



دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده مهندسی برق و الکترونیک گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق گرایش کنترل

بهبود عملکرد سیستم ناوبری اینرسی با استفاده از فیلترهای کالمن خنثی و
مکعبی

نگارش:

عبدالرحمان رضانی

استاد راهنما:

دکتر جعفر زارعی

استاد مشاور:

دکتر مختار شاصادقی

شهریور ۱۳۹۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بسمه تعالی

بهبود عملکرد سیستم ناوبری اینرسی با استفاده از فیلترهای کالمن خنثی
و مکعبی

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

نگارش:

عبدالرحمان رضانی

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه کنترل دانشکده مهندسی برق و الکترونیک

دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه: عالی

دکتر جعفر زارعی مرتبه علمی در رشته رشته تحصیلی (استاد راهنما)

دکتر مختار شاصادقی مرتبه علمی در رشته رشته تحصیلی (استاد مشاور)

دکتر بهروز صفری نژادپان مرتبه علمی در رشته رشته تحصیلی (داور)

دکتر طاهره بینازاده مرتبه علمی در رشته رشته تحصیلی (داور)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

اینجانب عبدالرحمان رضانی دانشجوی رشته برق - کنترل مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد به شماره دانشجویی ۹۰۱۱۴۰۴۷ تأیید می‌نماید کلیه نتایج این پایان‌نامه/رساله، بدون هیچگونه دخل و تصرف، حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیر مستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان‌نامه با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است.

در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی صلاح دانشگاه صنعتی شیراز، مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین‌نامه‌های آموزشی، پژوهشی و انضباطی عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را، نسبت به رأی صادره، از خود ساقط می‌کند. همچنین، هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان‌نامه/رساله در برابر اشخاص ذی نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ‌گونه مسئولیتی در این زمینه نخواهند داشت.

تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تبصره ۲- اینجانب تعهد می‌نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان‌نامه/رساله را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.

نام و نام خانوادگی دانشجو:

تاریخ و امضاء

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان‌نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تابع مقرارت دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

تقدیم به مهربان فرشتگانی که:

لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه‌های
یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور آنهاست.

تقدیم به خانواده عزیزم

تشکر و قدردانی:

اکنون که این رساله به پایان رسیده است بر خود فرض می‌دانم که از اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر زارعی و جناب آقای دکتر شاصادقی کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. چرا که با حضور و دغدغه‌های فراوانشان، خستگی‌ها و مشقت‌های راه را به امید و شیرینی تبدیل کرده و بنده را در تمام مراحل دلسوزانه راهنمایی نموده‌اند. امیدوارم بتوانم جوابگوی این همه محبت آنها باشم.

چکیده

بهبود عملکرد سیستم ناوبری اینرسی با استفاده از فیلترهای کالمن خنثی و مکعبی

نگارش:

عبدالرحمان رضانی

اگرچه مهم‌ترین مزیت سیستم ناوبری اینرسی تعیین موقعیت و وضعیت وسیله متحرک، بدون بهره‌گیری از منبع خارجی است، با این وجود عیب عمده‌ی آن نیز رشد سریع خطا در برخی کانال‌های سیستم ناوبری اینرسی است. رویکردی که به منظور رفع این مشکل به ویژه در ناوبری‌های طولانی مدت مطرح می‌گردد، تلفیق اطلاعات سیستم ناوبری اینرسی با یک سیستم کمک ناوبری بر مبنای فیلتر کالمن به منظور کاهش خطا است. الگوریتم فیلتر کالمن برای سیستم‌های دینامیک خطی دارای پاسخ مناسبی است. اما در برخی موارد مانند بسیاری از مسائل موقعیت‌یابی، به علت دینامیک غیرخطی خطا و تغییر نقطه کار، استفاده از فیلتر کالمن خطی یا توسعه‌یافته به پاسخ بهینه منجر نمی‌گردد. بنابراین نیاز به روش‌هایی که با طبیعت غیرخطی مسأله سازگار باشند، احساس می‌شود. در این پروژه با هدف دستیابی به دقت بالاتر الگوریتم‌های غیرخطی فیلتر کالمن، همچون فیلتر کالمن خنثی (UKF) و فیلتر کالمن مکعبی (CKF)، برای تلفیق داده‌های سیستم ناوبری اینرسی با یک سیستم کمک ناوبری همانند سامانه موقعیت‌یاب جهانی و یا سامانه لورن دی بکارگرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نیز حاکی از عملکرد بهتر فیلترهای غیرخطی بیان شده به منظور تخمین و حذف خطای سیستم ناوبری اینرسی هستند. این بهبود عملکرد در مورد حالت‌هایی که اندازه‌گیری از آنها در دسترس نیست، نمایان‌تر بوده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم ناوبری اینرسی، ناوبری ترکیبی، فیلتر کالمن خنثی، فیلتر

