بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

طراحی و تحلیل دقت یک سیستم ناوبری تلفیقی INS/GPS مبتنی بر فیلتر ذره‌ای

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – معماری اویونیک

علی حسنی پور

استاد راهنما
دکتر اصغر غلامی

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - معماری اویونیک آقای علی حسنی‌پور

تحت عنوان

طراحی و تحلیل دقت یک سیستم ناوبری تلفیقی INS/GPS مبتنی بر فیلتر ذره‌ای

در تاریخ ۹۳/۱۰/۱۴ توسط کمیته تخصصی ذیل مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر اصغر غلامی
۲- استاد داور	دکتر جواد عسگری مارنانی
۳- استاد داور	دکتر ایمان ایزدی نجف آبادی
سرپرست تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد علی خسروی‌فرد

سپاس خدای را که سخنوران در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او نتوانند و کوشندگان، گزاردن حق او نتوانند. و سلام و درود بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز. . .

از پدر و مادر عزیزم. . . این دو معلم بزرگوارم. . . که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور من بوده اند؛ بسیار سپاسگذارم. پروردگارا، نه میتوانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دستهای پینه بسته شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکرگزارشان باشم و ثانیه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

از زحمات استاد گرامی، جناب آقای دکتر غلامی که زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛

از جناب آقای شعبانی که وقت خود را در اختیار من قرار دادند و همچنین سرکار خانم داوری که پاسخگوی سوالات من بوده اند؛

از ریاست پژوهشکده اویونیک، جناب آقای دکتر وحید غفاری نیا و دانشجویان رشته اویونیک مخصوصاً آقایان محسن فاضلی نیا، ابوالفضل مظلوم و هادی کفیری کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از اساتید داور، جناب آقایان دکتر عسگری و دکتر ایزدی که داوری این رساله را متقبل شدند؛

از زحمات تمامی اساتید و کارکنان محترم دانشکده برق و کامپیوتر، تمامی اساتید و دوستانی که به من کمک کردند؛ تشکر می کنم.

خدایا اکنون نشانم ده که چگونه علم و دانشم را خردمندانه و عاشقانه به کار گیرم و راهی بیابم که در هر ذره ای که می نگرم جز جمال تو چیزی نبینم. خدایا موثرترین راه بندگیت را نشانم ده و چه عظمتی است دانستن اینکه تو عاشق بندگان خویش هستی. پس کمک کن که لایق و سزاوار عشق تو گردم. پروردگارا به من ایمان و جرأتی ده که آنچه را که حق می دانم به خاطر آنچه «بد می دانند» کتمان نکنم. پروردگارا از اینکه توانی دادی تا از پایگاه دانش خویش دفاع کنم بسیار خرسندم و خواهان آنم تا توانی دهی تا حضورت را در پاره های پیکرم حس کنم که چه آرامشی است دانستن اینکه همیشه در کنارم هستی؛ حتی نزدیک تر از رگ گردن. خداوندا به ما توفیق داشتن دین بی دنیا، ایمان بی ریا، تلاش در شکست، صبر در نومیدی، شجاعت گفتن حق، جهاد بی سلاح، کار بی پاداش، فداکاری در سکوت، عظمت بی نام، خدمت بی نان، مناعت بی غرور را عنایت فرما.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات
ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق
به دانشگاه صنعتی اصفهان می‌باشد

این تحفه ی بی نشانه تقدیم به تو ای شعر پر از ترانه، تقدیم به تو

باقی نبود گر به زمانه نفسی تنها دم این زمانه تقدیم به تو

در خوابکه حضور همراه ظهور یک جمعه پر فسانه تقدیم به تو

با تلخیص از شعر آقای حسام الدین خضری (غائب)

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم .

تقدیم به روح پاک دلیر مردانی که با نثار خون خود، این اقلیم را لاله باران کردند. مردانی که چون کوهی استوار در برابر خصم ایستادند و بدان رخصت ندادند تا به مرزهای اقلیم ایران و اسلام تجاوز کنند. سیرت آنان جمله چون چشمه بود و اراده ی آنان چون پولاد سخت. پندار آنان چون درخشندگی الماس بود و کردار آنان چون زلالی آب.

تقدیم به تمام شهدا و جانبازان هشت سال دفاع مقدس به ویژه سرداران شهید، غلامحسین افشردی، محمد بروجردی، محمد ابراهیم همت و شهید مسعود حسنی

زمان بادی است که می وزد. هم هست هم نیست. آنان را که ریشه در خاک استوار دارند؛ از طوفان هراسی نیست. پندار ما این است که مانده ایم و شهدا رفته اند؛ اما حقیقت آن است که زمان ما را با خود برده است و شهدا مانده اند.

سید شهیدان اهل قلم سید مرتضی آوینی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

