رفع تداخل و عدم برخورد سه بعدی بین چندین پرنده براساس اولویت پروازی با استفاده از نظریه بازی

مسعود میرزایی تشنیزی[1]، امیررضا کوثری[2]، سعید شاخصی[3]

۱ دانشجو دکتری مهندسی هوافضا، دانشکده علوم وفنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

۲ دانشیار، دانشکده علوم وفنون نوین، دانشگاه تهران، تهران،kosari_a@ut.ac.ir

۳ دانشیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۰۷

چکیده

رفع تداخل بین چند هواپیما در ارتفاع پایین با استفاده از نظریه بازی‌های دیفرانسیلی هدف اصلی این تحقیق است. رفع تداخل بین چند هواپیما، بصورت بازی دیفرانسیلی همکارانه با اطلاعات کامل و با استفاده از روش غیر حداقلی مورد بررسی می‌گیرد. در این تحقیق مسئله بصورت یک بازی دیفرانسیلی غیرخطی مقید مطرح و با استفاده از ترکیب وزن دار توابع هدف هواپیماهای متداخل به یک تابع هدف واحد تبدیل می‌گردد. تابع هدف بدست آمده به همراه تمام قیود عملکردی و محیطی با استفاده از روش شبه طیفی به صورت یک برنامه‌ریزی غیرخطی حل خواهدشد. دینامیک سه درجه آزادی جرم ثابت و با در نظر گرفتن قیود عملکردی برای مدلسازی تداخل بین هواپیماها استفاده می‌گردد. همچنین به منظور صحه سنجی، مسئله رفع تداخل در چهار مثال مختلف با استفاده از مشخصات عملکردی یک هواپیمای واقعی و براساس قوانین پرواز در ارتفاع پایین حل خواهدشد. در این مثال‌ها تاثیر ضرایب اولویت بر مسیر پروازی، بررسی موقعیت بهینه برای شروع مانور، تاثیر وجود مانع و محدودیت فضای پروازی در فضای دو بعدی و سه بعدی مورد بررسی قرار خواهدگرفت. نتایج نشان می‌دهد که در رفع تداخل تعیین اولویت پروازی باعث تاثیر بر تلاش کنترلی و مسیر پروازی هر یک از هواپیماهای متداخل می‌گردد. این اولویت پروازی براساس نیاز خطوط هواپیمایی می‌تواند میزان تاخیر پرواز، تعداد مسافر و یا ... باشد.

واژگان کلیدی

رفع تداخل، بازی دیفرانسیلی، شبه طیفی، اولویت پروازی، مانع ثابت.

۱. مقدمه

پرواز انواع پرنده در فضای شهری رو به گسترش است. پروژه‌هایی مانند تاکسی هوایی، حمل و نقل کالا، ماموریت‌های نظارتی و تصویربرداری و ... از جمله تکنولوژی‌های رو به پیشرفت می‌باشند که هدف آنها کاهش ترافیک سطح شهر و استفاده از بعد سوم برای جابجایی و حمل و نقل می‌باشد. اغلب این پروازها در فضای بدون کنترل صورت می‌گیرد، که تحت نظارت مرکز کنترل ترافیک هوایی نمی‌باشد [۱]. مدیریت ترافیک هوایی شامل کنترل ترافیک هوایی، پرسنل تجهیزات امنیتی، هواشناسی هوانوردی، سیستم‌های ناوبری هوایی، مدیریت مرز هوایی، خدمات ترافیک هوایی و جریان ترافیک هوایی در تمام مراحل پرواز از فاز برخاست، عبور از مرزهای هوایی و فرود در فرودگاه‌ها است [۲]. قسمتی از فضای پروازی خارج از محدوده سرویس مدیریت ترافیک با عنوان فضای بدون کنترل می‌باشد. در پرواز بصری، از نظر سازمان بین المللی هواپیمایی غیر نظامی، کلاس پروازی E و G از جمله فضای پروازی بدون کنترل می‌باشند. فضای پروازی E و G شامل تمام فضای شهری بجز مناطق اطراف فرودگاه‌ها است (فضای اطراف فرودگاه‌ها جز فضای B ,C,D است که تحت کنترل مرکز ترافیک هوایی است). همچنین محدوده بالای فضای E تا ارتفاع ۱۸۰۰۰ پا از سطح دریا و پایین فضای A تعریف می‌گردد. در فضای پروازی E و G (از این پس با عنوان فضای پرواز شهری بیان می‌گردد) پروازها بر اساس قوانین پرواز بصری (VFR[1]) می‌باشند. در پرواز بصری خلبان اجازه دارد بر اساس میدان دید خود طبق استانداردهای ایمنی پرواز در مناطق خارج از کنترل مرکز ترافیک هوایی پرواز کند. بر اساس این قوانین محدوده دید افقی خلبان حداقل ۱۵۰۰ متر و محدوده دید عمودی ۶۰۰ پا می‌باشد. سایر قوانین و مقررات حاکم بر این فضاهای پروازی بر اساس قوانین پرواز در ارتفاع پایین است[۲].

همانطور که بیان شد، یکی از وظایف مدیریت ترافیک هوایی، بررسی مسیر هواپیماها از نظر تداخل بین مسیرها می‌باشد، موضوعی که به عنوان هدف اصلی در این پژوهش به آن پرداخته شده است. با افزایش درخواست استفاده از فضای پرواز شهری و افزایش تعداد هواپیماها و با توجه به اینکه این فضا خارج از محدوده کنترل است، مسئله تداخل مسیر و رفع آن اهمیت بسیار زیادی پیدا می‌کند. مسیر پروازی هواپیما از سه منظر قابل بررسی است که عبارتند از، مسیریابی اولیه پرواز، تشخیص برخورد با موانع یا و رفع تداخل. در این پژوهش موضوع رفع تداخل و اصلاح مسیر به عنوان موضوع اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه پرنده در فضای خارج از کنترل ترافیک هوایی است، یکی از مسائل مهم تداخل همزمان چندین هواپیما در یک ناحیه است که بایستی برای جلوگیری از برخورد مسیر پروازی خود را اصلاح نمایند. مشابه مفهوم پرواز آزاد [۳]، که هر هواپیما در ناحیه تداخل مسیر خود را اصلاح می‌نماید، چنین مفهومی را می‌توان در مسیرهای شهری مطابق با استانداردهای پرواز ارتفاع کم نیز در نظر گرفت. در صورتی که هر یک از هواپیماها بصورت یک عامل مستقل و با هدف مشخص در نظر گرفته شوند، مسئله رفع تداخل را می‌توان بصورت یک بازی دیفرانسیلی بیان کرد. در این مسئله هر هواپیما به عنوان یک بازیکن مطرح می‌شود که با توجه به هدف خود که متاثر از سایر بازیکن‌ها (هواپیماهای متداخل) است بایستی یک مسیر رفع تداخل را انتخاب نماید. با توجه به اینکه در این مسئله متغیرهای بردار حالت بصورت یک تابع دیفرانسیلی هستند یک بازی دیفرانسیلی مطرح می‌گردد. همچنین با توجه به قابلیت ارتباط بین هواپیماها از طریق گیرنده ADS-B[2] ، هر کدام از پرنده‌ها قادر به اشتراک اطلاعات پرواز، مشخصات هواپیما، موقعیت هواپیما، ارتفاع،سرعت و اطلاعات و پیام های اضطراری می‌باشند. لذا بازی دیفرانسیلی یک بازی با اطلاعات کامل است. در تعریف مسئله رفع تداخل خلبان در محدوده دید خود هواپیمای متداخل را تشخیص می دهد، سپس با کمک سیستم گیرنده–فرستنده ADS-B مسیر حرکت خود را با مسیر حرکت هواپیمای متداخل بررسی کرده در صورتی که تداخل وجود داشته باشد، مانور رفع تداخل همکارانه براساس اولویت پروازی انجام می گیرد. فضای رفع تداخل می‌تواند بسیار بزرگتر از میدان دید خلبان در نظر گرفته شود، در این صورت خلبان بایستی ناحیه بزرگتری را هربار تحت نظر قرار دهد و تعداد هواپیماهایی که در ناحیه تداخل قرار می‌گیرند بیشتر می‌شده و باعث افزایش بررسی تعداد تداخل‌های غیر ضروری می‌گردد. همچنین کوچک کردن بیش از حد این ناحیه نیز باعث ایجاد خطر و عدم وجود زمان کافی برای انجام مانور رفع تداخل می‌گردد.

