth-Part}} = \begin{bmatrix} J_{axx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{ayy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{azz} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$J_{\text{Elevation-Part}} = \begin{bmatrix} J_{exx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{eyy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{ezz} \end{bmatrix} \quad (19)$$

که در این روابط با توجه به تقارن هندسی بخش‌های دوران‌ساز قوس افقی و قوس عمودی، ممان‌های اینرسی جانبی (J_{ayz} , J_{axz} , J_{axy} , J_{exz} , J_{eyz} , J_{exy}) ناچیز بوده و برابر صفر لحاظ شده‌اند. ماتریس ممان اینرسی مکانیزم نشانه‌روی آنتن ($M(\theta)$ به صورت رابطه (۲۰) بیان می‌شود [۴۰-۴۲].

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} 0.17 + J_{ayy} + J_{ezz} \cos^2 \theta_2 + J_{exx} \sin^2 \theta_2 & 0 \\ 0 & J_{eyy} \end{bmatrix} \quad (20)$$

ماتریس نیروهای کوریولیس، گریز از مرکز و ژیروسکوپی $C(\theta, \dot{\theta})$ نیز به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۱]:

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 (J_{exx} - J_{ezz}) \sin \theta_2 \cos \theta_2 & \dot{\theta}_1 (J_{exx} - J_{ezz}) \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 (J_{ezz} - J_{exx}) \sin \theta_2 \cos \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

این موضوع از وجود شفت در ساختار مکانیزم SSTL ناشی می‌شود. از آنجاکه آنتن متصل به مکانیزم دارای پهنه‌ای بیم است، این فضای تهی توسط بیم آنتن پوشش داده می‌شود و بنابراین این موضوع خدشهای در فضای تحت پوشش آنتن ایجاد نخواهد کرد. در تصاویری که در بخش‌های زیرین شکل (۱۳) نمایش داده شده، فضای کاری

مدل دینامیکی مکانیزم نشانه‌روی آنتن

در این بخش، به بیان دینامیک مکانیزم نشانه‌روی آنتن پرداخته می‌شود. دینامیک مکانیزمهای نشانه‌روی آنتن مورد بحث در این مقاله که دارای دو مفصل لولایی (که از دو موتور DC به عنوان عملگر استفاده می‌کنند) را می‌توان با توجه به مدل لاغرانژ مکانیزم‌های روباتیکی کابل-محور [۲۵-۲۹] به صورت رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) بیان کرد [۳۴-۳۰]:

$$(M(\theta) + r^2 J_m) \ddot{\theta} + (C(\theta, \dot{\theta}) + r^2 B_m) \dot{\theta} + G(\theta) = r K_r I \quad (16)$$

$$L \dot{I} + R I + K_m \dot{\theta} = u \quad (17)$$

در این روابط، $\theta \in \mathbb{R}^2$ بیانگر برداری از زوایای مفصل‌های مکانیزم معنی θ_1 و θ_2 بوده، $I \in \mathbb{R}^2$ بیانگر بردار جریان آرمیچر موتورهای DC مکانیزم، $u \in \mathbb{R}^2$ بیانگر بردار ولتاژ آرمیچیر موتورهای مکانیزم، $M(\theta)$ بیانگر ماتریس ممان اینرسی مکانیزم نشانه‌روی آنتن، $C(\theta, \dot{\theta})$ بیانگر ماتریس نیروهای کوریولیس، گریز از مرکز و ژیروسکوپی، $G(\theta)$ بردار نیروی گرانش، J_m ماتریس ممان اینرسی عملگرهای مکانیزم، B_m ماتریس قطری ترم‌های میراساز، K_r ماتریس تبدیل الکترومکانیکی میان جریان و ولتاژ، r نسبت دندۀ L ماتریس القای موتور، R ماتریس مقاومت موتور و K_m نیز ماتریس مشخصه ولتاژ ثابت موتورهای مکانیزم می‌باشند.

از ۱۰ برابر افزایش یافته است. در ادامه این راه که در قالب بخش دوم این مقاله منتشر خواهد شد، با استفاده از نتایج بدست آمده در این مقاله به استخراج معادلات مورد نیاز برای طراحی مسیر مرجع نشانه‌روی آتن، طراحی مودهای عملیاتی مکانیزم نشانه‌روی و طراحی کترل کننده مناسب پرداخته خواهد شد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندها بیان نشده است.