فهرست شکل‌ها ..... یازده

چکیده ۱

۱- فصل اول مقدمه‌ای بر ناوبری ۲

۱-۱- تعریف ناوبری ۲

۱-۲- روش‌های مختلف ناوبری ۲

۱-۲-۱- Pilotage ۳

۱-۲-۲- ناوبری نجومی ۳

۱-۲-۳- Dead Reckoning ۳

۱-۲-۴- ناوبری رادیویی ۳

۱-۲-۵- ناوبری اینرسی ۳

۱-۳- سیستم ناوبری اینرسی ۳

۱-۴- انواع سیستم‌های ناوبری اینرسی ۵

۱-۵- مروری بر کارهای انجام شده ۷

۱-۶- کارهای انجام شده روی فیلتر ذره‌ای ۹

۱-۷- هدف پایان نامه و ساختار آن ۱۰

۲- فصل دوم دستگاه‌های مختصات و معادلات سیستم ناوبری اینرسی ۱۱

۲-۱- دستگاه‌های مختصات مرجع ۱۱

۲-۱-۱- دستگاه مختصات اینرسی ۱۲

۲-۱-۲- دستگاه مختصات زمین ۱۲

۲-۱-۳- دستگاه مختصات ناوبری ۱۴

۲-۱-۴- دستگاه مختصات بدنه ۱۴

۲-۲- هندسه زمین ۱۵

۲-۳- تبدیل مختصات‌ها ۱۶

۲-۳-۱- تبدیل از مختصات بدنه به ناوبری با ماتریس کسینوس جهت ۱۶

۲-۳-۲- تبدیل دستگاه مختصات جغرافیایی به دستگاه مختصات ECEF ۱۹

۲-۴- الگوریتم و معادلات سیستم ناوبری اینرسی ۱۹

۳- فصل سوم روش های تلفیق سیستم ناوبری اینرسی و تخمین حالت ۲۳

۳-۱- روش‌های تلفیق سیستم ناوبری ۲۳

۳-۱-۱- تلفیق بر اساس نوع فیلترینگ و فضای حالت ۲۴

۳-۱-۲- تلفیق بر اساس مکانیزم و پیاده‌سازی ۲۵

۳-۱-۳- تلفیق INS/GPS در سطح نرم افزاری ۲۶
۳-۲- تخمین حالت ۲۹
۳-۳- فیلترهای بیزی ۳۱
۳-۳-۱- فیلتر کالمن ۳۳
٤- فصل چهارم فیلترهای ذره‌ای ۳۵
۴-۱- مقدمه ۳۵
۴-۲- تولید عدد تصادفی ۳۶
۴-۲-۱- نمونه‌برداری کامل ۳۷
۴-۲-۲- نمونه‌برداری اهمیت دار ۳۸
۴-۲-۳- روش نمونه‌برداری SIR ۴۰
۴-۳- فیلتر ذره‌ای Bootstrap ۴۱
۴-۴- فیلتر ذره‌ای تعمیم یافته ۴۴
۴-۵- نمونه‌برداری مجدد ۴۶
۴-۵-۱- روش نمونه‌برداری مجدد قاعده‌مند ۴۷
۴-۵-۲- روش SIR و SIS ۴۸
۴-۶- انتخاب تابع چگالی پیشنهادی ۴۹
۴-۷- انواع دیگر فیلترهای ذره‌ای ۵۱
۴-۷-۱- فیلتر ذره‌ای توسعه یافته(EPF) و فیلتر ذره‌ای UPF ۵۱
۴-۷-۲- فیلتر ذره‌ای Rao-Blackwellized (RBPF) ۵۲
۴-۷-۳- فیلتر ذره‌ای تابع احتمال اندازه‌گیری (LPF) ۵۲
۴-۷-۴- فیلتر ذره‌ای مرتب شده (RPF) ۵۲
۴-۷-۵- فیلتر ذره‌ای گاوسی (GPF) و فیلتر ذره‌ای گاوسی تجمعی (GSPF) ۵۳
۴-۷-۶- فیلتر ذره‌ای توسعه‌یافته ترکیبی (HEPF) ۵۳
٥- فصل پنجم پیاده‌سازی فیلتر کالمن و ذره‌ای و نتایج آن‌ها ٥٤
۵-۱- پیاده سازی سیستم ناوبری اینرسی (INS) ۵۴
۵-۲- پیاده‌سازی سیستم ناوبری تلفیقی INS/GPS توسط فیلترهای کالمن ۵۶
۵-۲-۱- فیلتر کالمن توسعه یافته حالت خطا ۵۷
۵-۲-۲- فیلتر کالمن توسعه‌یافته حالت کامل ۵۹
۵-۳- پیاده‌سازی سیستم ناوبری تلفیقی INS/GPS توسط فیلترهای ذره‌ای ۶۱
۵-۳-۱- فیلتر ذره‌ای SIR و SIS ۶۱
۵-۳-۲- فیلتر ذره‌ای توسعه یافته (EPF) ۶۲
۵-۴- نتایج ۶۳
۵-۴-۱- خروجی سیستم ناوبری اینرسی بدون GPS ۶۴

۵-۴-۲- نتایج تخمین فیلترهای ذره‌ای SIS و SIR ۶۶
۵-۴-۳- نتایج تخمین فیلتر کالمن توسعه یافته حالت خطا (ESKF) و فیلتر ذره‌ای توسعه یافته حالت خطا (ESPF) ۷۶
۵-۴-۴- نتایج تخمین فیلتر کالمن توسعه یافته حالت کامل (TSKF) و فیلتر ذره‌ای توسعه یافته حالت کامل (TSPF) ۸۳
۵-۵- خلاصه نتایج ۹۰

٦- فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادها ۹۲
۶-۱- مروری بر پایان‌نامه ۹۲
۶-۲- نتیجه‌گیری ۹۳
۶-۳- پیشنهادها ۹۳

مراجع ۹٤

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ نحوه عملکرد کلی سیستم ناوبری اینرسی [۳]. ۴