موضوع رفع تداخل و بهینه‌سازی مسیر در چند دهه اخیر مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. مسئله رفع تداخل به عنوان

یک مسئله بهینه‌سازیبا استفاده از روش مونت کارلو [۴]، برنامه‌ریزی غیرخطی [۵]، برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط با عدد صحیح [۶]، اصل حداقل سازی [۷] مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال، در مرجع [۵] با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی مسئله رفع تداخل متمرکز بین چندین هواپیما با در نظر گرفتن قیود حالت و کنترل حل شده است. در این مرجع نرم سرعت و زوایای مسیر و سمت به عنوان تابع هزینه در نظر گرفته شده که معیار مناسبی برای کمترین مانور نمی‌باشد. همچنین مسئله حداکثر تعداد هواپیما در یک مسئله رفع تداخل با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط با عدد صحیح موضوع اصلی مرجع [۶] می‌باشد. در این مرجع از کنترل سرعت بدون در نظر گرفتن قیود عملکردی مسئله رفع تداخل بررسی شده است که نمی‌تواند تداخل‌های روبرو را حل کند. در مرجع [۸]، بدون در نظر گرفتن معیار بهینگی با استفاده از نظریه گراف‌ها، صرفا مسئله رفع تداخل هواپیماها مطرح گردیده است. همچنین در مرجع [۹] بر اساس اطلاعات آماری، با استفاده از روش بهینه‌سازی چند متغیره مسیرهای بدون تداخل بر اساس منافع ایرلاین‌ها و ارائه دهنده‌های سرویس ناوبری هوایی، بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های عملکردی هواپیماها محاسبه شده است. معیار تداخل بصورت استوانه با ابعاد مشخص در مرجع [۱۰] مطرح گردیده است که با توجه به عدم پیوستگی تابع ریاضی معیار تداخل، قابلیت پیاده سازی را نداشته و سپس معیار تداخل بصورت یک بیضی‌گون در نظر گرفته شد. در این مرجع مسئله بصورت حل غیر حداقلی[۳] حل شده و به منظور صحه سنجی مثالی شامل هشت هواپیمای متداخل براساس قوانین پرواز آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مسئله رفع تداخل بین دو جریان مختلف از هواپیماهای متداخل موضوع مورد علاقه بسیاری از محققان بوده است[۱۱]، [۱۴]. در این مراجع هدف رفع تداخل بین دو یا چند جریان از هواپیماها است که در نقطه ای به هم برخورد می‌کنند. به دلیل اینکه صرفا مسیر رفع تداخل هدف اصلی این مقالات است، مدل سینماتیک و حرکت در صفحه استفاده شده است. مرور کامل و دسته بندی انواع روش‌های رفع تداخل از نظر فضای رفع تداخل، نحوه انتشار بردار حالت، معیار تداخل، الگوریتم‌های رفع تداخل، نوع مانورها و تداخل بین دو یا چند پرنده مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵].

در مسئله رفع تداخل، هواپیماها می‌توانند با مشارکت یکدیگر و بر اساس توابع هدف تمام هواپیماهای متداخل بهترین مسیر را انتخاب نمایند که منتج به بازی همکارانه می‌گردد. از نظریه بازی‌ها در مسائل مختلف مهندسی از جمله مسئله حرکت ربات‌های چرخ دار [۱۶]، پرواز هماهنگ مجموعه پرنده‌های بدون سرنشین [۱۷]، [۱۸] ، مسائل تعقیب و گریز [۱۹]، [۲۰] استفاده شده است. حرکت چند عامل در صفحه با حضور موانع ثابت بصورت یک بازی دیفرانسیلی موضوع اصلی مرجع [۲۱] است. در این تحقیق سرعت به عنوان ورودی کنترلی و موقعیت به عنوان بردار حالت سیستم در نظر گرفته شده است. تفاوت مرجع [۱۶] با مرجع [۲۱] تنها در دینامیک وسیله مورد بررسی است. در هیچ یک از این دو مرجع برای بردار حالت و بردار کنترل قیدی در نظر گرفته نشده است. همچنین در تحقیق مشابه، مسئله رفع تداخل بین دو هواپیما در یک صفحه با استفاده از نظریه بازی دیفرانسیلی بدون در نظر گرفتن قیود بردار حالت و کنترل مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲]. در مسائل مربوط به نظریه بازی با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده، روش‌های تحلیلی [۲۱]، [۲۳] و حل عددی [۲۰]، [۲۴]، [۲۵] مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال در مرجع [۲۵]، تعادل نش بازی دیفرانسیلی با استفاده از روش شبه طیفی[۴] و چند جمله‌ای‌های چبیشف بدست آمده است. در مسئله عدم برخورد و رفع تداخل با در نظر گرفتن محدودیت‌های بردار حالت و کنترل و قیود مسیر جواب تحلیلی بسته ندارد و لذا بایستی از روش‌های حل عددی استفاده کرد [۲۶]. روش شبه طیفی یک روش حل مستقیم است که با استفاده از آن معادلات دیفرانسیل (معمولی و پاره ای) به معادلات غیرخطی و عملگر انتگرال به مجموع تبدیل می‌گردد [۲۷]. در حل مسائل کنترل بهینه غیرخطی با وجود قیود مساوی و نامساوی بردار حالت و کنترل روش شبه طیفی به راحتی با تخمین بردار حالت و کنترل با استفاده از چند جمله‌های چبیشف و یا لژاندر، مسئله را به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی می‌نگارد که قابل حل و پیاده‌سازی می‌باشند [۲۵]، [۲۸]. همچنین با استفاده از این روش نیاز به تخمین اولیه بردار شبه حالت نمی‌باشد [۲۷]. از طرفی با استفاده از شرط لازم بهینگی در مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی (با استفاده از شرایط کاروش–کوهن–تاکر[۵]) می‌توان بردار شبه حالت را نیز محاسبه کرد. از این روش برای حل مسائل گوناگون بهینه‌سازیمسیر، رفع تداخل و... در

ماموریت‌های هوایی و فضایی استفاده شده است[۲۸] تا [۳۱]. همچنین در مسئله حرکت پرنده ها در محیط های شهری مرجع [۳۷] به بررسی حرکت چندین پرنده بدون سرنشین در محیط شهری پرداخته است. در این پژوهش مسیریابی بدون برخورد بین چند پرنده بدون سرنشین در یک محیط شهری بصورت خودگردان و خارج از کنترل ایستگاه زمینی موضوع این پژوهش می‌باشد. اما در این پژوهش قیدهای عملکردی هواپیماها در نظر گرفته نشده است. همچنین در مرجع [۳۸] موضوع مسیرهای بدون برخورد و رفع تداخل در صفحه برای مجموعه پرنده های با استفاده از الگوریتم اکتشافی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق مسئله مسیرهای بدون برخورد در سناریوهای مختلف پیاده سازی شد و مسیرها با کمترین مصرف سوخت محاسبه شد. همچنین در مرجع [۳۹] مسئله حمل نقل هوایی شهری در فضای پروازی شهری مورد بررسی و تحلیل قرار داده است. مسئله فوق را از نظر زیرساخت، اقتصادی بودن مفهوم، فضای پروازی و سایر قوانین هوایی مورد به تفصیل مورد بررسی قرار داده است.

با توجه به مرور ادبیات ارائه شده، مسئله رفع تداخل بر اساس اولویت پروازی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملکردی هواپیما و محدوده پرواز ممنوع، موضوع هیچ تحقیقی نبوده است.در این مسئله فرض می‌شود هواپیماهای متداخل ابتدا یکدیگر را در فاصله میدان دید خود می بینند، سپس به کمک سامانه گیرنده و فرستنده ADS-B اطلاعات مسیر پرواز خود را به اشتراک می گذارند. براساس اطلاعات مسیر (موقعیت و سرعت) مسیر آینده هر هواپیما برازش و در صورت تداخل مسیر های پرواز مانور رفع تداخل همکارانه براساس اولویت پروازی انجام می گیرد(برازش اطلاعات در کامپیوتر پرواز هر هواپیما قابل محاسبه است). در این حالت هر هواپیما براساس میزان تاخیر پروازی هواپیماهای متداخل، اولویت پروازی خود را محاسبه و مسیر جدید خود را محاسبه می نماید. لذا در تحقیق حاضر موضوع با در نظر گرفتن قوانین پرواز در ارتفاع پایین با استفاده از مدل غیرخطی جرم نقطه‌ای سه درجه آزادی در یک محیط شهری با فرض مانع ثابت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا از مشخصات عملکردی واقعی یک نمونه تاکسی هوایی برای شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین محدودیت فضای پروازی با استفاده از ترکیب چند کره متداخل به عنوان منطقه پرواز ممنوع یا مانع ثابت مدلسازی شده است. در تعریف مسئله رفع تداخل بصورت یک بازی دیفرانسیلی فرض می‌شود، هر یک از هواپیماها از اطلاعات پرواز سایر هواپیماها آگاهی دارند. مسئله رفع تداخل بصورت همکارانه و با استفاده از روش حل عددی شبه طیفی و با استفاده از چند جمله‌ای‌های لژاندر حل شده است. در ادامه و در بخش ۲، مدل دینامیکی جرم نقطه هواپیما، شرط برخورد بین دو پرنده و مدل موانع ثابت بیان شده است. موضوع بازی‌های دیفرانسیلی و بیان مسئله برخورد به عنوان یک بازی دیفرانسیلی همکارانه در بخش ۳ مطرح می‌شود. پس از آن در قسمت ۴ روش حل شبه طیفی بیان شده و مسئله بازی دیفرانسیلی به یک برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل می‌گردد. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی چند مثال بر اساس فرضیات مطرح شده ارائه می‌گردد. در پایان نیز نتیجه گیری و پیشنهادات برای کارهای آینده مطرح می‌شود.

۲. مدل دینامیک و مسئله برخورد

برای بررسی دقیق مسئله رفع تداخل، استفاده از مدل دقیق و واقعی دینامیک جسم پرنده اجتناب ناپذیر است. مدل مورد استفاده علاوه بر نیروهای اصلی وارد بر هواپیما، بایستی محدودیت‌های عملکردی هواپیما را نیز در بر داشته باشد. همچنین در برخورد بین دو هواپیما با استفاده از قوانین پرواز در ارتفاع کم، حداقل فاصله ایمنی درنظر گرفته می‌شود که در طول مانور رفع تداخل بایستی حفظ شود. هر کدام از این مباحث در ادامه بررسی خواهد شد.