کالمن مکعبی، تلفیق داده، سامانه موقعیت‌یاب جهانی، سامانه لورن.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه.....
۳	۲-۱- هدف تحقیق و اهمیت آن.....
۵	۳-۱- بیان کلیات مسأله.....
۷	۴-۱- بخش‌های پایان نامه.....

۸	فصل دوم: مفاهیم اولیه و تاریخچه ناوبری
۹	۱-۲- مقدمه.....
۹	۲-۲- اصطلاحات پایه.....
۹	۱-۲-۲- دستگاه‌های مختصات ناوبری.....
۱۳	۲-۲-۲- حرکت شناسی (سینماتیک).....
۱۶	۳-۲-۲- تاریخچه ژيروسکوپ.....
۱۷	۴-۲-۲- خواص ژيروسکوپی.....
۱۹	۵-۲-۲- ناوبری اینرسی.....
۲۱	۳-۲-۳- مروری بر ادبیات موضوع.....
۲۷	۴-۲- جمع‌بندی.....

فصل سوم: بررسی مشتقات فیلتر کالمن به منظور استفاده در سامانه‌ی ناوبری

۲۹	اینرسی
۳۰	۱-۳- مقدمه.....
۳۰	۲-۳- انواع فیلتر کالمن.....
۳۱	۱-۲-۳- فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF).....
۳۴	۲-۲-۳- فیلتر کالمن خنثی (UKF).....
۴۱	۳-۲-۳- فیلتر کالمن مکعبی (CKF).....
۴۳	۳-۳- جمع‌بندی.....

فصل چهارم: آشنایی با سیستم‌های ناوبری اینرسی و رادیویی و تلفیق آنها با هم

۴۶	۱-۴- مقدمه.....
۴۶	۲-۴- آشنایی با سیستم ناوبری اینرسی.....

۴۸	۲-۲-۴- معادلات ناوبری در دستگاه جغرافیایی
۵۴	۳-۴- جمع بندی مدل خطای سیستم ناوبری اینرسی
۵۵	۴-۴- آشنایی با سامانه موقعیت یاب جهانی (GPS)
۵۵	۴-۴-۱- اصول کارکرد موقعیت یاب ماهواره ای
۵۶	۴-۴-۲- تعیین فاصله ماهواره تا کاربر
۵۹	۴-۴-۳- محاسبه موقعیت کاربر
۶۳	۴-۴-۴- مدل سازی سامانه GPS با در نظر گرفتن عوامل خطا
۶۴	۵-۴- آشنایی با سامانه ی موقعیت یابی محلی لورن
۶۶	۵-۴-۱- اصول کارکرد سامانه لورن
۶۷	۵-۴-۲- اجزای سامانه لورن
۶۸	۵-۴-۳- سامانه های هذلولی و روش محاسبه اختلاف زمانی (TD)
۶۹	۵-۴-۴- مدل سازی سامانه لورن با در نظر گرفتن عوامل خطا
۷۱	۴-۶- تلفیق داده
۷۳	۴-۷- جمع بندی

فصل پنجم: نتایج شبیه سازی و تفسیر آنها

۷۴	
۷۵	۵-۱- مقدمه
۷۵	۵-۲- شبیه سازی مسیر فرضی و تولید داده های سنسورها
۷۶	۵-۲-۱- مراحل طراحی مسیر فرضی
۷۸	۵-۲-۲- چند مسیر فرضی نمونه
۸۰	۵-۳- اطلاعات مربوط به شبیه سازی
۸۱	۵-۴- نتایج پیاده سازی ناوبری تلفیقی توسط GPS
۸۲	۵-۴-۱- نتایج شبیه سازی در حالت سکون
۸۸	۵-۴-۲- نتایج شبیه سازی در مسیر مستقیم
۹۴	۵-۴-۳- نتایج شبیه سازی در مسیر دایره ای
۱۰۰	۵-۴-۴- نتایج شبیه سازی در مسیر مارپیچ
۱۰۷	۵-۵- نتایج شبیه سازی ناوبری تلفیقی با فرض قطع ناگهانی GPS
۱۱۱	۵-۶- نتایج شبیه سازی ناوبری تلفیقی توسط GPS با فرض ناهمراستایی اولیه سیستم
۱۱۵	۵-۷- نتایج پیاده سازی ناوبری تلفیقی توسط سامانه لورن D
۱۲۰	۵-۸- مدت زمان اجرای هر بار تکرار الگوریتم های پیشنهادی