شکل ۱-۲ رابطه‌ی بین ISA و IMU و INS [۳]. ۴

شکل ۱-۳ نحوه قرارگیری اجزای سیستم‌های صفحه پایدار (A) و متصل به بدنه (B) [۳]. ۵

شکل ۱-۴ الگوریتم سیستم ناوبری اینرسی صفحه پایدار[۴]. ۵

شکل ۱-۵ الگوریتم سیستم ناوبری اینرسی متصل به بدنه [۴]. ۶

شکل ۲-۱ دستگاه‌های مختصات ناوبری [۲۱]. ۱۲

شکل ۲-۲ مختصات محلی و مختصات جغرافیایی [۳]. ۱۳

شکل ۲-۳ محورهای دستگاه بدنه [۲۲]. ۱۴

شکل ۲-۴ مدل بیضی‌گون کره زمین[۳]. ۱۵

شکل ۲-۵ نمایش نقطه P در دو مختصات [۲]. ۱۷

شکل ۲-۶ زاویه بین بردارهای پایه $\boldsymbol{\phi 2}$ با $\boldsymbol{\phi 1}$ [۲]. ۱۸

شکل ۲-۷ بلوک دیاگرام سیستم ناوبری اینرسی [۲۱]. ۲۰

شکل ۲-۸ اثر شتاب کوریولیس روی مسیر متحرک ۲۰

شکل ۳-۱ فیلتر کالمن با فضای حالت کامل [۲۳]. ۲۴

شکل ۳-۲ فیلتر کالمن فیدفوروارد غیرمستقیم [۲۳]. ۲۵

شکل ۳-۳ فیلتر کالمن فیدبک دار غیرمستقیم [۲۳]. ۲۶

شکل ۳-۴ روش تلفیق LOOSELY COUPLED [۳]. ۲۷

شکل ۳-۵ روش تلفیق TIGHTLY COUPLED [۳]. ۲۷

شکل ۳-۶ روش تلفیق ULTRA-TIGHT [۳]. ۲۸

شکل ۴-۱ نمونه‌برداری کامل از تابع چگالی رابطه ۴-۸ [۲۵]. ۳۸

شکل ۴-۲ نمودار جمع تجمعی وزن ذرات بر حسب شماره ذره [۲۵]. ۴۸

شکل ۴-۳ تقریب تابع چگالی هدف با استفاده از $q1(x)$ و $q2(x)$ [۲۵]. ۵۰

شکل ۵-۱ خروجی مسیر سیستم ناوبری اینرسی نسبت به مسیر اصلی. ۶۴

شکل ۵-۲ خروجی مکان در جهت شمال در سیستم ناوبی اینرسی نسبت به مسیر اصلی. ۶۵

شکل ۵-۳ خروجی مکان در جهت شرق در سیستم ناوبی اینرسی نسبت به مسیر اصلی. ۶۵

شکل ۵-۴ خروجی مکان در جهت ارتفاع در سیستم ناوبی اینرسی نسبت به مسیر اصلی. ۶۶

شکل ۵-۵ مسیرهای تخمینی توسط فیلترهای ذره‌ای SIS و SIR نسبت به مسیر اصلی ۶۷

شکل ۵-۶ مکان تخمینی در جهت شمال توسط فیلترهای ذره‌ای SIS و SIR نسبت به مسیر اصلی ۶۷

شکل ۵-۷ مکان تخمینی در جهت شرق توسط فیلترهای ذره‌ای SIS و SIR نسبت به مسیر اصلی ۶۸

شکل ۵-۸ مکان تخمینی در جهت ارتفاع توسط فیلترهای ذره‌ای SIS و SIR نسبت به مسیر اصلی ۶۸
شکل ۵-۹ تعداد ذرات موثر در فیلتر SIR بر حسب گام‌های زمانی ۶۹
شکل ۵-۱۰ تعداد ذرات موثر در فیلتر SIS با آستانه 2N/3 بر حسب گام‌های زمانی ۶۹
شکل ۵-۱۱ انحطاط ذرات در SIR بدون نمونه‌برداری مجدد ۷۰
شکل ۵-۱۲ فقر ذرات در SIR ۷۰
شکل ۵-۱۳ مسیرهای تخمینی توسط فیلترهای ذره‌ای SIS و SIR در شرایط قطع GPS ۷۳
شکل ۵-۱۴ مکان تخمینی در جهت شمال توسط فیلترهای ذره‌ای. SIS و SIR در شرایط قطع GPS ۷۴
شکل ۵-۱۵ مکان تخمینی در جهت شرق توسط فیلترهای ذره‌ای. SIS و SIR در شرایط قطع GPS ۷۴
شکل ۵-۱۶ مکان تخمینی در جهت ارتفاع توسط فیلترهای ذره‌ای. SIS و SIR در شرایط قطع GPS ۷۵
شکل ۵-۱۷ تعداد ذرات موثر در فیلتر SIR بر حسب گام‌های زمانی در شرایط قطع GPS ۷۵
شکل ۵-۱۸ تعداد ذرات موثر در فیلتر SIS بر حسب گام‌های زمانی در شرایط قطع GPS ۷۶
شکل ۵-۱۹ مسیرهای تخمینی توسط ESKF و ESPF نسبت به مسیر اصلی ۷۷
شکل ۵-۲۰ مکان تخمینی در جهت شمال توسط ESKF و ESPF نسبت به مسیر اصلی ۷۷
شکل ۵-۲۱ مکان تخمینی در جهت شرق توسط ESKF و ESPF نسبت به مسیر اصلی ۷۸
شکل ۵-۲۲ مکان تخمینی در جهت ارتفاع توسط ESKF و ESPF نسبت به مسیر اصلی ۷۸
شکل ۵-۲۳ تعداد ذرات موثر در ESPF بر حسب گام‌های زمانی ۷۹
شکل ۵-۲۴ مسیرهای تخمینی توسط ESKF و ESPF در شرایط قطع GPS ۸۱
شکل ۵-۲۵ مکان تخمینی در جهت شمال توسط ESKF و ESPF در شرایط قطع GPS ۸۱
شکل ۵-۲۶ مکان تخمینی در جهت شرق توسط ESKF و ESPF در شرایط قطع GPS ۸۲
شکل ۵-۲۷ مکان تخمینی در جهت ارتفاع توسط ESKF و ESPF در شرایط قطع GPS ۸۲
شکل ۵-۲۸ تعداد ذرات موثر ESPF بر حسب گام‌های زمانی در شرایط قطع GPS ۸۳
شکل ۵-۲۹ مسیرهای تخمینی توسط. TSKF و TSPF نسبت به مسیر اصلی ۸۴
شکل ۵-۳۰ مکان تخمینی در جهت شمال توسط. TSKF و TSPF نسبت به مسیر اصلی ۸۴
شکل ۵-۳۱ مکان تخمینی در جهت شرق توسط TSKF و TSPF نسبت به مسیر اصلی ۸۵
شکل ۵-۳۲ مکان تخمینی در جهت ارتفاع توسط. TSKF و TSPF نسبت به مسیر اصلی ۸۵
شکل ۵-۳۳ تعداد ذرات موثر TSPF بر حسب گام‌های زمانی ۸۶
شکل ۵-۳۴ مسیرهای تخمینی توسط. TSKF و TSPF در شرایط قطع GPS ۸۸
شکل ۵-۳۵ مکان تخمینی در جهت شمال توسط TSKF و TSPF درشرایط قطع GPS ۸۹
شکل ۵-۳۶ مکان تخمینی در جهت شرق توسط TSKF و TSPF درشرایط قطع GPS ۸۹
شکل ۵-۳۷ مکان تخمینی در جهت ارتفاع توسط TSKF و TSPF درشرایط قطع GPS ۹۰
شکل ۵-۳۸ تعداد ذرات موثر TSPF بر حسب گام‌های زمانی در شرایط قطع GPS ۹۰