۲-۱. مدل دینامیک هواپیما

در این مقاله از مدل سه درجه آزادی هواپیما با در نظر گرفتن تمام نیروهای موثر بر آن استفاده می‌شود. این مدل که در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مسیر و رفع تداخل استفاده شده، بردار پیشرانش در راستای سرعت، زمین مسطح و غیر چرخان، و جرم پرنده ثابت در نظر گرفته شده است [۳]، [۵]، [۳۱]. به منظور اینکه مسیر بدست آمده قابل رهگیری توسط هواپیما باشد، محدودیت‌های عملکردی هواپیماها در مدل دینامیکی بصورت قیود بردار حالت و کنترل در نظر می‌شود.

با در نظر گرفتن فرضیات بالا و صرف نظر از نوع پرنده، مدل دینامیک پرنده بصورت زیر است.

$$\dot{x}_i = V_i \cos(\gamma_i)\cos(\chi_i) \quad (۱)$$

$$\dot{y}_i = V_i \cos(\gamma_i)\sin(\chi_i) \quad (۲)$$

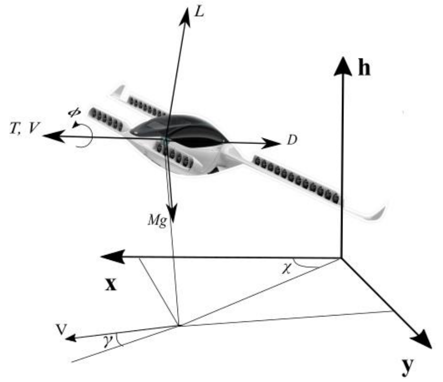
$$\dot{h_i} = V_i \sin(\gamma_i) \quad (۳)$$

$$\dot{V_i} = \frac{(T_i - D_i)}{m_i} - g \sin(\gamma_i) \quad (۴)$$

$$\dot{\gamma_i} = \frac{L_i cos(\varphi_i) - m_i g cos(\gamma_i)}{m_i V_i} \quad (۵)$$

$$\dot{\chi_i} = \frac{L_i sin\,(\varphi_i)}{m_i V_i cos(\gamma_i)} \quad (۶)$$

در روابط بالا $i = 1.2 \dots . Q$ تعداد هواپیماهای متداخل، می‌باشد. $x_i . y_i$ موقعیت هر پرنده در صفحه افق و h_i ارتفاع از سطح زمین است. m_i جرم پرنده در نظر گرفته شده است. γ_i زاویه مسیر، χ_i زاویه سمت و $L_i . D_i$ نیروی پسا و برا پرنده است. ورودی‌های کنترلی پرنده عبارتند از: ضریب بار۶ $n_i = L_i/$ $m_i g$که توسط سطح کنترلی اولویتور تولید می‌شود، زاویه φ_i که توسط ترکیب سطوح کنترلی رادر و ایلرون تولید و T_i نیروی پیشران می‌باشند. با توجه به اینکه پرنده دارای محدودیت‌های عملکردی و سازه ای می‌باشد، لذا متغیرهای کنترلی و متغیرهای حالت پرنده دارای محدودیت می‌باشند. به عنوان مثال حداکثر نیروی پیشران پرنده مقدار مشخصی دارد. همچنین پرنده دارای حداکثر و حداقل سرعت و ارتفاع عملکردی می‌باشد. لذا می‌توان این محدودیت‌ها را بصورت قیود متغیرهای حالت و ورودی کنترلی در دینامیک حرکت پرنده در نظر گرفت.



شکل ۱. دستگاه مختصات مرجع (زمین ثابت) و نیروهای وارد بر هواپیما

۲-۲. برخورد بین دو هواپیما

طبق تعریف، برخورد به معنای کمتر شدن فاصله دو پرنده از یک حد ایمن است. در فضای پروازی شهری که تحت نظارت مرکز کنترل ترافیک هوایی نمی‌باشد و قوانین پرواز بصری حاکم است، فاصله ایمن مقدار مشخصی تعریف نشده است [۲]. با توجه به اینکه میدان دید تعریف شده ۱۵۰۰ متر دید در صفحه و ۶۰۰ پا در ارتفاع می‌باشد، در این مقاله فاصله ایمن کره‌ای به شعاع ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده است (این فاصله می‌تواند تغییر کند و لذا به دلیل فضای شهری و فضای رفع تداخل در نظر گرفته شده است). فرض می‌شود تمام هواپیما در لحظه شروع بر روی سطح کره ای به قطر ۱۵۰۰ متر واقع شده اند.

تعریف. اگر Z موقعیت هر هواپیما در فضای سه بعدی باشد، آنگاه شرط عدم برخورد دو پرنده $i\,, j$ برابر است با:

$$\|Z_i - Z_j\| \geq R_s \quad (۷)$$

که R_s فاصله ایمنی بین دو پرنده و عملگر $\|\dots\|$ نرم دوم بردار است.

با توجه به محدودیت‌های فضای شهری، مناطقی وجود دارد که اجازه پرواز وجود ندارد. لذا فضای قابل پرواز را می‌توان بصورت زیر تعریف کرد. این مناطق به عنوان موانع ثابت در فضای پروازی در نظر گرفته شده است.

تعریف. اگر هر مانعی در فضا را بصورت یک تابع بسته $\phi(x.y.h)$ در نظر گرفته شود منطقه مجاز پرواز بصورت زیر تعریف می‌گردد.

$$O_{free} = \{(x.y.h) \in R^3 . \phi(x.y.h) \geq 0\} \quad (۸)$$

که O_{free} به عنوان ناحیه بدون مانع یا ناحیه قابل پرواز تعریف می‌گردد.

۳. بازی دیفرانسیلی

در مسئله رفع تداخل هر یک از هواپیماها را می‌توان بصورت یک بازیکن یا تصمیم گیرنده در بازی دیفرانسیلی همکارانه در نظر گرفت. بازی دیفرانسیلی مد نظر در یک چارچوب متمرکز بررسی شده است بطوری که هر یک از پرنده‌ها از اطلاعات پرواز سایرین اطلاع دارند. همچنین تعداد پرنده‌ها در یک مسئله رفع تداخل ثابت می‌ماند. بطور کلی، یک بازی دیفرانسیلی شامل Q بازیکن بصورت زیر تعریف می‌گردد.

اگر هدف هر یک از بازیکنان $i = 1 \dots Q$ انتخاب استراتژی (u_i) باشد که تابع هدف J_iکمینه گردد

$$J_i = \int_0^{t_f} L_i\big(x . u_1 . \dots . u_Q . t\big) dt \,, \quad (۹)$$

با قید دیفرانسیلی:

$$\dot{x} = f\big(x . u_1 \,. \dots . u_Q \,. t\big) \,. x(t_0) = x_0 \quad (۱۰)$$

بطوری که $x \epsilon R^n$ بردار حالت، $u \epsilon R^m$ استراتژی منتخب از مجموعه استراتژی‌های پیش روی بازیکن می‌باشد. x_0 شرایط اولیه بازی و t_f زمان نهایی بازی است. در مسئله بازی

دیفرانسیلی ممکن است بردارهای کنترلی $u(t)$ و حالت $x(t)$ براساس شرایط فیزیکی مسئله مقید یا نامقید باشند.

$$\begin{aligned} x_l \le x(t) \le x_u \\ u_l \le u(t) \le u_u \end{aligned} \quad (۱۱)$$

زیرنویس l,u بیانگر حد پایین و بالا برای بردار حالت و کنترل می‌باشند. همچنین ممکن است قیودی در شرایط اولیه، شرایط نهایی و طی مسیر بر روی بردار حالت یا بردار کنترلی وجود داشته باشد. این قیود می‌تواند از نوع مساوی یا غیر مساوی باشد.

$$\begin{aligned} C_{eq}(x(t).u(t)) = 0 \\ C_{ineq}(x(t).u(t)) \le 0 \end{aligned} \quad (۱۲)$$

در رابطه فوق C_{eq} و C_{ineq} به ترتیب قیود مساوی و نامساوی مسئله می‌باشند. قید عدم برخورد و منطقه پرواز ممنوع از این قیود می باشند.

برای بازی دیفرانسیلی فوق روش‌های حل مختلف با فرضیات متفاوت وجود دارد. برای حل یک بازی دیفرانسیلی سه روش تعادل نش[۷]، حداقل سازی حداکثر هزینه[۸] و روش غیر حداقلی وجود دارد [۳۲]. روش تعادل نش برای بازی‌های غیر همکارانه یا رقابتی، روش حداقل سازی حداکثر خطا برای بازی‌هایی که ارتباط بین بازیکنان وجود نداشته و فقط هر یک از بازیکنان می‌دانند سایرین بصورت نش بازی می‌کنند و روش غیر حداقلی حالت همکارانه و مذاکره ای بازی دیفرانسیلی است. در این مقاله روش غیر حداقلی استفاده شده است. برای اطلاعات بیشتر در مورد سایر روش‌ها به مرجع [۳۳] مراجعه نمایید.