فصل ششم: جمع بندی و پیشنهادها

۱۲۱

- ۱۲۲.....۱-۶- جمع بندی
- ۱۲۳.....۲-۶- مشکلات احتمالی اجرایی
- ۱۲۳.....۳-۶- نوآوری ها
- ۱۲۴.....۴-۶- پیشنهادها

۱۲۵

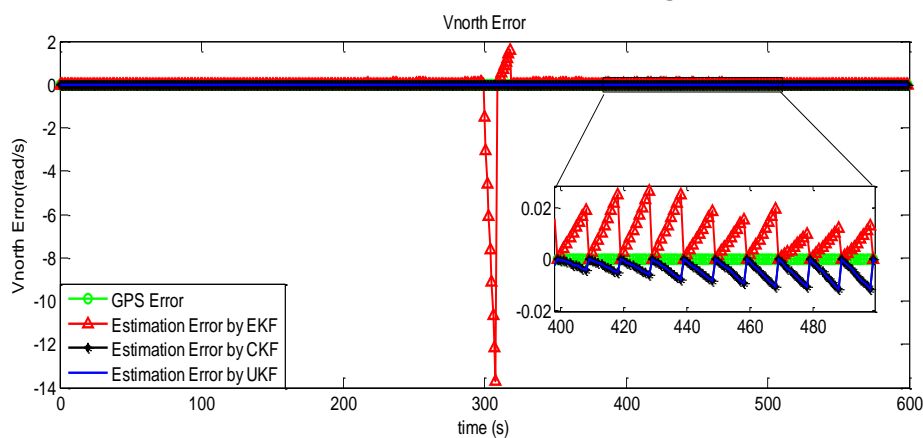
مراجع

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱ ساختار کلی یک سیستم ناوبری تلفیقی ۶
- شکل ۱-۲ دستگاه مرجع متصل به بدنه ۱۰
- شکل ۲-۲ دستگاه مرجع ناوبری محلی ۱۱
- شکل ۳-۲ دستگاه مختصات متصل به زمین ۱۲
- شکل ۴-۲ چارچوب های مرجع ۱۳
- شکل ۵-۲ دوران زوایای اویلر ۱۵
- شکل ۶-۲ حرکت تقدیمی ۱۸
- شکل ۷-۲ شماتیک سیستم ناوبری اینرسی از نوع صفحه پایدار ۲۰
- شکل ۸-۲ شماتیک (شکل سمت راست) و نحوه عملکرد (شکل سمت چپ) سیستم ناوبری
اینرسی از نوع متصل به بدنه ۲۱
- شکل ۱-۳ نمایی از الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته ۳۳
- شکل ۲-۳ مقایسه ای بین نحوه ی توزیع چگالی و محاسبه میانگین و کوواریانس در فیلترهای
توسعه یافته و خنثی ۳۴
- شکل ۳-۳ نمایی از الگوریتم پیاده سازی فیلتر کالمن خنثی ۴۰
- شکل ۱-۴ ساختار الگوریتم سیستم ناوبری اینرسی متصل به بدنه ۴۷
- شکل ۲-۴ مکانیزم سیستم ناوبری اینرسی متصل به بدنه در چارچوب جغرافیایی ۴۸
- شکل ۳-۴ بردار فاصله کابر تا ماهواره - مرجع ۵۶
- شکل ۴-۴ روش اندازه گیری زمان انتشار از ماهواره تا آنتن گیرنده - مرجع ۵۷
- شکل ۵-۴ ارتباط زمان بندی های مختلف در تعیین زمان معادل شبه فاصله ۵۸
- شکل ۶-۴ نمایی از ساده ترین زنجیره لورن - مرجع [۶] ۶۶
- شکل ۷-۴ الگوریتم تلفیق سیستم ناوبری اینرسی با یک سیستم کمک ناوبری ۷۳
- شکل ۱-۵ موقعیت دو بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS (شکل راست)، موقعیت
سه بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS (شکل چپ) ۸۲
- شکل ۲-۵ موقعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS ۸۳
- شکل ۳-۵ سرعت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS ۸۳
- شکل ۴-۵ وضعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS ۸۳
- شکل ۵-۵ خطای تخمین عرض جغرافیایی ۸۴

