بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مکانیک

طراحی فیلتر حرکت برای شبیه ساز پرواز سه درجه آزادی

پایان نامه کارشناسی ارشد طراحی کاربردی

بهروز محمدی

استاد راهنما
دکتر محمد جعفر صدیق

۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته طراحی کاربردی آقای بهروز محمدی

تحت عنوان

طراحی فیلتر حرکت برای شبیه ساز پرواز سه درجه آزادی

در تاریخ ۱۳۸۷/۹/۱۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر محمد جعفر صدیق
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر مهدی کشمیری
۳- استاد داور	دکتر سعید بهبهانی
۴- استاد داور	دکتر محمد دانش
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مهدی کشمیری

این رساله با راهنمایی و نظارت استاد محترم جناب آقای دکتر محمد جعفر صدیق تهیه و تنظیم شده است.
بدینوسیله تشکر بی پایان خود را از زحمات ایشان ابراز داشته و از خداوند توفیق روز افزون برایشان آرزو می کنم.
همچنین از آقایان دکتر مهدی کشمیری، دکتر سعید بهبهانی و دکتر محمد دانش که زحمت مطالعه و اظهار نظر در مورد این تحقیق را تقبل فرمودند، سپاسگزاری می نمایم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به پدر و مادر مهربان

و همسر عزیزم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- پیشگفتار ۲

۱-۲- مرور کارهای انجام شده ۶

۱-۳- روند بحث و روش انجام کار ۷

فصل دوم: موضوعات و مفاهیم علمی مرتبط با تحقیق

۲-۱- درجات آزادی هواپیما و شبیه ساز ۸

۲-۲- احساس بدن انسان از حرکات مختلف ۹

۲-۳- دستگاه های مختصات مرجع ۱۰

۲-۴- تبدیل مختصات ۱۱

۲-۴-۱- انتقال ۱۱

۲-۴-۲- دوران ۱۲

۲-۵- سکوی متحرک سه درجه آزادی شبیه ساز پرواز ۱۳

۲-۵-۱- سینماتیک معکوس ۱۵

۲-۶- مقیاس دهی و محدود کردن ورودی ۱۸

۲-۶-۱- مقیاس دهی خطی و محدود کردن ۱۸

۲-۶-۲- مقیاس دهی غیر خطی ۱۹

فصل سوم: طراحی فیلتر حرکت کلاسیک برای شبیه ساز شش درجه آزادی

۳-۱- پیشگفتار ۲۱

۳-۲- Washout Location ۲۲

۳-۳- الگوریتم کلاسیک ۲۳
۳-۳-۱- درجات آزادی انتقالی ۲۳
۳-۳-۲- درجات آزادی دورانی ۲۳
۳-۳-۳- Tilt-Coordination ۲۴
۳-۴- تنظیم پارامترهای فیلتر حرکت کلاسیک ۲۵
۳-۴-۱- خطای احساس غلط ۳۰
۳-۴-۲- خطای مقیاس دهی و محدود کردن یا عدم احساس ۳۴
۳-۴-۳- خطای فاز ۳۷
۳-۴-۴- تأثیر تغییرات پارامترهای الگوریتم کلاسیک بر مشخصات آن ۳۷
۳-۵- تطبیق حرکات دورانی شبیه ساز و هواپیما ۳۸
۳-۶- بازگشت به وضعیت صفر حرکت چرخش ۳۹
۳-۷- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانورهای مختلف ۴۰
۳-۷-۱- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانور ۱ ..... ۴۱
۳-۷-۲- مزایا و معایب الگوریتم کلاسیک ۴۲

فصل چهارم: طراحی فیلتر حرکت ترکیبی کلاسیک-وفقی برای شبیه ساز شش درجه آزادی

۴-۱- پیشگفتار ۴۳
۴-۲- معرفی الگوریتم وفقی ۴۴
۴-۲-۱- فاز پیچش/ رو به جلو ۴۵
۴-۲-۲- فاز غلتش/ جانبی ۴۵
۴-۲-۳- فاز چرخش ۴۵
۴-۲-۴- فاز خیز ۴۶
۴-۲-۵- محاسبه پارامترهای وفقی به روش شیب نزولی ۴۶
۴-۲-۶- مزایا و معایب الگوریتم وفقی ۴۷
۴-۳- الگوریتم ترکیبی کلاسیک- وفقی ۴۸

۴-۳-۱- وجه مشترک الگوریتم ترکیبی با الگوریتم های کلاسیک و وفقی ۴۸
۴-۴- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانورهای مختلف ۵۱
۴-۴-۱- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانور ۱ ..... ۵۲
۴-۴-۲- مزایا و معایب الگوریتم ترکیبی ۵۴