۳-۱. روش غیر حداقلی

در نظریه بازی زمانی که همکاری و تبادل نظر برای رسیدن به بهترین جواب مد نظر باشد، روش غیر حداقلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهترین راه حل را می‌توان از بین مجموعه جواب‌ها با شرط زیر پیدا کرد.

تعریف. استراتژی (جواب) بازی دیفرانسیلی همکارانه متعلق به مجموعه Qتایی $\mu = \{\mu_1. \dots . \mu_Q\}$ است بطوری که به ازای هر مجموعه جواب $\phi = \{\phi_1. \dots . \phi_Q\}$

$$\{J_i(\mu) \le J_i(\phi)\ .\ i = 1. \dots . Q\}\, only\ if\ \{J_i(\mu) = J_i(\phi)\ .\ i = 1. \dots . Q\} \quad (۱۳)$$

پیدا کردن مجموعه جواب μ معادل حل مسئله کنترل بهینه با معیار بهینگی برداری است. جواب این مسئله در واقع حل مجموعه Q-1 پارامتر از یک مسئله کنترل بهینه است. جواب مسئله بازی از روش غیر حداقلی معادل بهینه‌سازی تابع هزینه زیر است.

$$J = \mu_1 J_1 + \dots + \mu_Q J_Q \quad (۱۴)$$

به ازای $\mu = \{\mu_1. \dots . \mu_Q\}$ بطوری که:

$$\sum_{i=1}^{Q} \mu_i^2 = 1\ .\ \mu_i \ge 0\ .\ i = 1. \dots . Q \quad (۱۵)$$

در مسائل بازی مذاکره ای که معادل یافتن یک بردار μ است بایستی قیود دیگر در مسئله اعمال گردد[۳۲]. ضرایب μ می‌تواند براساس زمان تاخیر هر یک از هواپیماها نسبت به مسیر نامی خود باشد. در این صورت هواپیمایی که تاخیر زمانی بالاتری دارد ضریب تاثیر بالاتری داشته و هواپیماهای با تاخیر یکسان ضرایب مشابهی دارند.

تعریف. ضریب تاثیر هر هواپیما بصورت نسبت زمان تاخیر هر هواپیما به مجموع زمان تاخیر تمام هواپیماها تعریف می‌گردد.

$$\mu_i = \left(\frac{\Delta t_i + 1}{\sum_{i=1}^{Q} \Delta t_i + Q}\right)^{0.5} \quad (۱۶)$$

در رابطه بالا Δt_i تاخیر پرواز هواپیمای iام است.

۴. حل مسئله رفع تداخل

بازی دیفرانسیلی بیان شده (۱۴) با قید دیفرانسیلی (۱)-(۶) و قیود مسیر (۷)، (۸) و با قیود بردار حالت و کنترل (۱۱)، (۱۲) مدل کامل یک مسئله رفع تداخل همکارانه در محیط شهری است. با توجه به اینکه مسئله فوق حل تحلیلی ندارد، در این مقاله با استفاده از روش‌های حل مستقیم جواب این مسئله محاسبه می‌شود. روش شبه طیفی علاوه بر تخمین دقیق بردار حالت و کنترل بهینه، بردار شبه حالت را نیز با دقت بالایی تخمین می‌زند[۲۷]. از روش شبه طیفی در حل تعادل نش از مسائل نظریه بازی استفاده شده است [۲۵]، [۳۴]. در ادامه روش حل این مسئله با استفاده از روش شبه طیفی بیان می‌گردد.

۴-۱. الگوریتم شبه طیفی

روش شبه طیفی جواب مسئله را با استفاده چند جمله‌ای‌های لژاندر مرتبه K در مجموعه ای از نقاط مشخص تخمین می‌زند. این نقاط در بازه [۱،۱-] تعریف می‌شوند، بطوری که اگر نقاط ریشه‌های چند جمله‌ای لژاندر باشند به آن گاوس- لژاندر گفته می‌شود، اگر ریشه‌های از ترکیب خطی چند جمله‌ای لژاندر بدست آید به آن رادو- گاوس- لژاندر می‌گویند و اگر از ریشه‌های مشتق چند جمله‌ای استفاده شود لژاندر- گاوس- لوباتو گفته می‌شود.

نقاط گاوس- لژاندر در بازه باز (۱،۱-) ، نقاط رادو-گاوس-لژاندر در بازه نیمه باز (۱،۱-] یا [۱،۱-) و نقاط لژاندر-گاوس-لوباتو در بازه بسته [۱،۱-] تعریف می‌شوند. در این مقاله از روش گاوس-لژاندر برای حل مسئله بازی دیفرانسیلی استفاده شده است برای اطلاعات بیشتر در مورد این روش به [۲۷] مراجعه نمایید.

ابتدا بایستی مسئله در بازه (۱،۱-) تعریف شود لذا با استفاده از تغییر متغیر زیر بازه زمانی از $t\epsilon[t_0.t_f]$ به بازه $\tau\epsilon[-1.1]$ نگاشته می‌شود.

$$t=\frac{1+\tau}{1-\tau} \quad (۱۷)$$

سپس بردار حالت $x(\tau)$ با استفاده از توابع درون‌یاب پایه لژاندر $L_l(\tau)$ مرتبه K+1 بصورت زیر تخمین زده می‌شود.

$$x(\tau)\approx\sum_{l=0}^{K}X_l(\tau)\,.\,L_l(\tau)=\prod_{m=0.m\neq l}^{K}\frac{\tau-\tau_m}{\tau_l-\tau_m} \quad (l=0\dots K) \quad (۱۸)$$

علاوه بر این، بردار کنترل با استفاده از چند جمله‌ای لژاندر مرتبه K بصورت زیر تخمین زده می‌شود.

$$u_i(\tau)\approx\sum_{l=1}^{K-1}u_i(\tau)\,L_l^*(\tau)\,.\,L_l^*(\tau)=\prod_{m=1.m\neq l}^{K}\frac{\tau-\tau_m}{\tau_l-\tau_m} \quad i=1\dots Q.\,l=1\dots K \quad (۱۹)$$

مشتق هر یک از چند جمله‌ای‌ها در نقاط LG را می‌توان بصورت یک ماتریس تخمین دیفرانسیلی $D\in\mathbb{R}^{K\times K+1}$ بیان کرد. اگر از رابطه (۱۸) نسبت به زمان مشتق گرفته شود

$$\dot{X}(\tau)\approx\sum_{l=0}^{K}X_l\,\dot{L}_l(\tau)=\sum_{l=0}^{K}D_lX_l \quad (۲۰)$$

با استفاده از ماتریس تخمین دیفرانسیلی، قید دینامیک سیستم (۱۰) به یک قید جبری تبدیل می‌گردد.

$$\sum_{l=1}^{K}D_{ml}X_l-\frac{t_f-t_0}{2}f\left(X_m.U_{1m}\dots U_{Qm}.\tau_m;t_0.t_f\right)=0.\ (m=1\dots K) \quad (۲۱)$$

در رابطه فوق $U_m\equiv U(\tau_m)$ و $X_m\equiv X(\tau_m)$ می‌باشد. سایر متغیرها بصورت زیر تعریف می‌گردند.

$$X_0\equiv X(-1)$$
$$X_f=X_0+\frac{t_f-t_0}{2}\times\left(\sum_{l=1}^{K}\omega_l f(X_l.U_{1l}\dots U_{Ql}.\tau_l;t_0.t_f)\right) \quad (۲۲)$$

ω_l ضرایب گوس هستند. در این مقاله این ضرایب بصورت یکسان برای تمام نقاط در نظر گرفته شده‌است.

تابع هزینه پیوسته (۹) را می‌توان بر حسب فرم گسسته زیر نوشت:

$$J_i=\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l L_i(X_l.U_{1l}\dots U_{Ql}.\tau_l;t_0.t_f). \quad (۲۳)$$
$$i=1\dots Q$$
$$J=\mu_1J_1+\cdots+\mu_QJ_Q$$

قیود مرزی و قیود در حین مسیر (۱۲) را بصورت زیر بیان می‌شوند:

قید عدم برخورد بین دو هواپیما:

$$C_{ineq}=C_{ij}=C_{ji}=\|p_i-p_j\|\geq R_s.\,i\neq j$$
$$p_i=\boldsymbol{X}[6\times(i-1)+1:6\times(i-1)+3].\,i=1.\dots.N \quad (۲۴)$$
$$p_j=\boldsymbol{X}[6\times(j-1)+1:6\times(j-1)+3].\,j=1.\dots.N$$

اگر موقعیت مانع P_{so} با شعاع R_{SO} باشد آنگاه قید عدم برخورد با موانع:

$$R_{SO}-\|\boldsymbol{X_i}(\tau_m;0.t_f)-\boldsymbol{P_{so}}\|\leq 0. \quad i=1\dots N \quad (۲۵)$$

قیود بردار حالت و کنترل نیز بصورت زیر بیان می گردد:

$$V_i(\tau_m;0.t_f)\leq V_{i_{max}}$$
$$mass_i\times\|U_i(\tau_m;0.t_f)\|\times V_i(\tau_m;0.t_f)\leq P_{max} \quad (۲۶)$$

$P_{max}.V_{i_{max}}$ به ترتیب بیشینه سرعت و حداکثر توان هر هواپیما است.