چکیده

سیستم ناوبری اینرسی (INS) با استفاده از مقادیر اولیه حالت‌های متحرک (مکان، سرعت و جهت) و اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای و شتاب‌ها، حالت‌های متحرک را تخمین می‌زند. سنسورهای اینرسی معمولاً دارای نویز در خروجی می‌باشند. در نتیجه، خطای خروجی INS سریعاً با گذشت زمان افزایش می‌یابد. برای افزایش دقت و محدود کردن خطا، INS را با سنسورهای کمکی دیگر مثل سیستم مکان‌یابی جهانی (GPS) ترکیب می‌کنند. یکی از انواع ترکیب INS و GPS سیستم ناوبری تلفیقی Loosely coupled INS/GPS نام دارد که در این تحقیق بررسی شده است. ترکیب اطلاعات دو سنسور، نیاز به الگوریتم تخمین و روش‌های ترکیب داده دارد. از جمله روش‌های ترکیب اطلاعات، فیلترهای ذره‌ای و فیلترهای کالمن می‌باشند.

هدف از این پایان‌نامه، طراحی و تحلیل دقت سیستم ناوبری تلفیقی Loosely coupled INS/GPS با استفاده از فیلتر ذره‌ای است؛ تا خطای تعیین موقعیت کاهش یابد. در این راستا، خروجی تعدادی از فیلترهای کالمن نیز برای مقایسه به دست آمده‌اند. در این تحقیق، نحوه پیاده‌سازی چندین فیلتر ذره‌ای و کالمن از جمله فیلتر ذره‌ای SIR و SIS ، فیلتر ذره‌ای توسعه‌یافته حالت خطا و حالت کامل (TSPF، ESPF) ، فیلتر کالمن توسعه‌یافته حالت خطا و حالت کامل (TSKF، ESKF) شرح داده شده و نتایج خروجی این فیلترها در شرایط و پارامترهای مختلف، ارائه و مقایسه شده‌اند.

کلیدواژه: سیستم ناوبری اینرسی، سیستم ناوبری تلفیقی Loosely coupled INS/GPS ، فیلتر ذره‌ای، فیلتر کالمن

فصل اول
مقدمه‌ای بر ناوبری

۱-۱- تعریف ناوبری

از گذشته تا کنون، علم ناوبری نقش مهمی را برای بشر ایفا کرده است؛ مخصوصاً برای آنان که به نقاط دور و یا ناشناخته سفر کرده‌اند. در تعریف کلی، ناوبری یعنی تعیین موقعیت فعلی یک شیئ که ممکن است روی زمین، در فضا، در هوا، زیر زمین، زیر دریا یا .... باشد. در متون تخصصی، ناوبری یکی از این دو معنی زیر را دارد:

۱- تعیین دقیق حالت و مکان متحرک (مکان، سرعت و جهت)

۲- برنامه‌ریزی و اجرای مانورهای ضروری برای حرکت بین مکان‌های دلخواه

برای تحقق تعریف دوم، تعریف اول ضروری است. بنابراین، معمولاً ناوبری در تعریف اول خلاصه می‌شود و به طور دقیق تر، ناوبری یعنی تخمین بلادرنگ[۱] حالت و مکان متحرک [۲] ,[۱].

۱-۲- روش‌های مختلف ناوبری

برای ناوبری یک متحرک روش‌های مختلفی وجود دارد. روش‌های ناوبری به لحاظ تاریخی اصولا به پنج دسته Pilotage ، ناوبری نجومی[۲]، Dead Reckoning، ناوبری رادیویی[۳] و ناوبری اینرسی تقسیم می‌شوند. در ادامه، به این روش‌ها اشاره می‌کنیم [۱].

---

۱ Real time estimation
۲ Celestial navigation
۳ Radio navigation

Pilotage -۱-۲-۱

این روش وابسته به تشخیص محیط است تا بدانیم کجا هستیم و جهت حرکت ما نسبت به مقصد چگونه است.