فصل پنجم: الگوریتم اصلاح فیلتر شش درجه آزادی برای شبیه ساز سه درجه آزادی

۵-۱- پیشگفتار ۵۵
۵-۲- الگوریتم on/off ۵۶
۵-۳- الگوریتم جمع ساده ۵۶
۵-۴- الگوریتم جدید ۵۷
۵-۴-۱- محاسبه پارامترهای وفقی به روش شیب نزولی ۶۰
۵-۵- مقایسه رفتار فیلترهای مختلف سه درجه ۶۱
۵-۶- بررسی رفتار شبیه ساز سه درجه آزادی در مانورهای مختلف ۷۱
۵-۶-۱- بررسی رفتار شبیه ساز سه درجه آزادی در مانور ۱ ..... ۷۲

فصل ششم: نتایج، نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتایج رفتار فیلترهای حرکت در مانورهای مختلف ۷۳
۶-۱-۱- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانور ۲ ..... ۷۵
۶-۱-۲- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانور ۳ ..... ۷۶
۶-۱-۳- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانور ۴ ..... ۷۷
۶-۱-۴- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانور ۵ ..... ۷۸
۶-۱-۵- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانور ۶ ..... ۷۹
۶-۱-۶- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانور ۷ ..... ۸۰
۶-۱-۷- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانور ۸ ..... ۸۱
۶-۱-۸- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانور ۹ ..... ۸۲
۶-۱-۹- بررسی رفتار الگوریتم کلاسیک در مانور ۱۰ ..... ۸۳

۶-۱-۱۰- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانور ۲ ..... ۸۵
۶-۱-۱۱- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانور ۳ ..... ۸۷
۶-۱-۱۲- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانور ۴ ..... ۸۸
۶-۱-۱۳- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانور ۵ ..... ۸۹
۶-۱-۱۴- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانور ۶ ..... ۹۰
۶-۱-۱۵- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانور ۷ ..... ۹۱
۶-۱-۱۶- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانور ۸ ..... ۹۲
۶-۱-۱۷- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانور ۹ ..... ۹۳
۶-۱-۱۸- بررسی رفتار الگوریتم ترکیبی در مانور ۱۰ ..... ۹۴
۶-۱-۱۹- بررسی رفتار شبیه ساز سه درجه آزادی در مانور ۲ ..... ۹۶
۶-۱-۲۰- بررسی رفتار شبیه ساز سه درجه آزادی در مانور ۳ ..... ۹۷
۶-۱-۲۱- بررسی رفتار شبیه ساز سه درجه آزادی در مانور ۴ ..... ۹۹
۶-۱-۲۲- بررسی رفتار شبیه ساز سه درجه آزادی در مانور ۱۰ ..... ۱۰۰
۶-۲- نتیجه گیری و جمع بندی ۱۰۲
۶-۳- پیشنهادات ۱۰۴
مراجع ۱۰۵
چکیده انگلیسی ۱۰۷

نمادها

$()_S$ کمیت مربوط به شبیه ساز

$()_A$ کمیت مربوط به هواپیما

$()_{PS}$ کمیت مربوط به خلبان شبیه ساز

$()_{PA}$ کمیت مربوط به خلبان هواپیما

$()_a$ کمیت با مقدار واقعی مربوط به هواپیما

$()_x$ کمیت مربوط به راستای x

$()_y$ کمیت مربوط به راستای y

$()_z$ کمیت مربوط به راستای z

$()_\psi$ کمیت مربوط به حرکت چرخش

$()_{3DOF}$ کمیت مربوط به شبیه ساز سه درجه آزادی

$()_{6DOF}$ کمیت مربوط به شبیه ساز شش درجه آزادی

$()_h$ کمیت مربوط به جزء فرکانس بالا

$()_l$ کمیت مربوط به جزء فرکانس پایین

$()^S$ کمیت بیان شده در دستگاه مختصات شبیه ساز

$()^I$ کمیت بیان شده در دستگاه مختصات اینرسی

$()^A$ کمیت بیان شده در دستگاه مختصات هواپیما

$\underline{()}$ کمیت برداری

چکیده

امروزه شبیه سازها به عنوان وسایلی جهت آموزش، آزمایش، شبیه سازی حرکت و طراحی سیستم ها، در زمینه های مختلف تحقیقاتی و صنعتی به کار گرفته می شوند. شبیه سازی از راهکارهای اساسی کاهش هزینه ها و افزایش قابلیت اعتماد در موارد ذکر شده می باشد. شبیه‌سازهای پرواز نیز در رشد و توسعه صنعت هوافضا نقش بسزایی دارند.