شکل ۵-۶	خطای تخمین طول جغرافیایی	۸۴
شکل ۵-۷	خطای تخمین ارتفاع جغرافیایی	۸۵
شکل ۵-۸	موقعیت دو بعدی واقعی و اصلاحی (شکل راست)، موقعیت سه بعدی واقعی و اصلاحی (شکل چپ)	۸۵
شکل ۵-۹	خطای تخمین سرعت در راستای شمال	۸۵
شکل ۵-۱۰	خطای تخمین سرعت در راستای شرق	۸۶
شکل ۵-۱۱	خطای تخمین سرعت در راستای عمود روبه پایین	۸۶
شکل ۵-۱۲	خطای تخمین زاویه رول	۸۷
شکل ۵-۱۳	خطای تخمین زاویه پیچ	۸۷
شکل ۵-۱۴	خطای تخمین زاویه یاو	۸۷
شکل ۵-۱۵	مسیر دو بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS (شکل راست)، مسیر سه بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS (شکل چپ)	۸۸
شکل ۵-۱۶	موقعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS	۸۹
شکل ۵-۱۷	سرعت وسیله متحرک در حالت واقعی و تخمین زده شده توسط INS و GPS	۸۹
شکل ۵-۱۸	وضعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و تخمین زده شده توسط INS و GPS	۹۰
شکل ۵-۱۹	مسیر دو بعدی واقعی و اصلاحی (شکل راست)، مسیر سه بعدی واقعی و اصلاحی (شکل چپ)	۹۰
شکل ۵-۲۰	خطای تخمین عرض جغرافیایی	۹۱
شکل ۵-۲۱	خطای تخمین طول جغرافیایی	۹۱
شکل ۵-۲۲	خطای تخمین ارتفاع جغرافیایی	۹۱
شکل ۵-۲۳	خطای تخمین سرعت در راستای شمال	۹۲
شکل ۵-۲۴	خطای تخمین سرعت در راستای شرق	۹۲
شکل ۵-۲۵	خطای تخمین سرعت عمود رو به پایین	۹۲
شکل ۵-۲۶	خطای تخمین زاویه رول	۹۳
شکل ۵-۲۷	خطای تخمین زاویه پیچ	۹۳
شکل ۵-۲۸	خطای تخمین زاویه یاو	۹۳
شکل ۵-۲۹	مسیر دو بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS (شکل راست)، مسیر سه بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS (شکل چپ)	۹۵

- شکل ۳۰-۵ موقعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS..... ۹۵
- شکل ۳۱-۵ سرعت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS..... ۹۶
- شکل ۳۲-۵ وضعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS..... ۹۶
- شکل ۳۳-۵ مسیر دو بعدی واقعی و اصلاحی (شکل راست)، مسیر سه بعدی واقعی و اصلاحی (شکل چپ)..... ۹۷
- شکل ۳۴-۵ خطای تخمین عرض جغرافیایی..... ۹۷
- شکل ۳۵-۵ خطای تخمین طول جغرافیایی..... ۹۷
- شکل ۳۶-۵ خطای تخمین ارتفاع جغرافیایی..... ۹۸



- ۹۸
- شکل ۳۷-۵ خطای تخمین سرعت در راستای شمال..... ۹۸
- شکل ۳۸-۵ خطای تخمین سرعت در راستای شرق..... ۹۸
- شکل ۳۹-۵ خطای تخمین سرعت در راستای عمود و به طرف پایین..... ۹۹
- شکل ۴۰-۵ خطای تخمین زاویه رول..... ۹۹
- شکل ۴۱-۵ خطای تخمین زاویه پیچ..... ۹۹
- شکل ۴۲-۵ خطای تخمین زاویه یاب..... ۱۰۰
- شکل ۴۳-۵ مسیر دو بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS (شکل راست)، مسیر سه بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS (شکل چپ)..... ۱۰۱
- شکل ۴۴-۵ موقعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS..... ۱۰۱
- شکل ۴۵-۵ سرعت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS..... ۱۰۲
- شکل ۴۶-۵ وضعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS..... ۱۰۲

شکل ۴۷-۵ مسیر دو بعدی واقعی و اصلاحی (شکل راست)، مسیر سه بعدی واقعی و اصلاحی

۱۰۳.....(شکل چپ).....