۱-۲-۲- ناوبری نجومی

این نوع ناوبری از زوایای بین زوایای قائم محلی و اجرام آسمانی (مثل سیاره‌ها، ستاره‌ها، خورشید و ماه) استفاده می‌کند تا جهت و مکان روی سطح زمین را تخمین بزنند.

Dead Reckoning -۱-۲-۳

در این روش با دانستن نقطه شروع حرکت و اطلاعات جهت، سرعت و زمان طی‌شده، مقدار مسافت مشخص می‌گردد. در این روش، با وصل‌کردن نقاط مکان روی یک نمودار، مسیر تعیین می‌گردد.

۱-۲-٤- ناوبری رادیویی

این نوع ناوبری به عواملی از قبیل منابع فرکانس رادیویی، تکنولوژی‌های گیرنده، دسترسی سیگنال در گیرنده و ساختار سیگنال در فرستنده وابسته است. تکنولوژی ناوبری رادیویی با استفاده از فرستنده‌های ثابت در طی یک قرن در حال تکامل بوده است. پس از آن با پرتاب اولین ماهواره توسط شوروی سابق در سال ۱۹۵۷، تکنولوژی‌های ناوبری رادیویی توسط ماهواره‌ها نیز گسترش یافت.

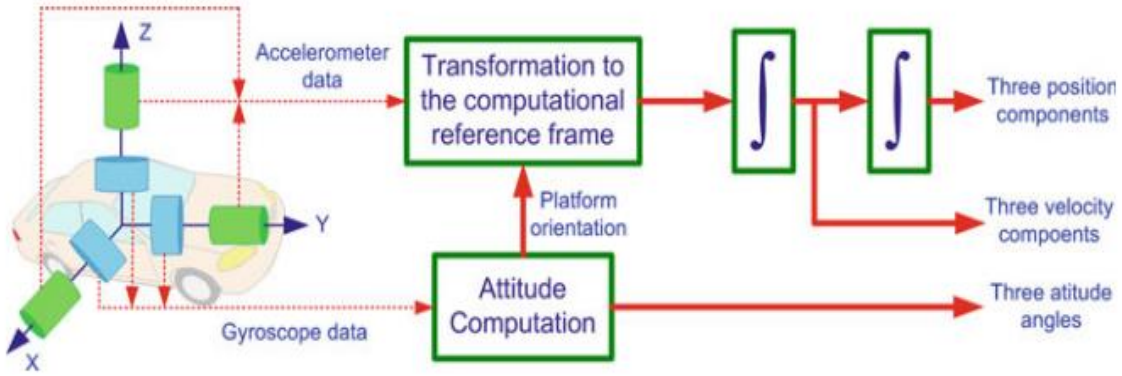
۱-۲-۵- ناوبری اینرسی

در این روش، با استفاده از مقادیر اولیه حالت‌های متحرک (مکان، جهت و سرعت) و مقادیر سرعت زاویه‌ای و شتاب‌ها، حالت‌های متحرک تخمین زده می‌شوند. این نوع ناوبری مستقل بوده و به منابع خارجی وابسته نیست و به راحتی تحت تاثیر تداخلات قرار نمی‌گیرد. به همین دلایل در کاربردهای نظامی برای ناوبری ایمن استفاده می‌شود.

۱-۳- سیستم ناوبری اینرسی

سیستم ناوبری اینرسی (INS[۱]) با استفاده از مقادیر اولیه حالت‌های متحرک (مکان، جهت و سرعت) و اطلاعات شتاب‌سنج‌ها و ژایروسکوپ‌ها ، حالت‌های متحرک را تخمین می‌زند. این سیستم برای به دست آوردن حالت‌ها از محاسباتی مانند تبدیل مختصات و انتگرال‌گیری استفاده می‌کند. در شکل ۱-۱ اصول کاری یک سیستم ناوبری اینرسی را مشاهده می‌کنید. مزایای این سیستم، تحت تاثیر نبودن تداخلات، نرخ بالای نمونه‌برداری سنسورها و خطای کم در کوتاه مدت می‌باشد. اما معایب آن گران‌قیمت بودن و افزایش خطای زیاد در دراز مدت است. این افزایش خطا به دلیل خطای سنسورها و انتگرال‌گیری از آن‌ها اتفاق می‌افتد [۳] ,[۱].

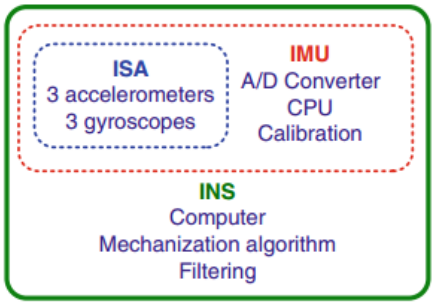
۱ Inertial Navigation System



شکل ۱-۱ نحوه عملکرد کلی سیستم ناوبری اینرسی [۳].

انتگرال‌گیری در این سیستم، جنبه‌های مثبت و منفی دارد. جنبه‌ی مثبت آن این است که خطاهای فرکانس بالا را کاهش می‌دهد. جنبه‌ی منفی آن نیز، ایجاد خطا در حالت‌های ناوبری به دلیل انتگرال‌گیری عددی است. علاوه بر این، خطای تخمین به دلیل جمع شدن خطاهای فرکانس پایین افزایش می‌یابد. خطاهای فرکانس پایین به خاطر بایاس‌ها، خطای ضریب مقیاس[۱]، نویز و ... می‌باشند [۲].