مراجع

- [1] S. A. Khaleefa, S. H. Alsamhi, and N. S. Rajput, "Tethered balloon technology for telecommunication, coverage and path loss" *IEEE Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS) conference*, pp. 1-4, 2014.
- [2] A.A. Kanoria, R. S. Pant, "Winged aerostat systems for better station keeping for aerial surveillance", *International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (CMAE 2011)*, pp. 273-277, 2011.
- [3] P. Bilaye, V. N. Gawande, U. B. Desai, "Low cost wireless internet access for rural area using tethered aerostat", *3rd International Conference on Industrial and Information System*, pp. 1-5, Dec 2008.
- [4] P. Chopra, Rmanchanda, Rmehrotra, S.jain, "A new technology for telecom and broadband Services in spars, remote and hilly area", *WSEAS transactions on communication*, vol. 10, Issue. 9, 2011.
- [5] J. Hall, "A Survey of Titan Balloon Concepts and Technology Status", *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 2011.
- [6] S. H. Alsamhi, F. A. Almaliki, O. Ma, M. S. Ansari and M. C. Angelides, "Correction to: Performance optimization of tethered balloon technology for public safety and emergency communications", *Journal of Telecommunication Systems*, 2019.
- [7] D. Grace, M. Mohorcic, M. Oodo, M. Capstick, M. B. Pallavicini, and M. Lalovic, "CAPANINA communications from aerial platform networks delivering broadband information for all," *Proceedings of the 14th IST Mobile and Wireless and Communications Summit*, 2005.
- [8] A.A. Raina, "Conceptual Design of High Altitude Aerostat for Studying Snow Patterns", *International Symposium on Snow and Avalanches: Processes & effects of global climatic change ISSA*, 2009.
- [9] A. Raina, "Enhanced methodology for arriving at the baseline specifications of a non-rigid airship", *18th AIAA Lighter-Than-Air (LTA) Systems Technology Conference*, USA, 2009.
- [10] P. Bilaye, V. Gawande, U. Desai, A. Raina, and R. Pant, "Low cost wireless internet access for rural areas using tethered aerostats," in *Industrial and Information Systems, IEEE Third International Conference on ICIIS*, pp. 1-5, 2008.
- [11] L. Coy, M. R. Schoeberl, S. Pawson, and R. W. Carver, "Global assimilation of Loon stratospheric balloon observations", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019.
- [12] R. M. P. K. Chopra, R. Mehrotra, S. Jain, "A New Topology for Telecom and Broad Band Services in Spars, Remote and Hilly Areas", *WSEAS Transactions on*

بردار نیروی گرانش $G(\theta)$ نیز به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۰-۴۲]:

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ k_g \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

با انتخاب متغیرهای حالت $x_4 = x_3 = I_1$ $x_2 = \dot{\theta}_1$ $x_1 = \theta_1$ معادلات (۱۶) و $x_6 = I_2$ $x_5 = \dot{\theta}_2$ θ_2 را در می‌توان به فرم فضای حالت زیر نوشت:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{[-x_2 x_5 (J_{exx} - J_{ezz}) \sin(2x_4) - x_2 r^2 B_{m1} + r K_{r1} x_3]}{0.17 + J_{ayy} + J_{exx} \sin^2(x_4) + J_{ezz} \cos^2(x_4) + r^2 J_{m1}} \\ \dot{x}_3 = \frac{-R_1 x_3 - K_{m1} x_2 + u_1}{L_1} \\ \dot{x}_4 = x_5 \\ \dot{x}_5 = \frac{[-x_5^2 \left(\frac{J_{ezz} - J_{exx}}{2}\right) \sin(2x_4) - r^2 B_{m2} x_5 - K_g \sin(x_4) + r K_{r2} x_6]}{J_{eyy} + r^2 J_{m2}} \\ \dot{x}_6 = \frac{-R_2 x_6 - K_{m2} x_5 + u_2}{L_2} \end{cases} \quad (23)$$