شکل ۴۸-۵ خطای تخمین عرض جغرافیایی.....

شکل ۴۹-۵ خطای تخمین طول جغرافیایی.....

شکل ۵۰-۵ خطای تخمین ارتفاع جغرافیایی.....

شکل ۵۱-۵ خطای تخمین سرعت در راستای شمال.....

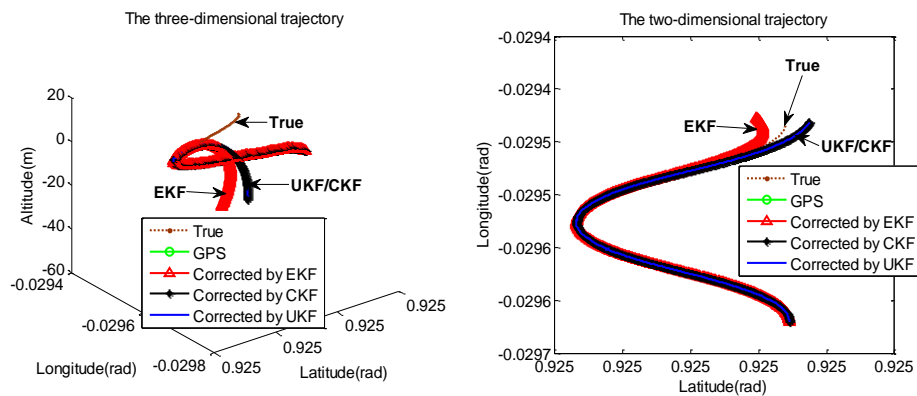
شکل ۵۲-۵ خطای تخمین سرعت در راستای شرق.....

شکل ۵۳-۵ خطای تخمین سرعت در راستای عمود و به طرف پایین.....

شکل ۵۴-۵ خطای تخمین زاویه رول.....

شکل ۵۵-۵ خطای تخمین زاویه پیچ.....

شکل ۵۶-۵ خطای تخمین زاویه یاو.....



۱۰۷.....

شکل ۵۷-۵ مسیر دو بعدی و سه بعدی واقعی و تخمینی با فرض موقعیت یاب جهانی.....

شکل ۵۸-۵ خطای عرض جغرافیایی با فرض موقعیت یاب جهانی.....

شکل ۵۹-۵ خطای طول جغرافیایی با فرض موقعیت یاب جهانی.....

شکل ۶۰-۵ خطای ارتفاع با فرض موقعیت یاب جهانی.....

شکل ۶۱-۵ خطای سرعت در راستای شمال جغرافیایی با فرض موقعیت یاب جهانی.....

شکل ۶۲-۵ خطای سرعت در راستای شرق با فرض موقعیت یاب جهانی.....

شکل ۶۳-۵ خطای سرعت در راستای پایین و عمود به طرف مرکز زمین با فرض موقعیت یاب

جهانی.....

شکل ۶۴-۵ خطای زاویه رول با فرض موقعیت یاب جهانی.....

شکل ۶۵-۵ خطای زاویه پیچ با فرض موقعیت یاب جهانی.....