هدف از این تحقیق، طراحی فیلتر حرکت برای شبیه سازی پرواز توسط یک شبیه ساز سه درجه آزادی می باشد. سکوی متحرک شبیه سازهای پرواز از طریق ایجاد حرکاتی متناظر با حرکت واقعی هواپیما نقش مهمی در القاء احساس واقعی حرکت در خلبان دارد. هر چند از آنجا که یک شبیه ساز پرواز بر روی زمین ثابت است و دارای فضای کاری محدودی است و قادر به تامین حرکات واقعی یک هواپیما نیست، بایستی به بهترین نحو قابلیت های آن را مورد استفاده قرار داد تا قسمت های قابل احساس و ضروری حرکات را تامین کند. در ضمن در این فرآیند باید از ایجاد حرکات غیر واقعی و احساس های غلط اجتناب شود. وظیفه مقیاس نمودن و حذف حرکت های غیرمهم و یا غیر قابل تقلید توسط سکوی متحرک شبیه ساز بر عهده فیلتر حرکت شبیه ساز قرار دارد. فیلتر حرکت شبیه ساز، شتاب ها و سرعت‌هایی را که در پرواز واقعی احساس می‌شوند، به نحوی بازتولید و فیلتر می کند که شبیه ساز مورد نظر از محدوده عملکرد فیزیکی خود خارج نشود. به عبارت دیگر، فیلترهای حرکت به نحوی طراحی می شوند که ضمن برآوردن قیود حرکتی سکوی متحرک، احساس لازم را نیز در خلبان ایجاد نمایند. از دیگر محدودیت های شبیه سازی این است که، سکوی متحرک شبیه ساز از تمامی درجات آزادی هواپیما برخوردار نباشد. یکی از مسائل موجود در این رابطه، جبران حرکات انتقالی جانبی و رو به جلو در شبیه ساز سه درجه آزادی است که قابلیت تامین حرکات خیز، غلتش و پیچش را دارد. در این راستا فیلتر حرکت شش درجه باید به نحوی اصلاح شود تا حرکات مذکور را بتوان بازتولید نمود.

در این تحقیق، علاوه بر طراحی فیلترهای حرکت کلاسیک و ترکیبی کلاسیک-وفقی برای شبیه ساز شش درجه آزادی، الگوریتم جدیدی برای تبدیل فیلتر های شش درجه آزادی به سه درجه آزادی ارائه شده است و از آنجا که شبیه سازهای سه درجه آزادی هزینه و پیچیدگی کمتری در مقایسه با انواع شش درجه دارند، فیلتر مذکور جهت پیاده سازی بر روی این نوع شبیه ساز طراحی شده است.

الگوریتم کلاسیک طراحی شده برای شبیه ساز شش درجه آزادی، شامل فیلترهای خطی بالاگذر و پایین گذر با پارامترهای ثابت می باشد. تنظیم پارامترهای ثابت این الگوریتم نیز که از مراحل اساسی در طراحی فیلترهای حرکت می باشد، بررسی شده است. همچنین الگوریتمی جهت بازگرداندن زاویه چرخش به وضعیت صفر و نیز تطبیق حرکات دورانی شبیه ساز و هواپیما ارائه شده است. ویژگی اصلی الگوریتم کلاسیک، سادگی و قابل فهم بودن آن است.

در ادامه الگوریتم وفقی معرفی شده است که دارای فیلترهای غیر خطی است و پارامترهای آن با استفاده از اصول کنترل وفقی بدست می‌آیند. الگوریتم ترکیبی کلاسیک- وفقی به عنوان طرح بعدی برای شبیه سازهای شش درجه آزادی انتخاب و طراحی شده است که این الگوریتم، فیلترهای غیر خطی وفقی را در ساختار کلی الگوریتم کلاسیک به کار می گیرد و پارامترهای آن بر اساس اصول کنترل وفقی و مطابق با وضعیت جاری شبیه ساز بدست می آیند. این الگوریتم، طرح هایی را از دو الگوریتم کلاسیک و وفقی الگو گرفته است و در عین ساده تر بودن نسبت به نوع وفقی، نتایج بهتری را در مقایسه با نوع کلاسیک می دهد.

جهت تبدیل فیلترهای حرکت شش درجه آزادی به سه درجه آزادی، الگوریتم جدیدی طراحی شده است که این الگوریتم نیز بر اساس اصول کنترل وفقی عمل کرده و شتاب های خطی مورد نیاز در حرکات رو به جلو و جانبی را با اعمال شتاب زاویه ای مناسب به سکوی متحرک، بازتولید می کند. نتایج حاصل از این الگوریتم، با نتایج الگوریتم جمع ساده آثار مقایسه شده است که نشان از برتری الگوریتم جدید در حرکات دورانی دارد. نتایجی که برای فیلترهای شش درجه و سه درجه، در مانورهای مختلف ارائه شده است، حاکی از آن است که فیلتر حرکت طراحی شده برای شبیه ساز سه درجه آزادی در مقایسه با انواع شش درجه، شتاب های خطی مورد نیاز را نسبتاً خوب بازتولید می کند.