که رابطه (۲۳) مدل دینامیکی مکانیزم نشانه‌روی آتن SSTL شامل دینامیک عملگرهای مکانیزم در فضای حالت توصیف می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با هدف پوشش‌دهی وسیع یک منطقه در شرایط اورژانسی جهت برقراری ارتباط مخابراتی میان دو خودروی هدف توسط یک بالن مقید، به معروف ساختار یک بالن مجهز به مکانیزم نشانه روی آتن پرداخته شد. هدف از طراحی ساختار بالن معروف شده آن است با در اختیار داشتن بردارهای موقعیت خودروها به کمک حسگرهای GPS، مکانیزم نشانه‌روی قادر به جهت‌دهی آتن به سمت خودروها برقرار شود. از آنجا که حسگرهای GPS ارتباط مخابراتی میان خودروها برقرار شود. در اینجا که حسگرهای ECEF قادر به موقعیت خودروها را در دستگاه مختصات ECEF بیان می‌نمایند، به منظور آنکه بتوان بیم آتن متصل به بالن را به نحوی جهت‌دهی نمود که به سمت خودروها نشانه‌روی کند، لازم است تا ارتباط معناداری میان دستگاه مختصات متصل به آتن و دستگاه ECEF ایجاد شود. در این راستا، دستگاه‌های مختصات مورد نیاز میان آین دو دستگاه تعریف شده و ماتریس‌های تبدیل میان آنها استخراج شد. همچنین، در این مقاله به مدل‌سازی سینماتیک مستقیم و وارون مکانیزم نشانه‌روی آتن پرداخته شد تا با استفاده از آن‌ها بتوان مسیر مرجع مناسب برای جهت‌دهی آتن متصل به بالن را تولید نمود. مدل سینماتیکی مکانیزم نشانه‌روی آتن استخراج شده در این پژوهش، توسط نرم‌افزار روی‌آنالیزر و همچنین جعبه ابزار روباتیک نرم‌افزار متلب مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و تأیید شد. در نهایت، با نمایش فضای کاری مکانیزم نشانه‌روی آتن مدل شده، نشان داده شد که با استفاده از ساختار بالن مجهز به مکانیزم نشانه‌روی آتن معروف شده، مهمترین عیب استفاده از بستر بالنهای مقید برای کاربردهای مخابراتی که ناحیه تحت پوشش کوچک می‌باشد مرتفع می‌شود، به طوری که ناحیه تحت پوشش در این ساختار نسبت به بالنهای مقید قادر مکانیزم نشانه‌روی آتن، بیش