تابع هزینه (۲۳) با دینامیک (۲۱) و شرایط مرزی (۲۲) و با قیود نامساوی ،(۲۲)- (۲۶) یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی را تشکیل می‌دهد بطوری که حل آن جواب مسئله بازی دیفرانسیلی غیر حداقلی می‌باشد. لازم به ذکر است قیود نامساوی با استفاده از ضرایب لاگرانژ و تشکیل تابع هزینه افزوده و شرایط کاروش-کوهن- تاکر به قیود مساوی تبدیل و مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی بدست می‌آید.

۴-۲. شرایط کاروش-کوهن- تاکر (KKT)

شرط مرتبه اول بهینگی برای مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی با استفاده از تعریف تابع هزینه افزوده بدست می‌آید. اگر تابع هزینه افزوده با استفاده از ضرایب لاگرانژ $\tilde{\mu}_l\in\mathbb{R}^C,l=1.\dots.K$ ، $\tilde{\Lambda}_l\in\mathbb{R}^n$ $\tilde{\Lambda}_f\in\mathbb{R}^n$ بصورت زیر تعریف شود.

$$J_a=\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l g_l-\sum_{l=1}^{K}\tilde{\mu}^T{}_lC_l-\sum_{l=1}^{K}\tilde{\Lambda}^T{}_l\left(\sum_{m=0}^{K}D_{lm}X_m-\frac{t_f-t_0}{2}f_l\right)-\tilde{\Lambda}^T{}_f\left(X_f-X_0-\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l f_l\right) \quad (۲۷)$$

J_a تابع هزینه افزوده است. اگر از رابطه (۲۷)، نسبت به $t_0.\tilde{\Lambda}_f.\tilde{\Lambda}_l.\tilde{\mu}_l.U_l.X_l$ و t_f مشتق گرفته شود، پاسخ مسئله NLP بخش قبل بایستی شرایط زیر را ارضا نماید.

$$\sum_{m=0}^{K} D_{lm}X_m = \frac{t_f-t_0}{2} f_l \quad (۲۸)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_m}\left(\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l g_l\right)-\frac{\partial}{\partial X_m}\left(\sum_{l=1}^{K}\tilde{\mu}^T{}_l C_l\right)- \frac{\partial}{\partial X_m}\left(\sum_{l=1}^{K}\tilde{\Lambda}^T{}_l\left(\sum_{m=0}^{K}D_{lm}X_m-\frac{t_f-t_0}{2}f_l\right)\right)+ \tilde{\Lambda}^T{}_f\left(\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l f_l\right)=0 \quad (۲۹)$$

$$\frac{\partial}{\partial U_m}\left(\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l g_l\right)- \frac{\partial}{\partial U_m}\left(\sum_{l=1}^{K}\tilde{\Lambda}^T{}_l\left(-\frac{t_f-t_0}{2}f_l\right)\right)- \frac{\partial}{\partial U_m}\left(\tilde{\Lambda}^T{}_f\left(-\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l f_l\right)\right)=0 \quad (۳۰)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_0}\left(\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l g_l\right)-\frac{\partial}{\partial t_0}\left(\sum_{l=1}^{K}\tilde{\mu}^T{}_l C_l\right)- \frac{\partial}{\partial t_0}\left(\sum_{l=1}^{K}\tilde{\Lambda}^T{}_l\left(-\frac{t_f-t_0}{2}f_l\right)\right)- \frac{\partial}{\partial t_0}\left(\tilde{\Lambda}^T{}_f\left(-\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l f_l\right)\right)=0 \quad (۳۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_f}\left(\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l g_l\right)-\frac{\partial}{\partial t_f}\left(\sum_{l=1}^{K}\tilde{\mu}^T{}_l C_l\right)- \frac{\partial}{\partial t_f}\left(\sum_{l=1}^{K}\tilde{\Lambda}^T{}_l\left(-\frac{t_f-t_0}{2}f_l\right)\right)- \frac{\partial}{\partial t_f}\left(\tilde{\Lambda}^T{}_f\left(-\frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l f_l\right)\right)=0 \quad (۳۲)$$

$$C_j = 0.j = 1.\dots.K \qquad \tilde{\mu} = 0\ .when\ C < 0 \qquad \tilde{\mu} \le 0\ .when\ C = 0 \quad (۳۳)$$

$$X_f - X_0 = \frac{t_f-t_0}{2}\sum_{l=1}^{K}\omega_l f_l \quad (۳۴)$$

قضیه۱: شرایط اولیه بهینگی (۲۸-۳۴) معادل شرایط مرتبه اول بهینگی مسئله پیوسته (۹-۱۲) است. علاوه بر این بردار شبه حالت را می‌توان با استفاده از ضرایب لاگرانژ با دقت بسیار خوبی محاسبه کرد[۲۷]

در واقع قضیه ۱ بیانگر این مطلب است که پاسخ مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی معادل حل مسئله کنترل بهینه پیوسته است. حل مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی بدست آمده با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف امکان‌پذیر است. در این مقاله مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی فوق با استفاده از نسخه منبع باز[۹] نرم‌افزار GPOPS.II با استفاده حل کننده SNOPT در محیط MATLAB حل گردیده است[۳۵].

۵. نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت با توجه به مطالبی که در قسمت‌های قبل ارائه شد، سه مثال مختلف برای مسئله رفع تداخل و بررسی تاثیر ضریب اولویت با وجود مانع ثابت به عنوان یک محدودیت شهری، بصورت یک بازی دیفرانسیلی پیاده سازی شده است. هدف اصلی از این مثال‌ها بررسی اثر اولویت پروازی در مسیر رفع تداخل است. همچنین در این مثال‌ها مانع ثابت یا منطقه پرواز ممنوع نیز در نظر گرفته شده است. در مثال اول صرفاً رفع تداخل بین دو هواپیما مورد بررسی قرار می‌گیرد. بطوری که اگر دو هواپیمای متداخل ضرایب اولویت متفاوتی داشته باشند، چه تاثیری بر مسیر رفع تداخل آنها خواهد داشت. در مثال دوم علاوه بر بررسی اثر ضریب اولویت، تاثیر وجود مانع پروازی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این دو مثال به دلیل اینکه بتوان از تداخل حتمی دو پرنده مطمئن بود و همچنین اثر ضریب اولویت بخوبی نمایان شود در حرکت صفحه بیان شده است. در مثال سوم علاوه بر حل مسئله در سه بعد، به منظور نشان دادن توانایی حل برای تعداد زیادی هواپیمای متداخل، تعداد هشت هواپیما در فضای سه بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی از اطلاعات عملکردی تاکسی هوایی شهری مدل لیلیوم جت۱۰ استفاده شده است. این هواپیما با وزن ۴۰۰ کیلوگرم با مجموعه ای موتورهای الکتریکی با قدرت ۳۲۰ کیلووات می‌تواند تا سرعت ۸۵ متر بر ثانیه پرواز و نماید [۳۶]. چگالی هوا ۱،۲۲ کیلوگرم بر متر مکعب، شتاب زمین ثابت و برابر ۹،۸۱ متر بر مجذور ثانیه و سطح مرجع هر پرنده ۲۰ متر مربع و ضریب پسا ۰،۰۲ در نظر گرفته شده است. فرضیات در نظر گرفته شده به این صورت است.

مسئله رفع تداخل بین تمام هواپیماها بصورت کمترین تلاش کنترلی است.

تمام هواپیماها مجهز به سیستم ارسال و دریافت اطلاعات پرواز ADS-B هستند.

حداقل فاصله مجاز بین دو هواپیما ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده است.

فضای پروازی شبیه‌سازی شده درون کره ای به قطر ۱۵۰۰ متر می‌باشد.

مشخصات عملکردی برای تمام هواپیماها یکسان است.

مثال۱. به منظور بررسی تاثیر اولویت پروازی در مسئله رفع تداخل، در این مثال تداخل بین دو پرنده در یک ارتفاع شبیه‌سازی شده است. ضریب اولویت پرواز در حالت‌های مختلف قرار گرفته و مسیرهای رفع تداخل بدست آمده است. به منظور اینکه تاثیر اولویت پرواز واضح‌تر باشد پرنده‌های متداخل مشابه در نظر گرفته

می‌شوند. همچنین فرض می‌شود دو هواپیما با سرعت اولیه مشخص وارد منطقه تداخل شده و براساس میزان تاخیر زمانی یک ضریب اولویت تعیین می‌شود ($\mu_{0_i} = 0.7071$ برای حالتی است که هر دو هواپیما تاخیری ندارند). لازم به ذکر است به ازای ضریب اولویت $\mu_i \geq \mu_{0_i}$ به معنای اولویت بالاتر و بالعکس به ازای $\mu_i \leq \mu_{0_i}$ اولویت پایین تردر نظر گرفته می‌شود. شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای این مثال بصورت زیر است:

$$v_0 = v_f = 10\,\frac{m}{s} \qquad v(t) \leq 85\,\frac{m}{s}$$

$$Power \leq 320\ Kw$$

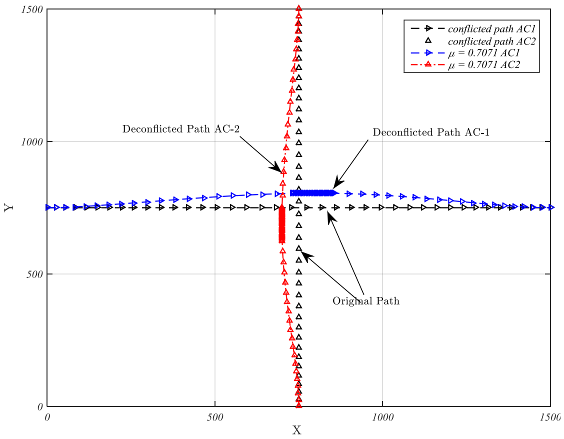
$$initial\ position = \begin{cases} AC_1 = [0;\ 750] \\ AC_2 = [750;\ 0] \end{cases}$$

$$final\ position = \begin{cases} AC_1 = [1500;\ 750] \\ AC_2 = [750;\ 1500] \end{cases}$$