فصل اول
مقدمه

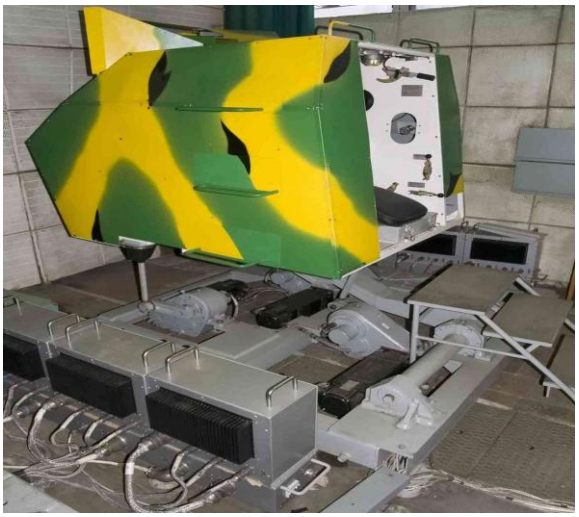
۱-۱- پیشگفتار

امروزه شبیه سازها به عنوان وسایلی جهت آموزش، آزمایش، شبیه سازی حرکت و طراحی سیستم ها، در زمینه های مختلف تحقیقاتی و صنعتی به کار گرفته می شوند. به عنوان مثال، شبیه سازهایی که جهت آموزش به کار گرفته می‌شوند، از آن جهت مورد توجه قرار گرفته اند که با استفاده از آنها می توان شخص کارآموز را در یک محیط مصنوعی و دور از خطرات موجود در محیط واقعی آموزش داد و همان موانع و مشکلاتی را که در محیط واقعی وجود دارند، به طور مجازی شبیه سازی نمود. موارد مذکور سبب گردیده است که شبیه سازها به طور وسیع در صنایع مختلف، مورد استفاده قرار گیرند. جهت پی بردن به اهمیت شبیه سازها در زمینه های مختلف علمی و صنعتی، به چند نمونه از شبیه سازهای موجود اشاره می گردد:

- شبیه ساز زلزله برای آزمایش سازه هایی نظیر ساختمان های مرتفع، پلها و مخازن سوخت
  شبیه ساز انواع خودروهای نظامی و غیر نظامی نظیر تانک، کامیون، اتوبوس و اتومبیل های سواری و موتور سیکلت (شکل های ۱-۱ و ۱-۲)
- شبیه سازهای تفریحی مانند سفینه های فضایی و پروازهای آکروباتیک
- شبیه سازهایی جهت آموزش و آزمایش موارد خاصی همچون آموزش شلیک انواع موشک های تخریبی، آزمایش چگونگی عملکرد سیستم های موشکی، آموزش خلبان و نیز آموزش رانندگی
- شبیه ساز برای آموزش دستگاه های حساس مراکز تولید نیروگاه ها و کارخانجات ذوب فلزات
- شبیه ساز جهت شبیه سازی حرکات هواپیما، کشتی، بالگرد، قایق و ... (شکل های ۱-۳ و ۱-۴).

شبیه سازی از راهکارهای اساسی کاهش هزینه ها و افزایش قابلیت اعتماد در موارد ذکر شده می باشد.

شکل ۱-۱- شبیه ساز کامیون بنز؛ اقتباس از www.carsim.com/products/ds



شکل ۱-۲- شبیه ساز تانک؛ اقتباس از www.morozov.com.ua

شکل ۱-۳- شبیه ساز قایق؛ اقتباس از www.maritime.itu.edu.tr

شبیه سازهای پرواز نیز در رشد و توسعه صنعت هوافضا نقش بسزایی دارند.

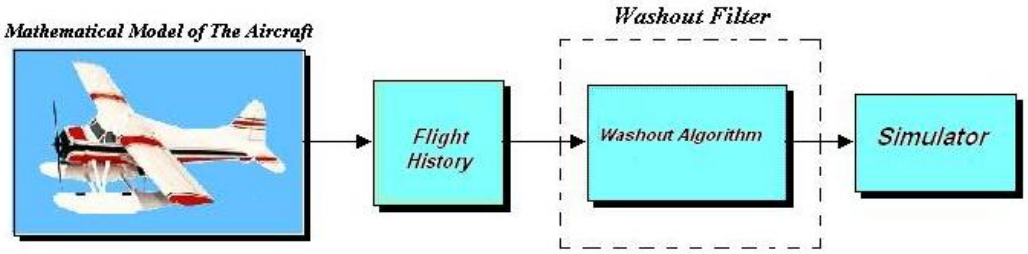
در این تحقیق طراحی فیلتر حرکت[1] برای شبیه سازی پرواز توسط یک شبیه ساز سه درجه آزادی بررسی شده است. سکوی متحرک شبیه سازهای پرواز از طریق ایجاد حرکاتی متناظر با حرکت واقعی هواپیما نقش مهمی در القاء احساس واقعی حرکت در خلبان دارد. هر چند از آنجا که یک شبیه ساز پرواز بر روی زمین ثابت است و دارای فضای کاری محدودی است و قادر به تأمین حرکات واقعی یک هواپیما نیست، بایستی به بهترین نحو قابلیت های آن را مورد استفاده قرار داد تا قسمت های قابل احساس و ضروری حرکات را تامین کند. در ضمن در این فرآیند باید از ایجاد حرکات غیر واقعی و احساس های غلط اجتناب شود، زیرا این احساس های غیر واقعی در بعضی از پروازها، اثرات منفی زیادی دارند. وظیفه مقیاس نمودن و حذف حرکت های غیر مهم و یا غیر قابل تقلید توسط سکوی متحرک شبیه ساز به عهده فیلتر حرکت شبیه‌ساز قرار دارد. فیلتر حرکت شبیه ساز، شتاب ها و سرعت هایی که در پرواز واقعی احساس می شوند را به نحوی بازتولید و فیلتر می کند که شبیه ساز مورد نظر از محدوده عملکرد فیزیکی خود خارج نشود.