- شکل ۵-۶۶ خطای زاویه یاو با فرض قطع موقعیت یاب جهانی..... ۱۱۰
- شکل ۵-۶۷ مسیر دو بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS با در نظر گرفتن ناهمراستایی اولیه (شکل راست)، مسیر سه بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS با در نظر گرفتن ناهمراستایی اولیه (شکل چپ)..... ۱۱۱
- شکل ۵-۶۸ موقعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS..... ۱۱۱
- شکل ۵-۶۹ موقعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS..... ۱۱۲
- شکل ۵-۷۰ موقعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و محاسبه شده توسط INS و GPS..... ۱۱۲
- شکل ۵-۷۱ خطای تخمین عرض جغرافیایی..... ۱۱۳
- شکل ۵-۷۲ خطای تخمین طول جغرافیایی..... ۱۱۳
- شکل ۵-۷۳ خطای تخمین ارتفاع جغرافیایی..... ۱۱۳
- شکل ۵-۷۴ خطای تخمین زاویه رول..... ۱۱۴
- شکل ۵-۷۵ خطای تخمین زاویه پیچ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۷۶ خطای تخمین زاویه یاو..... ۱۱۴
- شکل ۵-۷۷ مسیر دو بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و لورن D (شکل راست)، مسیر سه بعدی واقعی و محاسبه شده توسط INS و لورن D (شکل چپ)..... ۱۱۵
- شکل ۵-۷۸ موقعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و تخمین زده شده توسط INS و لورن D..... ۱۱۶
- شکل ۵-۷۹ سرعت وسیله متحرک در حالت واقعی و تخمین زده شده توسط INS و لورن D..... ۱۱۶
- شکل ۵-۸۰ وضعیت وسیله متحرک در حالت واقعی و تخمین زده شده توسط INS و لورن D..... ۱۱۶
- ۱۱۶
- شکل ۵-۸۱ مسیر دو بعدی و سه بعدی واقعی و اصلاحی وسیله متحرک..... ۱۱۷
- شکل ۵-۸۲ خطای تخمین عرض جغرافیایی..... ۱۱۷
- شکل ۵-۸۳ خطای تخمین طول جغرافیایی..... ۱۱۸
- شکل ۵-۸۴ خطای تخمین ارتفاع جغرافیایی..... ۱۱۸
- شکل ۵-۸۵ خطای تخمین سرعت در راستای شمال..... ۱۱۸
- شکل ۵-۸۶ خطای تخمین سرعت در راستای شرق..... ۱۱۹
- شکل ۵-۸۷ خطای تخمین سرعت در راستای عمود و به طرف پایین..... ۱۱۹
- شکل ۵-۸۸ خطای تخمین زاویه رول..... ۱۱۹
- شکل ۵-۸۹ خطای تخمین زاویه پیچ..... ۱۲۰

شکل ۵-۹۰ خطای تخمین زاویه یاو..... ۱۲۰

فهرست جدول ها

جدول ۵-۱ RMSE خطای محاسبه شده برای تمامی حالت های الگوریتم های فیلتر کالمن در حالت سکون.....	۸۸
جدول ۵-۲ RMSE خطای محاسبه شده برای تمامی حالت های الگوریتم های فیلتر کالمن در مسیر مستقیم.....	۹۴
جدول ۵-۳ RMSE خطای محاسبه شده برای تمامی حالت های الگوریتم های فیلتر کالمن در مسیر دایره ای.....	۱۰۰
جدول ۵-۴ RMSE خطای محاسبه شده برای تمامی حالت های الگوریتم های فیلتر کالمن در مسیر مارپیچ.....	۱۰۶
جدول ۵-۵ مدت زمان مورد نیاز برای اجرای هر بار الگوریتم های پیشنهادی.....	۱۲۰

فهرست نشانه‌های اختصاری

AB	بردار بایاس شتاب‌سنج‌ها
a	اندازه بردار شتاب جسم در راستای بدنه
a_x	بزرگی شتاب وارد بر جسم در راستای محور x
a_y	بزرگی شتاب وارد بر جسم در راستای محور y
a_z	بزرگی شتاب وارد بر جسم در راستای محور z
B_k	تصویر بردار خطای شتاب‌سنج‌ها در امتداد محورهای جغرافیایی
C	سرعت نور
C_N^E	ماتریس دوران از دستگاه جغرافیایی به دستگاه زمین
C_α^β	ماتریس تبدیل (دوران) از دستگاه α به دستگاه β (ماتریس کسینوسی مستقیم)
c_{ij}	مؤلفه i و j ماتریس کسینوس مستقیم
D	محور به سمت پایین و عمود بر زمین
D_f	بردار دریفت ثابت ژيروسکوپ‌ها
D_k	تصویر بردار خطای ژيروسکوپ‌ها در امتداد محورهای جغرافیایی
E	محور به سمت شرق
$F(.)$	معادله فرآیند
f	بردار نیروی مخصوص (شتاب غیرجاذبه‌ای در امتداد محورهای ورودی شتاب‌سنج‌ها)
f_D	مؤلفه عمودی رو به پایین نیروی مخصوص وارد بر جسم در دستگاه مختصات جغرافیایی
f_E	مؤلفه شرق نیروی مخصوص وارد بر جسم در دستگاه مختصات جغرافیایی
f_N	مؤلفه شمال نیروی مخصوص وارد بر جسم در دستگاه مختصات جغرافیایی
$G(r)$	بردار شتاب جاذبه‌ای در مکان r
\mathbf{g}^N	بردار گرانش زمین در دستگاه مختصات ناوبری
I	ماتریس همانی