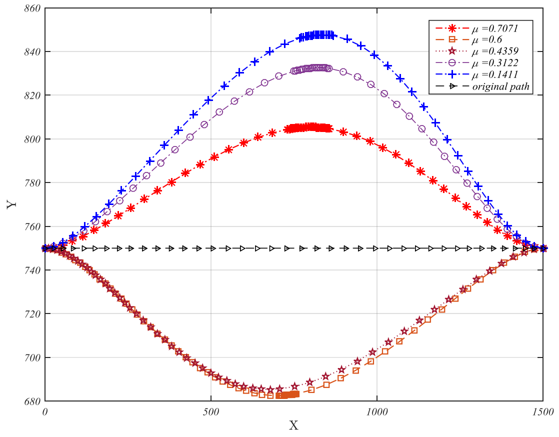
$$\mu_1 = [0.1411; 0.3122; 0.4359; 0.6; 0.7071]$$

$$\mu_2 = [0.99\ ; 0.95\ ; 0.9\ ; 0.8; 0.7071]$$

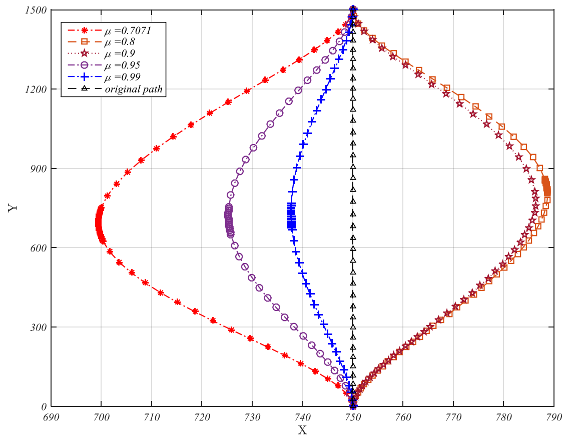
با توجه به نتایج بدست آمده، همانطور که در شکل ۲ مشخص است، زمانی که دو پرنده با مشخصات عملکردی یکسان و اولویت مشابه در تداخل با یکدیگر قرار می‌گیرند میزان تغییر مسیر برای هر دو یکسان بدست می‌آید و همانطور که در شکل ۳ مشخص است، زمانی که هواپیما ضریب اولویت پایین‌تری دارد مجبور به انجام مانور بیشتر برای رفع تداخل می‌شود و به ازای ضریب اولویت بالاتر مانور کمتری خواهد داشت همانند شکل ۴.



شکل ۲. مسیر اولیه و مسیر رفع تداخل بین دو هواپیما با ضریب اولویت یکسان



شکل ۳. مسیرهای رفع تداخل برای AC1 به ازای ضریب اولویت پایین‌تر



شکل ۴. مسیرهای رفع تداخل برای AC2 به ازای ضریب اولویت بالاتر

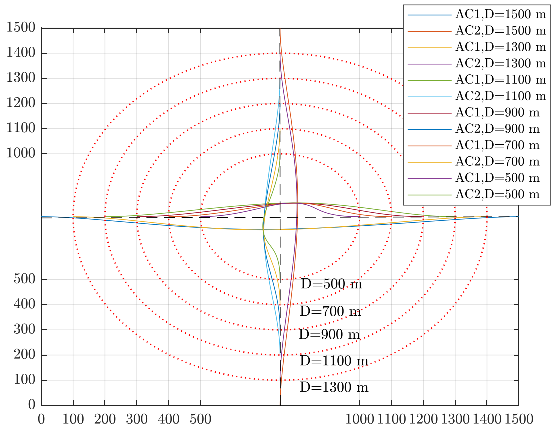
مثال۲. در این مثال مسئله رفع تداخل بین دو پرنده متداخل در فواصل مختلف مورد بررسی قرار گیرد، تا بهینه‌ترین نقطه شروع برای مانور رفع تداخل در یک فضای باز بدون مانع مشخص گردد. بدین منظور نقطه شروع مانور رفع تداخل بین دو پرنده از شعاع های مختلف شروع و تابع هزینه که همان مجموع تلاش کنترلی برای رفع تداخل است مقایسه می‌گردد. لازم به ذکر است این مثال برای دو هواپیما با مشخصات مشابه مانند مثال قبل و به ازای ضریب اولویت یکسان اجرا شده است.

همانطور که از نتایج مشخص است اگر دو هواپیما متداخل مانور رفع تداخل را در ناحیه ای به قطر ۹۰۰ متر تا ۱۱۰۰ متر

شروع کنند، میزان تابع هزینه کمتر از سایر فواصل است. این فاصله کاملا وابسته به عملکرد هواپیماها است و برای هواپیماهای متخلف متفاوت خواهد شد. لذا برای دو هواپیمای متداخل با محدودیت توان موتور و سرعت (مشابه هواپیمای لیلیوم جت) نتایج بصورت جدول ۱ خواهد بود. همچنین مسیرهای پروازی به ازای نواحی مختلف شروع مانور رفع تداخل بصورت شکل ۵ است.

جدول ۱. میزان تلاش کنترلی به ازای شعاع‌های مختلف رفع تداخل

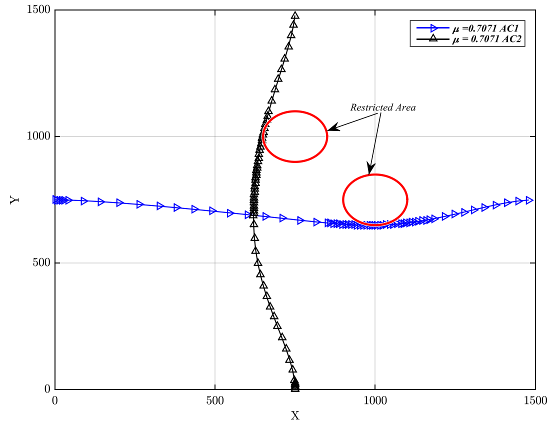
قطر ناحیه رفع تداخل (متر)	مقدار تابع هزینه $J=\int U^2dt$
۱۵۰۰	۸/۱۵۷۶
۱۳۰۰	۴/۳۱۱۸
۱۱۰۰	۲/۳۸۶۵
۹۰۰	۲/۳۹۹۸
۷۰۰	۶/۴۱۷۹
۵۰۰	۸/۷۱۲۸



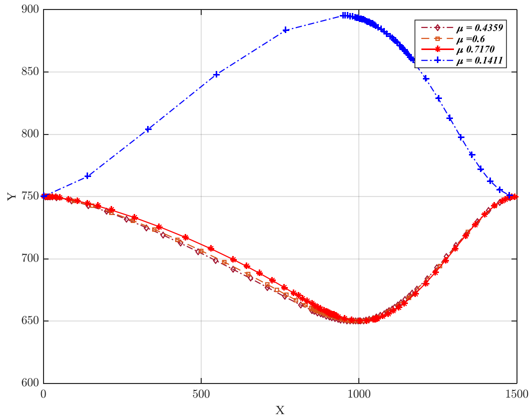
شکل ۵. مسیرهای رفع تداخل به ازای نقاط شروع مختلف برای مانور

مثال۳. در این مثال مسئله رفع تداخل بین دو پرنده متداخل با در نظر گرفتن ناحیه پرواز ممنوع مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مثال مناطق پرواز ممنوع بصورت دایره‌هایی به قطر ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده‌است. سایر شرایط پروازی مانند مثال قبل است. نتایج این شبیه‌سازی بصورت زیر می‌باشد.

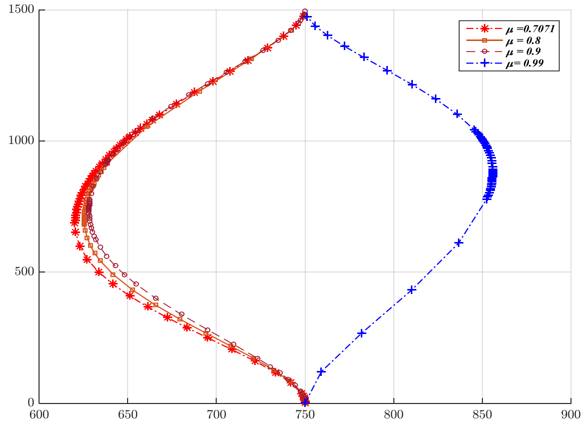
در مانور رفع تداخل بین دو هواپیما به دلیل وجود مانع ثابت، تلاش کنترلی و میزان انحراف مسیر بیشتر از حالت قبل می‌باشد، شکل ۶ بیانگر این موضوع می‌باشد. در این مثال مسیرها با اولویت پروازی متفاوت به یکدیگر نزدیک می‌باشد که این امر بخاطر وجود موانع ثابت در راه هواپیماها می‌باشد چرا که هر یک از هواپیماها سعی در عبور از مانع نیز دارند شکل ۷ و شکل ۸ بیانگر این موضوع است. همچنین میزان انحراف هواپیمایی که اولویت بالاتری دارد کمتر از هواپیما با اولویت پایین‌تر است.