- network”, International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 15, pp. 952–958, 2017.
- [31] S. Mobayen, F. Tchier and L. Ragoub, “Design of an adaptive tracker for n-link rigid robotic manipulators based on super-twisting global nonlinear sliding mode control”, *International Journal of Systems Science*, Vol. 48, No. 9, pp. 1990–2002, 2017.
- [32] Z. Qiu, C. Li and X. Zhang, “Experimental study on active vibration control for a kind of two-link flexible manipulator”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 118, pp. 623–644, 2019.
- [33] Y. Wang, B. Li, F. Yan and B. Chen, “Practical adaptive fractional-order nonsingular terminal sliding mode control for a cable-driven manipulator”, *International Journal of Robust Nonlinear Control*, Vol. 29, pp. 1396–1417, 2019.
- [34] A. Xiao and S. Yin, “Exponential Tracking Control of Robotic Manipulators With Uncertain Dynamics and Kinematics”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 2, pp. 689–698, 2019.
- [35] X. Yang, S. Ge and W. He, “Dynamic modelling and adaptive robust tracking control of a space robot with two-link flexible manipulators under unknown disturbances”, *International Journal of Control*, Vol. 91, No. 4, pp. 969–988, 2018.
- [36] S. Yi and J. Zhai, “Adaptive second-order fast nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators”, *ISA Transactions*, Vol. 90, pp. 41–51, 2019.
- [37] V. Sangveraphunsiri and K. Malithong. “Robust Inverse Dynamics and Sliding Mode Control for Inertial Stabilization Systems”, *Asian International Journal of Science and Technology*, in Production and Manufacturing Engineering, 2009.
- [38] Ekstrand and Bertil, “Equations of motion for a two-axes gimbal system.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, no. 3, 2001.
- [39] P.J. Kennedy and R.L. Rhonda, “Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 1, 2003.
- [40] S. B. Kim, S. H. Kim, and Y. K. Kwak, “Robust control for a twoaxis gimbaled sensor system with multivariable feedback systems”, *IET Control Theory & Applications*, vol. 4, no. 4, 2010.
- [41] J. Mendez and et al, “Design of A Three–Axis Rotary Platform” Florida Conference on Recent Advances in Robotics–FCRAR, 2010.
- [42] R. Jahanandish, A. Khosravifard and R. Vatankhah, “Determination of uncertain parameters of a two-axis gimbal and motion tracking via Fuzzy logic control approach”, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 39, no. 5, pp. 6565–6577, 2020.
- [43] M. Khayatian and M.M. Arefi, “Adaptive dynamic surface control of a two-axis gimbal system”, *IET Science, Measurement & Technology*, 2016.
- [44] P. Wongkamchang and V. Sangveraphunsiri, “Control of Inertial Stabilization Systems Using Robust Inverse Dynamics Control and Adaptive Control”, *International Journal of Science and Technology*, Vol. 131, No. 2, 2008.
- [13] Communication, vol. 10, pp. 273–286, 2011.
- [14] S. H. Alsamhi, S. K. Gupta and N. S. Rajput, “Performance evaluation of broadband service delivery via tethered balloon technology”, 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIIS), 2016.
- [15] Ferris M. and Phillips N. The Use and Advancement of an Affordable, Adaptable Antenna Pointing mechanism. 14th European Space Mechanisms & Tribology Symposium, Germany, 2011.
- [16] Data Sheet: www.sstl.co.uk/getattachment/8627793a-3713-4bca-a720-9b28d8d06748/
- [17] High-Gain-X-Band-Antenna-Pointing-Mechanism
- [18] Data Sheet: www.space-airbusds.com/en/equipment/antenna-pointing-mechanisms/equipment-n5x.html
- [19] M. Fathi, J. Ranjbar "Kinematic modeling of a pointing mechanism on a two-degree-of-freedom antenna to establish telecommunication communication between two vehicles in emergency situations using a tethered balloon platform," presented at the 5th National Conference of Electrical and Mechatronics Engineering of Iran, Khwaja Nasiruddin Tosi University of Technology, December 2018 (in persian).
- [20] K S Fu, Ralph Gonzalez, C S G Lee, “Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence”, Tata McGraw-Hill, pp. 12 – 20, 2008.
- [21] Jolly Atit Shah, S.S. Rattan, B.C. Nakra, “End-Effector Position Analysis Using Forward Kinematics For 5 DOF Pravak Robot Arm”, *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, Vol. 2, No. 3, pp. 112–116, September 2013.
- [22] John J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control, Third edition, McGraw-Hill, 2005.
- [23] Z. Ju, C. Yang and H. Ma, “Kinematics Modeling and Experimental Verification of Baxter Robot”, IEEE International Symposium on Control, 2014.
- [24] R.R. Serrezzuela, A.F.C. Chavarro and M.A.T. Cardozo, “Kinematic Modeling of a Robotic Arm Manipulator Using Matlab”, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 12 (7), 2017.
- [25] V. Gupta, R. G. Chittawadigi S. K. and Saha, “RoboAnalyzer: Robot Visualization Software for Robot Technicians,” *Advances in Robotics (AIR2017)*, 2017.
- [26] P.I. Corke, *Robotics, Vision & Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*. Second edition. Springer, 2017. ISBN 978-3-319-54413-7.
- [27] Y. Wang, J. Chen, F. Yan, K. Zhu and B. Chen, “Adaptive super-twisting fractional-order nonsingular terminal sliding mode control of cable-driven manipulators”, *ISA Transactions*, Vol. 86, pp. 163–180, 2019.
- [28] A. Izadbakhsh and S. Khorashadizadeh, “Robust task-space control of robot manipulators using differential equations for uncertainty estimation”, *Robotica*, Vol. 35, No. 9, pp. 1923 – 1938, 2017.
- [29] A. Izadbakhsh, “FAT-based robust adaptive control of electrically driven robots without velocity measurements”, *Journal of Nonlinear Dynamics*, Vol. 89, pp. 289–304, 2017.
- [30] S. Jung, “Stability analysis of reference compensation technique for controlling robot manipulators by neural

COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