سیستم ناوبری اینرسی شامل IMU[۲] ، یک یا چند کامپیوتر ناوبری، واسط‌های کاربری (نمایشگرها و ...) و منابع تغذیه است. IMU دارای مجموعه‌ای از سنسورهای اینرسی (ISA)[۳] و مدارهای الکترونیکی کنترل و کالیبراسیون سنسورهای اینرسی می‌باشد. سنسورهای اینرسی معمولاً شامل سه ژایروسکوپ و سه شتاب‌سنج می‌باشند که به ترتیب سرعت زاویه‌ای و شتاب را در سه جهت از مختصات بدنه اندازه می‌گیرند. کامپیوترهای ناوبری وظیفه پردازش خروجی‌های سنسورهای اینرسی را برعهده دارند. در شکل ۱-۲ رابطه‌ی بین ISA، IMU و INS نشان داده شده است [۳], [۱].

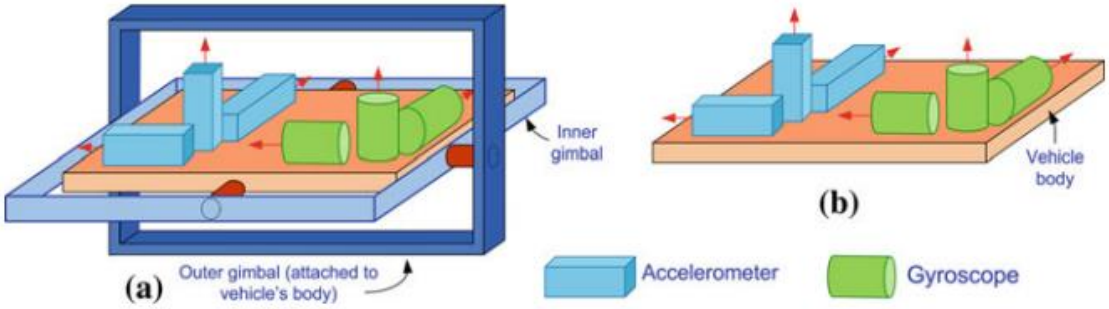


شکل ۱-۲ رابطه‌ی بین ISA و IMU و INS [۳].

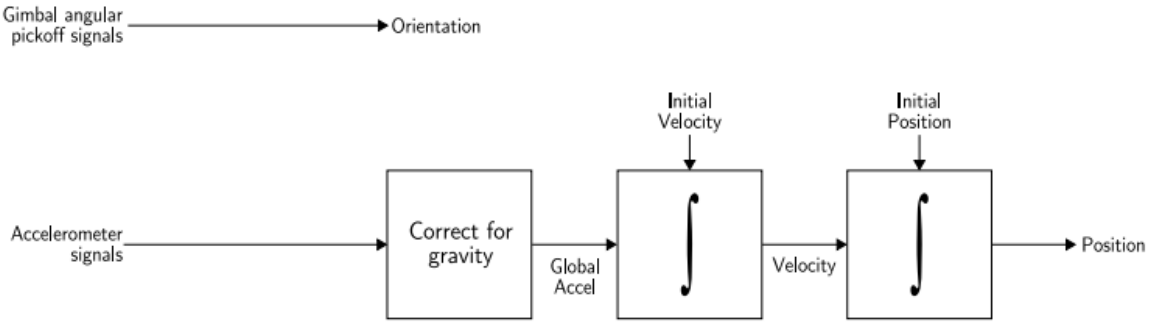
۱ Scale Factor
۲ Inertial Measurement Unit
۳ Inertial sensor assembly

۱-٤- انواع سیستم‌های ناوبری اینرسی

سیستم‌های ناوبری اینرسی به دو دسته‌ی سیستم‌های صفحه پایدار[۱] یا سیستم‌های جیمبال‌دار[۲] و سیستم‌های متصل به بدنه (SINS)[۳] تقسیم می‌شوند. نحوه چینش اجزای این سیستم‌ها در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. سیستم‌های صفحه پایدار نسبت به چرخش بدنه متحرک، ایزوله می‌باشند اما در سیستم‌های متصل به بدنه، سنسورها از بدنه، ایزوله نیستند و مستقیماً به بدنه متصل شده‌اند. در سیستم‌های صفحه پایدار، سنسورهای اینرسی روی مجموعه‌ای از جیمبال‌ها (قاب‌های متحرک کنترل شونده) نصب شده‌اند؛ به طوری که صفحه سنسورها همیشه با مختصات ناوبری همراستا است. این عمل توسط مجموعه‌ای از موتورها انجام می‌شود. این موتورها، صفحه سنسورها را متناسب با مقدار اندازه‌گیری ژایروسکوپ‌ها در جهت عکس چرخش متحرک می‌چرخانند. سپس از خروجی شتاب‌سنج‌ها مستقیماً انتگرال‌گیری می‌شود تا سرعت و مکان در مختصات ناوبری محاسبه شوند. در شکل ۱-۴ الگوریتم سیستم ناوبری اینرسی صفحه پایدار را مشاهده می‌کنید [۴], [۳].



شکل ۱-۳ نحوه قرارگیری اجزای سیستم‌های صفحه پایدار (a) و متصل به بدنه (b) [۳].