شکل ۶. مسیر رفع تداخل بین دو هواپیما با ضریب اولویت یکسان و با درنظر گرفتن مانع پروازی



شکل ۷. مسیرهای رفع تداخل برای AC1 به ازای ضریب اولویت پایین تر با در نظر گرفتن مانع پروازی



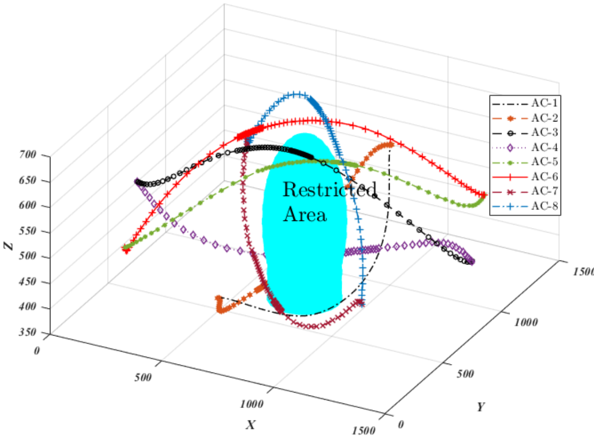
شکل ۸. مسیرهای رفع تداخل برای AC2 به ازای ضریب اولویت بالاتر با در نظر گرفتن مانع پروازی

مثال ۴. در این مثال مشابه مثال حل شده در مرجع [۱۰]، تعداد هشت پرنده در فضای سه بعدی متداخل شده اند. در مرجع مذکور صرفا رفع تداخل بین هواپیماها بر اساس قوانین پرواز در منطقه پرواز آزاد [۳] بدون در نظر گرفتن منطقه پرواز ممنوع مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است در مرجع مذکور قید عدم برخورد بصورت بیضی‌گون مدل شده است که در تحقیق حاضر بصورت قید کروی مدل می‌گردد. در تحقیق حاضر رفع تداخل بین هشت پرنده در فضای پروازی سه بعدی با در نظر گرفتن مناطق پرواز ممنوع یا مانع ثابت و براساس قوانین پروازی ارتفاع پایین مورد بررسی قرار می‌گیرد. شرایط اولیه حل شبیه‌سازی بصورت زیر است. ضریب اولویت در این مثال مشابه در نظر گرفته شده و سایر شرایط مشابه مثال قبل است.

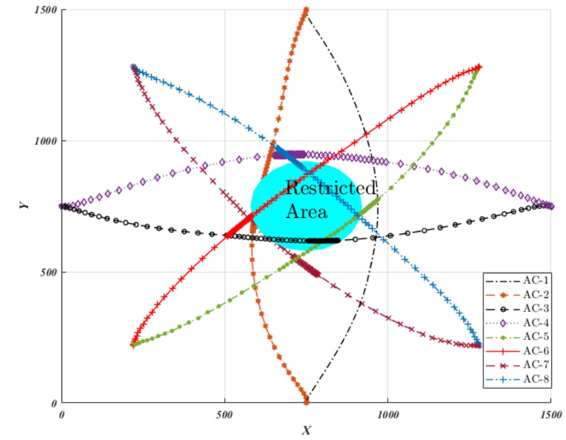
$$initial\ position = \begin{cases} AC_1 = [750;\ 0\ \ ;\ 500] \\ AC_2 = [750;\ 1500;\ 500] \\ AC_3 = [0;\ 750;\ 500] \\ AC_4 = [1500;\ 750;\ 500] \\ AC_5 = [220;\ 220;\ 500] \\ AC_6 = 1280;\ 1280;\ 500] \\ AC_7 = [220;\ 1280;\ 500] \\ AC_8 = [1280;\ 220;\ 500] \end{cases}$$

$$final\ position = \begin{cases} AC_1 = [750;\ 1500\ \ ;\ 500] \\ AC_2 = [750;\ 0;\ 500] \\ AC_3 = [1500;\ 750;\ 500] \\ AC_4 = [0;\ 750;\ 500] \\ AC_5 = [1280;\ 12280;\ 500] \\ AC_6 = [220;\ 220;\ 500] \\ AC_7 = [1280;\ 220;\ 500] \\ AC_8 = [220;\ 1280;\ 500] \end{cases}$$

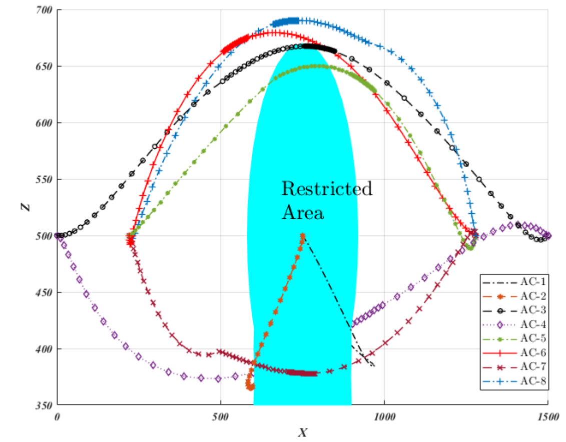
نتایج شبیه‌سازی بصورت زیر ارائه می‌شود:



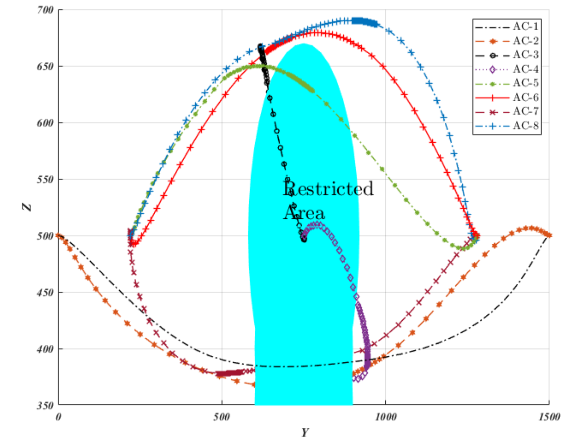
شکل ۹. مسیرهای رفع تداخل برای تعداد هشت هواپیمای متداخل با وجود مانع پروازی (منطقه پرواز ممنوع)



شکل ۱۰ مسیرهای رفع تداخل در صفحه X-Y برای تعداد هشت هواپیمای متداخل با وجود مانع پروازی (منطقه پرواز ممنوع)

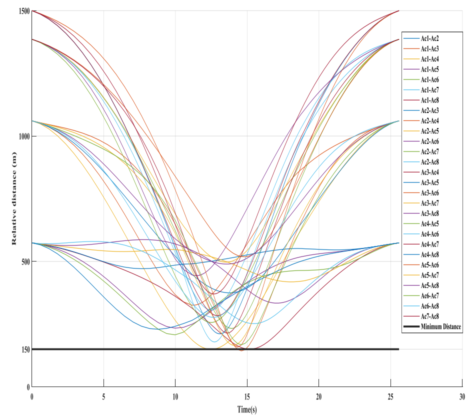


شکل ۱۱. مسیرهای رفع تداخل در صفحه X-Z برای تعداد هشت هواپیمای متداخل با وجود مانع پروازی (منطقه پرواز ممنوع)



شکل ۱۲. مسیرهای رفع تداخل در صفحه Y-Z برای تعداد هشت هواپیمای متداخل با وجود مانع پروازی (منطقه پرواز ممنوع)

هدف اصلی از این مثال نشان دادن قابلیت استفاده از این روش در رفع تداخل بین تعداد زیادی از هواپیماها با در نظر گرفتن فضای پرواز ممنوع می‌باشد. همانطور که در شکل ۹ مشخص است با استفاده از این روش مسیر تمام هواپیماها علاوه بر رعایت ناحیه پرواز ممنوع مسیر بدون برخورد را طی می‌کنند. مسیر حرکت هر یک از پرنده‌ها در صفحه Y−X و X-Z و Y-Z به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده بیانگر امکان استفاده از این روش در حل مسائل مربوط به رفع تداخل بین تعداد مختلفی از هواپیماها در فضای پروازی شهری می‌باشد. همچنین در شکل ۱۲ فاصله نسبی بین هواپیماها نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است شرط حفظ فاصله ایمنی ۱۵۰ متر بین هواپیماها در حین پرواز برقرار مانده است.