شکل۱-۴- شبیه ساز بویینگ ۷۳۷ ؛ اقتباس از www.boeing.com

از دیگر محدودیت های شبیه سازی این است که، سکوی متحرک شبیه ساز از تمامی درجات آزادی هواپیما برخوردار نباشد. یکی از مسائل موجود در این رابطه، جبران حرکات انتقالی جانبی و رو به جلو در شبیه ساز سه درجه آزادی است که قابلیت تامین حرکات خیز، غلتش و پیچش را دارد. در این راستا فیلتر حرکت شش درجه باید به نحوی اصلاح شود تا حرکات مذکور را بتوان بازتولید نمود. چگونگی قرارگیری فیلتر حرکت در مدار شبیه سازی پرواز در شکل۱-۵ نشان داده شده است. در این راستا، آگاهی از محدوده احساس انسان از حرکات مورد نظر و شناسائی محدوده عملکرد شبیه ساز مورد استفاده، ضروری است.

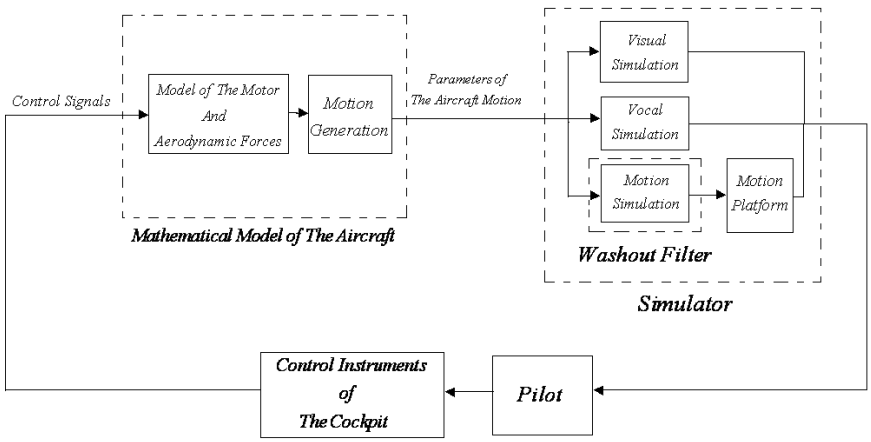
[1].Washout Filter

در تحقیق حاضر، علاوه بر طراحی فیلترهای حرکت کلاسیک[1] و ترکیبی کلاسیک- وفقی[2] برای شبیه ساز شش درجه آزادی، الگوریتم جدیدی برای تبدیل فیلتر های شش درجه به سه درجه ارائه شده است و از آنجا که شبیه سازهای سه درجه آزادی هزینه و پیچیدگی کمتری در مقایسه با انواع شش درجه دارند، فیلتر مذکور جهت پیاده سازی بر روی این نوع شبیه ساز طراحی شده است. مکانیزم شبیه سازی موجود در آزمایشگاه رباتیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، دارای سه درجه آزادی غلتش، پیچش و خیز می باشد.



شکل۱-۵- چگونگی قرار گیری فیلتر حرکت در مدار شبیه سازی پرواز

سیستم حرکتی شبیه ساز معمولاً به طور هماهنگ با یک سیستم صوتی و تصویری کار می کند تا فرآیند شبیه سازی موثرتر باشد، که در این تحقیق در مورد این سیستم کار نشده است. شکل۱-۶، مدار شبیه سازی پرواز را نشان می‌دهد. در ضمن اطلاعاتی در مورد احساس خلبان از هر کدام از حرکات هواپیما و اهمیت و نحوه شبیه سازی آنها و موارد مختلفی از قبیل مدارهای هیدرولیکی و محرک ها، مسائل کنترلی و طراحی که هر کدام به نوبه خود عوامل مهمی در صنعت شبیه سازی هستند، را می توان در کتب و مقالات مربوطه یافت. به عبارت دیگر، شبیه سازی پرواز محدوده گسترده ای از علوم و تکنولوژی را در بر می گیرد.