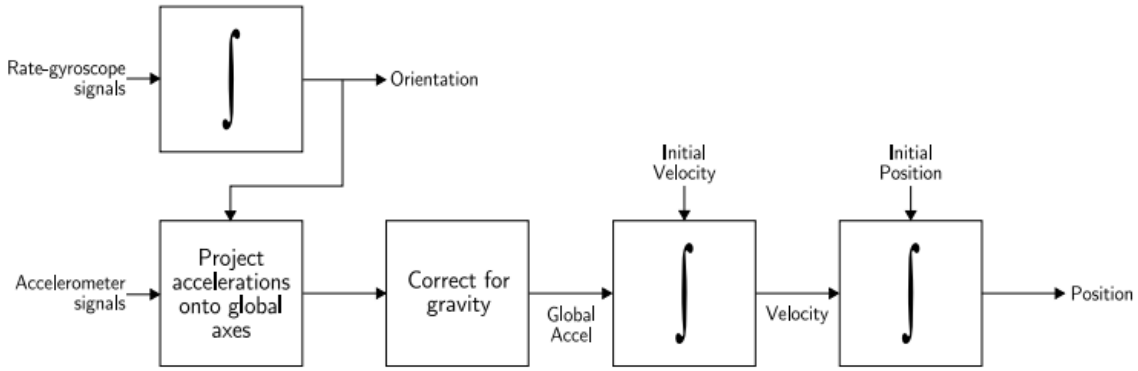


شکل ۱-۴ الگوریتم سیستم ناوبری اینرسی صفحه پایدار[۴].

---

۱ Stable platform system
۲ Gimbaled system
۳ Strapdown Inertial Navigation System

از آنجا که سیستم‌های صفحه پایدار از لحاظ مکانیکی پیچیده‌اند و گران‌قیمت هستند؛ از آن‌ها کمتر استفاده می‌شود. پیشرفت‌های الکترونیکی باعث استفاده بیشتر از سیستم‌های متصل به بدنه شده است. دراین سیستم‌ها، سنسورهای اینرسی روی بدنه‌ی صفحه متحرک متصل شده و جیمبال‌ها با یک کامپیوتر جایگزین شده‌اند. این کامپیوتر چرخش صفحه را با تبدیل مختصات به دست می‌آورد. سرعت‌های زاویه‌ای توسط ژایروسکوپ‌ها محاسبه شده و برای تبدیل مختصات بدنه به ناوبری مرتباً استفاده می‌شوند. سپس اندازه‌گیری‌های شتاب‌سنج‌ها با استفاده از این تبدیل مختصات، به شتاب در مختصات ناوبری تبدیل می‌شوند. در شکل ۱-۵ الگوریتم سیستم ناوبری اینرسی متصل به بدنه را مشاهده می‌کنید. امروزه، بیشتر از سیستم‌های متصل به بدنه استفاده می‌شود چون نسبت به سیستم‌های صفحه پایدار هزینه کمتر، وزن کمتر، توان مصرفی کمتر، دقت و قابلیت اطمینان بالاتری دارند. همچنین، با جایگزینی ژایروسکوپ‌های نوری به جای ژایروسکوپ‌های مکانیکی و پیشرفت سریع پردازنده‌های سرعت بالا، استفاده از سیستم‌های متصل به بدنه افزایش یافته است. جدول ۱-۱ مقایسه‌ای بین مشخصات اصلی این دو سیستم ارائه می‌دهد [۴] ,[۳]. در این پایان‌نامه نیز سیستم‌های متصل به بدنه بررسی خواهند شد.



شکل ۱-۵ الگوریتم سیستم ناوبری اینرسی متصل به بدنه [۴].

جدول ۱-۱ مقایسه بین سیستم‌های متصل به بدنه و سیستم‌های صفحه پایدار [۳].

مشخصات	سیستم‌های متصل به بدنه	سیستم‌های صفحه پایدار
اندازه	نسبتا کوچک	بزرگ
وزن	نسبتا سبک‌تر	سنگین
مقاوم بودن	قابلیت اطمینان بالا، ایمن از شوک و لرزش	قابلیت اطمینان بالا، ایمنی کمتر نسبت به شوک و لرزش

۱-۵- مروری بر کارهای انجام شده

قبل از ظهور تکنولوژی MEMS[۱] ، استفاده از INS منحصر به صنایع هوایی و نظامی بود. چون هزینه ساخت آن بسیار بالا بود. با توسعه INS های ارزان توسط تکنولوژی MEMS ، این سیستم در موارد غیرنظامی نیز به کار رفت [۵]. سنسورهای اینرسی معمولاً دارای نویز زیاد، عدم اطمینان بالا در خروجی، بایاس، خطای ضریب مقیاس و .... می‌باشند. در نتیجه، خطای خروجی INS با گذشت زمان سریعاً افزایش می‌یابد. بیشتر اشکالات این حوزه در خطای سنسورها است. کالیبراسیون این سیستم دقت را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. ولی با این وجود، باز خطای خروجی با زمان افزایش می‌یابد. بنابراین برای افزایش دقت بیشتر، INS را با سنسورهای کمکی دیگر مثل GPS[۲] ترکیب می‌کنند که به آن، سیستم ناوبری تلفیقی INS/GPS می‌گویند. در واقع برای رفع مشکل و محدود کردن خطای خروجی INS از سنسورهای اندازه‌گیری کمکی مثل GPS استفاده می‌شود.