شکل ۱۳. فاصله نسبی بین هواپیماها در حین مانور رفع تداخل و برقراری شرط فاصله ۱۵۰ متر بین آنها

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نظریه بازی‌های دیفرانسیلی مسئله رفع تداخل بین چند هواپیما مطرح و با استفاده از روش غیر حداقلی بصورت همکارانه و با اطلاعات کامل حل شده است. معیار رفع تداخل بر اساس اولویت پروازی در نظر گرفته شد، بگونه ای که پرنده های متداخل ابتدا اولویت بندی شده و به هر کدام یک ضریب اولویت اختصاص داده می‌شود. این ضریب اولویت می‌تواند بر اساس تعداد مسافر، میزان اهمیت ماموریت پرنده‌ها و یا تاخیر زمانی به نسبت زمان بندی اولیه اعمال گردد، بطوری که اولویت پرنده‌ای که تاخیر زمانی بیشتری دارد بالاتر در نظر گرفته شود. مسئله فوق می‌تواند بین خطوط هوایی حمل و نقل شهری جهت تخصیص مسیر رفع تداخل مورد استفاده قرار گیرد، چنان که در تداخل بین چند پرنده، با اولویت بندی هواپیماها طبق توافق خطوط هوایی، مسیرهای رفع تداخل محاسبه شود. در پیاده سازی مدل در نظر گرفته شده، دینامیک سه درجه آزادی هواپیما با اعمال قیود عملکردی هواپیما مورد استفاده قرار گرفت. همچنین با توجه به اینکه ممکن است در فضای شهری، مانع ثابت یا منطقه پرواز ممنوع وجود داشته باشد، با استفاده از ترکیب چند کره این محدودیت اعمال گردید. به منظور نشان دادن کارایی روش ارائه شده، مسئله رفع تداخل در چهار مثال و با استفاده از مشخصات عملکردی یک تاکسی هوایی شهری حل شد. به منظور پیشنهاد برای ادامه تحقیق می‌توان رفع تداخل غیر همکارانه مورد بررسی قرار گیرد.

۷. مآخذ

[1] C. Aviation and N. Zealand, Part 91, no. May, 2019.

[2] C. Aviation, The Rules of the Air Regulations, no. 734, 1996.

[3] P. K. Menon, G. D. Sweriduk, and B. Sridhar, Optimal Strategies for Free-Flight Air Traffic Conflict Resolution, J. Guid. Control. Dyn, vol. 22, pp. 202–211, 1999.

[4] A. L. Visintini, W. Glover, J. Lygeros, and J. Maciejowski, Monte {Carlo} {Optimization} for {Conflict} {Resolution} in {Air} {Traffic} {Control}, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 7, no. 4, pp. 470–482, 2006.

[5] A. U. Raghunathan, V. Gopal, D. Subramanian, L. T. Biegler, and T. Samad, Dynamic Optimization Strategies for Three-Dimensional Conflict Resolution of Multiple Aircraft, J. Guid. Control. Dyn, vol. 27, no. 4, pp. 586–594, 2008.

[6] S. Cafieri and D. Rey, Maximizing the number of conflict-free aircraft using mixed-integer nonlinear programming, Comput. Oper. Res., vol. 80, pp. 147–158, 2017.

[7] Y. Lu, B. Zhang, and X. Zhang, Air conflict resolution algorithm based on optimal control, Proc. 33rd Chinese Control Conf. CCC 2014, no. c, pp. 8919–8923, 2014.

[8] M. Zhang, J. Yu, Y. Zhang, S. Wang, and H. Yu, Flight conflict resolution during low-altitude rescue operation based on ensemble conflict models, Adv. Mech. Eng., vol. 9, no. 4, p. 168781401769665, 2017.

[9] E. Calvo-Fernández, L. Perez-Sanz, J. M. Cordero-García, and R. M. Arnaldo-Valdés, Conflict-Free Trajectory Planning Based on a Data-Driven Conflict-Resolution Model, J. Guid. Control. Dyn, vol. 40, no. 3, pp. 615–627, 2016.

[10] W. Chen, J. Chen, Z. Shao, and L. T. Biegler, Three-Dimensional Aircraft Conflict Resolution Based on Smoothing Methods, J. Guid. Control. Dyn, vol. 39, no. 7, pp. 1481–1490, 2016.

[11] S. R. Wolfe, P. A. Jarvis, F. Y. Enomoto, M. Sierhuis, and B.-J. Van Putten, A Multi-Agent Simulation of Collaborative Air Traffic Flow Management, Multi-Agent Syst. Traffic Transp. Eng., 2011.

[12] Z. H. Mao, D. Dugail, and E. Feron, Space partition for conflict resolution of intersecting flows of mobile agents, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 8, no. 3, pp. 512–527, 2007.

[13] Z.-H. Mao, E. Feron, and D. Dugail, Stability of intersecting aircraft flows under centralized and decentralized conflict avoidance rules, vol. 2, no. 2, pp. 101–109, 2013.

[14] S. Huang, E. Feron, G. Reed, and Z. H. Mao, Compact configuration of aircraft flows at intersections, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 15, no. 2, pp. 771–783, 2014.

[15] J. K. Kuchar and L. C. Yang, A review of conflict detection and resolution modeling methods, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 1, no. 4, pp. 179–189, 2000.

[16] T. Mylvaganam and M. Sassano, Autonomous collision avoidance for wheeled mobile robots using a differential game approach, Eur. J. Control, vol. 40, pp. 53–61, 2018.

[17] W. Lin, Distributed UAV formation control using differential game approach, Aerosp. Sci. Technol., vol. 35, no. 1, pp. 54–62, 2014.

[18] D. Gu, A differential game approach to formation control, IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 16, no. 1, pp. 85–93, 2008.

[19] P. K. A. Menon, Optimal helicopter trajectory planning for terrain following flight, J. Heat Transfer, vol. 125, no. October, pp. 788–794, 1990.

[20] W. Lin, Differential Games for Multi-agent Systems under Distributed Information, 2013.

[21] T. Mylvaganam, M. Sassano, and A. Astolfi, A Differential Game Approach to Multi-agent Collision Avoidance, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 62, no. 8, pp. 4229–4235, 2017.

[22] T. Mylvaganam, M. Sassano, and A. Astolfi, A Differential Game Approach to Multi-agent Collision Avoidance, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 62, no. 8, pp. 4229–4235, 2017.

[23] M. Sassano, S. Member, and A. Astolfi, Dynamic Approximate Solutions of the HJ Inequality and of the HJB Equation for Input-Affine Nonlinear Systems, vol. 57, no. 10, pp. 2490–2503, 2012.

[24] P. A. Johnson, Numerical Solution Methods for Differential Game Problems, 2009.

[25] Z. Nikooeinejad, A. Delavarkhalafi, and M. Heydari, A numerical solution of open-loop Nash equilibrium in nonlinear differential games based on Chebyshev pseudospectral method, J. Comput. Appl. Math., vol. 300, pp. 369–384, 2016.

[26] C. R. HARGRAVES and S. W. PARIS, Direct trajectory optimization using nonlinear programming and collocation, J. Guid. Control. Dyn, vol. 10, no. 4, pp. 338–342, 2008.

[27] M. A. Patterson et al., an Overview of Three Pseudospectral Methods for the Numerical Solution of Optimal Control, Aas 09, pp. 1–17, 2009.

[28] T. Guo, J. Li, H. Baoyin, and F. Jiang, Pseudospectral methods for trajectory optimization with interior point constraints: Verification and applications, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 49, no. 3, pp. 2005–2017, 2013.

[29] R. Dai, Three-dimensional aircraft path planning based on nonconvex quadratic optimization, Proc. Am. Control Conf., pp. 4561–4566, 2014.

[30] N. E. Smith, R. Cobb, S. J. Pierce, and V. Raska, Optimal Collision Avoidance Trajectories via Direct Orthogonal Collocation for Unmanned/Remotely Piloted Aircraft Sense and Avoid Operations, no. January, 2014.

[31] P. Bonami, A. Olivares, M. Soler, and E. Staffetti, Multiphase Mixed-Integer Optimal Control Approach to Aircraft Trajectory Optimization, J. Guid. Control. Dyn, vol. 36, no. 5, pp. 1267–1277, 2013.

[32] A. W. Starr and Y. C. Ho, Nonzero-Sum Differential Games 1, J. Optim. Theory Appl., vol. 3, no. 3, pp. 184–206, 1969.

[33] T. Başar, A. Haurie, and G. Zaccour, Nonzero-sum differential games, Handb. Dyn. Game Theory, vol. 3, no. 3, pp. 61–110, 2018.

[34] P. Method, Solving Nash Differential Game Based on Minimum Principle and Pseudo-spectral Method, no. 1, pp. 173–177, 2016.
[35] A. V Rao, C. L. Darby, and M. Patterson, User's Manual for GPOPS Version 2. 3 : A MATLAB R Software for Solving Multiple-Phase Optimal Control Problems Using the Gauss Pseudospectral Method, no. August, 2009.
[36] J. Holden, N. Goel, and UBER, Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation, VertiFlite, pp. 1–98, 2016.
[37] E. D'Amato, M. Mattei, and I. Notaro, Distributed Reactive Model Predictive Control for Collision Avoidance of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace, J. Intell. Robot. Syst., vol. 97, no. 1, pp. 185–203, 2020.
[38] R. K. Cecen and C. Cetek, Conflict-free en-route operations with horizontal resolution manoeuvers using a heuristic algorithm, Aeronaut. J., vol. 124, no. 1275, pp. 767–785, May 2020.
[39] D. P. Thipphavong et al., Urban Air Mobility Airspace Integration Concepts and Considerations, 2018.

پی‌نوشت

1. Visual Flight Rule
2. Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
3. Noninferior
4. Psudeo-spectral
5. Karush–Kuhn–Tucker
6. Load factor
7. Nash Equilibrium
8. Minimax
9. Open source
10. Lilium Jet