شکل۱-۶- مدار شبیه سازی پرواز

[1].Classic
[2].Hybrid

۱-۲- مرور کارهای انجام شده

طرح های مختلفی برای الگوریتم های فیلتر حرکت شبیه سازهای پرواز، در ۳۰ سال اخیر ارائه شده است. برای شبیه‌سازهای شش درجه آزادی ابتدا الگوریتم کلاسیک در سال ۱۹۷۰ توسط اشمیت و کنراد طراحی شده است، که به دلیل اینکه از لحاظ ریاضیاتی و محاسباتی، ساده و قابل فهم است، بیشترین استفاده را تا کنون داشته است[۱]. این الگوریتم شامل فیلترهای خطی بالا گذر و پایین گذر برای شتاب های خطی و سرعت های زاویه ای می باشد و پارامترهای ثابت آن به روش سعی و خطا تعیین می شود.

الگوریتم وفقی در سال ۱۹۷۳ توسط پریش و همکارانش ارائه شد که در سال های اخیر توجه زیادی را به خود معطوف کرده است[۲]. این الگوریتم شامل فیلترهای غیر خطی است که با هدف تطبیق دادن فیلترها با وضعیت جاری شبیه ساز، از اصول کنترل وفقی استفاده کرده و یک تابع هزینه را که شامل اختلاف وضعیت جاری شبیه ساز از وضعیت صفر است، از طریق روش شیب نزولی، حداقل می کند.

الگوریتم کنترل بهینه طرح دیگری است که در سال ۱۹۸۲ توسط سیوان و همکارانش ارائه شده است[۳]. این الگوریتم، یک فیلتر خطی بهینه را در راستای حداقل کردن یک معیار یا تابع هزینه مشخص، طراحی می کند، که معیار یا تابع هزینه، خطای احساس خلبان و حرکات شبیه ساز را به طور همزمان در بر می گیرد.

طرح ترکیبی کلاسیک-وفقی نیز در سال ۱۹۹۲ توسط اسلایرگت و دوربلو پیشنهاد شده است[۴]. این طرح، فیلترهای غیر خطی وفقی را در ساختار کلی طرح کلاسیک به کار گرفته است و این امر باعث شده است که با وجود داشتن طبیعت غیر خطی، هم از قابلیت فهم نسبی برخوردار باشد و هم حرکت شبیه سازی شده به واقعیت نزدیک تر باشد.

در سال ۱۹۹۶ آیدان و ساهار فیلترهای کنترل مقاوم را ارائه داده اند که با تأکید بر مدل دینامیکی شبیه ساز، در مواقعی کاربرد دارد که قدرت سیستم محرک کم باشد و یا کنترل موقعیت شبیه ساز غیر دقیق و ساده باشد[۵]. این فیلتر یک کنترل کننده حلقه بسته است که شامل مدل دینامیکی شبیه ساز، سیستم اندازه گیری احساس انسان و مدل دینامیکی هواپیما می باشد. این کنترل کننده نسبت به تغییرات پارامترهای شبیه ساز مانند خواص اینرسی سکوی متحرک و مشخصه های عملگرها، مقاوم می باشد.

روش کنترل شبه بهینه و طرح نیمه هوشمند نیز که به ترتیب توسط فریدلند و هافمن ارائه شده اند، از دیگر طرح ها هستند که کمتر مورد توجه قرار گرفته اند[۶] و [۷].

در سال ۲۰۰۴ لیائو و همکارانش طرحی را برای بازگشت شبیه ساز به وضعیت صفر ارائه داده اند که هماهنگ با الگوریتم کلاسیک عمل می کند[۸]. در این طرح، در مواقعی که حرکت توسط خلبان احساس نمی شود، شبیه ساز با سرعت زاویه ای و شتاب خطی که احساس نمی شود، به وضعیت صفر خود باز می گردد. گرانت و ناصری نیز در سال ۲۰۰۵ از الگوریتم ترکیبی کلاسیک-وفقی استفاده کرده و وضعیت جاری جک ها را نیز در تابع هزینه وارد نمودند[۹]. ضمناً شیب نزول تابع هزینه را نیز با توجه به وضعیت جاری شبیه ساز، متغیر در نظر گرفتند.

در مورد شبیه سازهای با درجات آزادی کمتر، طرح های کمتری ارائه شده است. از جمله الگوریتم جمع ساده طراحی شده برای فیلتر حرکت شبیه ساز سه درجه آزادی شامل درجات آزادی غلتش، پیچش و خیز، که توسط

پولیوت و همکارانش در سال ۱۹۹۸ پیشنهاد شده است[۱۰]. در این طرح، شتاب خطی افقی بدست آمده از الگوریتم کلاسیک از طریق اعمال شتاب زاویه ای مناسب به سکوی متحرک، در محل سر خلبان بازتولید می شود. گاتریج نیز در سال ۲۰۰۴ طرح مشابهی را برای شبیه ساز سه درجه آزادی شامل همه درجات آزادی دورانی، ارائه داده است[۱۱].

۱-۳- روند بحث و روش انجام کار

این تحقیق شامل پنج فصل می باشد، که فصل دوم مفاهیم علمی مرتبط با موضوع تحقیق را در بر می گیرد و شامل معرفی درجات آزادی هواپیما، تعریف دستگاه های مختصات مرجع، تبدیل مختصات، احساس انسان از حرکات مختلف، معرفی سکوی متحرک سه درجه آزادی و روش مقیاس دهی و محدود کردن ورودی فیلتر حرکت، می‌باشد.

در فصل سوم الگوریتم کلاسیک طراحی شده برای شبیه ساز شش درجه آزادی ارائه شده است. تنظیم پارامترهای ثابت این الگوریتم نیز که از مراحل اساسی در طراحی فیلترهای حرکت می باشد، در این فصل بررسی شده است. در این فصل همچنین الگوریتمی جهت بازگرداندن زاویه چرخش[1] به وضعیت صفر و نیز تطبیق حرکات دورانی شبیه‌ساز و هواپیما ارائه شده است. از آنجا که فیلترهای کلاسیک به دلیل داشتن پارامترهای ثابت، تنها برای مانورهای ملایم و از پیش تعیین شده کاربرد دارند، به همین منظور الگوریتم هایی بر اساس اصول کنترل وفقی ارائه شدند تا ضمن کاهش پارامترهای ثابت و عدم نیاز به تنظیم پارامترها، با کنترل بر اختلاف حرکت بدست آمده از فیلتر و حرکت متناظر در هواپیما، نتیجه مطلوب‌تری را برای خلبان داشته باشند. در فصل چهارم، ابتدا به معرفی الگوریتم وفقی برای شبیه ساز شش درجه آزادی پرداخته شده است، که شامل فیلترهای غیرخطی است و پارامترهای این فیلترها، بر اساس اصول کنترل وفقی بدست می‌آیند. الگوریتم ترکیبی کلاسیک-وفقی به عنوان طرح بعدی انتخاب و طراحی شده است که این الگوریتم، فیلترهای غیر خطی وفقی را در ساختار الگوریتم کلاسیک به کار می گیرد و ساده تر از نوع وفقی می‌باشد.

جهت جبران حرکات انتقالی جانبی و رو به جلو در شبیه ساز سه درجه آزادی که قابلیت تامین حرکات خیز، غلتش و پیچش را دارد، فیلترهای شش درجه باید اصلاح شوند، به این ترتیب که حرکت باز تولید شده توسط الگوریتم شش درجه به عنوان ورودی به الگوریتم سه درجه داده می شود و حرکت مورد نظر با توجه به درجات آزادی که تامین آن‌ها برای شبیه ساز سه درجه آزادی امکان پذیر می باشد، بدست می آید. در فصل پنجم، الگوریتم جدیدی جهت تبدیل فیلترهای حرکت شش درجه آزادی به سه درجه آزادی طراحی شده است. این الگوریتم نیز بر اساس اصول کنترل وفقی طراحی شده است و شتاب های خطی مورد نیاز در حرکات رو به جلو و جانبی را با اعمال شتاب زاویه ای مناسب به سکوی متحرک، بازتولید می کند. ضمناً الگوریتم های on/off و جمع ساده نیز برای مقایسه با الگوریتم جدید مذکور، معرفی شده اند.

فصل ششم شامل نتایج رفتار فیلترهای حرکت، نتیجه گیری و پیشنهاداتی در این زمینه می باشد.

---

[1] .Yaw

فصل دوم
موضوعات و مفاهیم علمی مرتبط با تحقیق

۲-۱- درجات آزادی هواپیما و شبیه ساز

هواپیما به عنوان یک جسم صلب، دارای شش درجه آزادی می باشد، که شامل سه درجه آزادی انتقالی رو به جلو[۱]، جانبی[۲] و خیز[۳] در راستاهای x , y , z و سه درجه آزادی دورانی غلتش[٤] ، پیچش[٥] و چرخش حول محورهای x ، y و z می شود[۱۲] (شکل۲-۱).

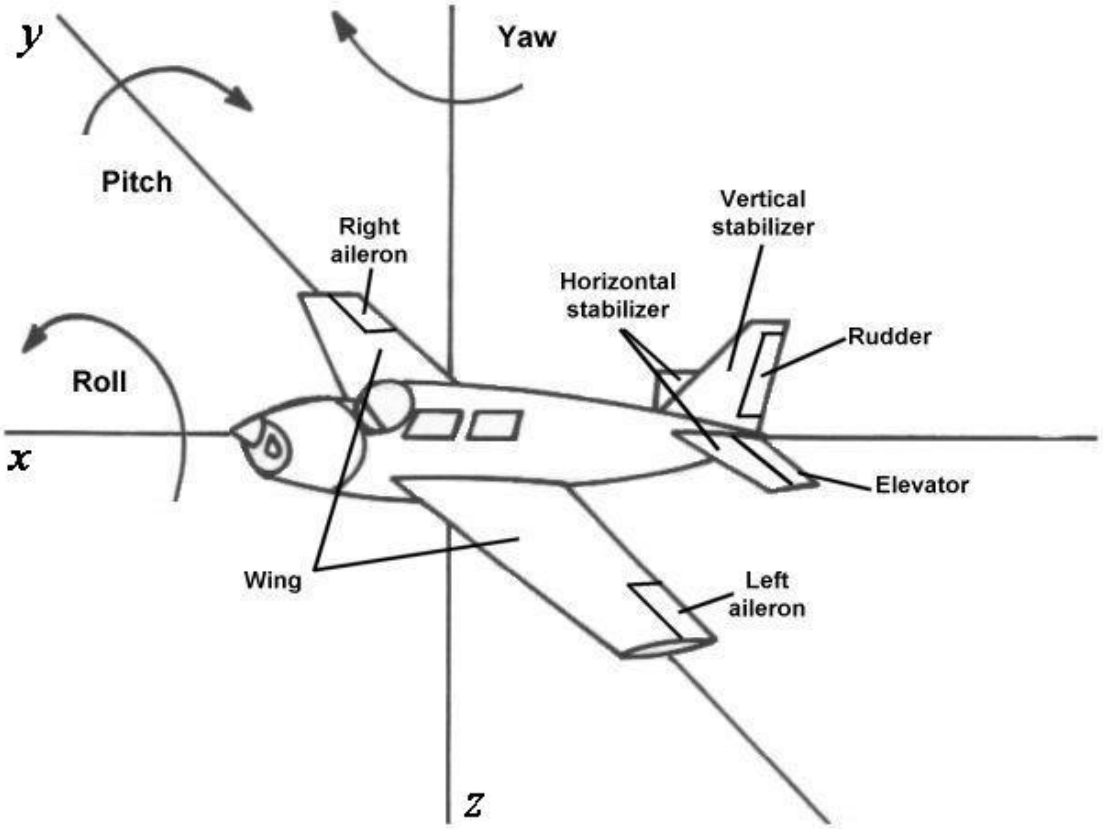
در حالت کلی، هواپیما دارای دو نوع حرکت است:

- حرکت طولی[٦] : که شامل حرکات خیز، رو به جلو و پیچش می شود.
- حرکت عرضی[۷] : که به حرکات غلتش، جانبی و چرخش مربوط می شود.

قابل ذکر است که از میان حرکات مذکور، حرکات پیچش و رو به جلو با یکدیگر هماهنگ یا سازگار[۸] می باشند و همچنین حرکات جانبی و غلتش نیز با هم سازگار هستند.

---

1. Surge
2. Sway
3. Heave
4. Roll
5. Pitch
6. Longitudinal
7. Latheral
8. Coordinate



شکل۲-۱- درجات آزادی هواپیما

شبیه سازها از لحاظ تعداد درجات آزادی متفاوت هستند که دو نوع اصلی آن عبارتند از: شش درجه آزادی و سه درجه آزادی. شبیه سازهای شش درجه آزادی، تمام درجات آزادی ذکر شده برای هواپیما را تأمین می کنند. شبیه‌سازهای سه درجه آزادی سه حرکت غلتش، پیچش و خیز و یا سه حرکت غلتش، پیچش و چرخش را تأمین می‌کنند.

۲-۲- احساس بدن انسان از حرکات مختلف

یکی از فاکتورهای مهم در طراحی فیلترهای حرکت شبیه سازهای پرواز، آگاهی از احساس انسان از حرکات مختلف هواپیما است که باعث می شود حرکت واقعی تری شبیه سازی شود.

محل احساس حرکات دورانی و خطی در بدن انسان، گوش میانی انسان می باشد. طبق آزمایشات انجام شده توسط زاخاریاس[۱۳] در این زمینه، بدن انسان برای احساس حرکات مختلف دارای میزان آستانه ای می باشد که در مورد شتاب های خطی حدود ۰/۱۷ تا ۰/۲۸ متر بر مجذور ثانیه و در مورد سرعت های زاویه ای حدود ۲/۶ تا ۳/۶ درجه بر ثانیه می باشد. در ضمن در شبیه سازی حرکات مختلف، مناسب است که حرکات را در محدوده ای از فرکانس ها در نظر گرفت که برای شتاب های خطی حدود ۰/۲ تا ۲ رادیان بر ثانیه و برای سرعت های زاویه ای حدود ۰/۲ تا ۱۰ رادیان بر ثانیه می باشد.

لازم به ذکر است که بدن انسان، شتاب های خطی را احساس می کند ولی جابجایی و سرعت خطی را احساس