تلفیق اطلاعات دو سنسور نیاز به الگوریتم تخمین دارد. انتخاب یک روش تخمین مناسب یک مسئله کلیدی برای تلفیق اطلاعات INS با سنسوری دیگر می‌باشد. در حال حاضر سه روش تخمین وجود دارد که عبارتند از:

۱- فیلتر کالمن خطی شده (LKF[۳]) یا فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF[۴])

۲- روش فیلترینگ با استفاده از نمونه‌برداری مثل UKF[۵] و فیلتر ذره‌ای (PF[۶])

۳- تخمین توسط هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی مصنوعی و سیستم اطلاعات عصبی فازی وفقی [۶]

فیلترهای کالمن دارای محدودیت‌های کارایی می‌باشند. این محدودیت‌ها به دلیل مدل دینامیک ایده‌آل، خطی‌سازی مدل‌های غیرخطی و مدل کردن نویز با نویز گاوسی می‌باشند. اما اطلاعات واقعی بسیار پیچیده اند و دارای عناصر غیرگوسی، بعد زیاد و عناصر غیرخطی می‌باشد [۸] ,[۷]. فیلتر کالمن نیاز به یک مدل دقیق تصادفی از خطاهای سنسورهای اینرسی دارد که در مورد IMU های ارزان قیمت، این مدل کردن بسیار دشوار است. علاوه بر این، این فیلتر فقط از مدل‌های خطی با مرتبه پایین مانند قدم زدن تصادفی[۷] ، مدل‌های گاوس مارکف[۸] ، مدل‌های خودبازگشتی مرتبه دوم[۹] برای این سنسورها استفاده می‌کند. یکی از نقطه ضعف‌های اصلی فیلتر کالمن در استفاده از سنسورهای اینرسی ارزان قیمت MEMS ، وابستگی آن به این مدل‌ها است. اگر اطلاعات ورودی مطابق با مدل

---

۱ Microelectromechanical system
۲ Global Positioning System
۳ Linearized Kalman Filter
۴ Extended Kalman Filter
۵ Unscented Kalman Filter
۶ Particle Filter
۷ Random Walk
۸ Gauss-Markov models
۹ Auto-Regressive models

نباشد؛ تخمین فیلتر کالمن قابل اطمینان نیست. بنابراین تنظیم پارامترهای تصادفی مدل برای سنسورهای اینرسی ارزان قیمت، بسیار ضروری است. مشکل دیگر فیلتر کالمن در استفاده از سنسورهای اینرسی ارزان، واگرایی فیلتر در نبود طولانی مدت GPS است. در نبود GPS فیلتر در بخش پیش‌بینی کار می‌کند که در این قسمت، خطاهای پیش‌بینی‌های قبلی با هم جمع شده و خطای زیادی را تولید می‌کند [۹]. در EKF سری‌های تیلور برای تقریب سیستم غیرخطی با سیستم مرتبه اول به کار می‌روند. متاسفانه ماتریس‌های ژاکوبین[۱] پیچیده‌اند و ممکن است باعث ناپایداری سیستم شوند و این فیلتر توانایی مدل کردن تمامی ویژگی‌های آماری یک فرآیند را ندارد [۱۰].

شبکه‌های عصبی مصنوعی یا ANN[۲] تخمین‌گرهای بسیار قدرتمندی می‌باشند که توانایی تخمین الگوهای غیرخطی را دارند. بنابراین، این روش‌ها می‌توانند الگوهای پیچیده‌ای مانند اطلاعات GPS و INS را ترکیب کنند. همچنین، این روش‌ها توانایی نگاشت ورودی به خروجی را دارند و برای نگاشت اطلاعات INS به خطاهای INS بسیار مناسب می‌باشند. شبکه‌های عصبی مصنوعی مزیت‌های زیادی نسبت به فیلتر کالمن دارند چون نیاز به اطلاعات اولیه ندارند. این روش بدون مدل سازی انجام می‌گیرد و به کالیبره کردن یا تعیین مدل‌های تصادفی مانند فیلتر کالمن نیازی ندارد. شبکه عصبی مصنوعی یک روش مفید برای مدل‌های غیرخطی است که رابطه بین ورودی خروجی را بدون مدل دینامیک تعیین می‌کند. این روش با پردازش موازی، مسائل پیچیده غیرخطی تصادفی را مدل می‌کند. علاوه بر این، بر خلاف فیلتر کالمن، شبکه عصبی مصنوعی توانایی تطبیق و یادگیری روابط جدید بین ورودی خروجی را دارد. [۱۱].

اما با این وجود، معماری‌های شبکه عصبی نیز ضعف‌هایی دارد. این روش کارایی بهتری نسبت به فیلتر کالمن در مدل کردن روابط غیرخطی دارند. اما دقت این مدل‌ها در INS های ارزان از بین می‌رود. کاهش دقت شبکه عصبی به دلیل افزایش پیچیدگی روابط غیرخطی می‌باشد که باعث از دست رفتن توانایی تعمیم شبکه می‌شود [۸]. مشکل دیگر در شبکه‌های عصبی مصنوعی ، عدم استفاده از اطلاعات آماری در ورودی است که منجر به عدم وجود اطلاعات آماری در خروجی می‌گردد. اطلاعات آماری خروجی در بعضی کاربردها مانند نقشه‌برداری، بسیار پراهمیت است [۶]. در این تکنیک، اگر قطع GPS به مدت زیادی در مسیر اتفاق بیفتد؛ خطای INS زیاد می‌شود. بنابراین، شبکه عصبی قادر به تخمین دقیق مکان نخواهد بود. مقالات نشان داده‌اند که شبکه عصبی در مواجهه با سنسورهای MEMS کارایی مناسبی ندارد [۱۲] ,[۱۱].

روش دیگری که مشکلات فیلتر کالمن را ندارد؛ روش فیلترینگ با استفاده از نمونه‌برداری است. این روش در PF و UKF استفاده می‌شود. این روش از تقریب عددی برای تصحیح مسئله غیرخطی استفاده می‌کند. در این روش، تابع چگالی احتمال پسین[۳] توسط مجموعه‌ای از نمونه‌ها تخمین زده می‌شود.

---

۱ Jacobian matrices
۲ Artificial Neural Network
۳ Posterior probability density function

UKF از نمونه‌های مشخص انتخابی استفاده می‌کند که نقاط سیگما نامیده می‌شوند. UKF با استفاده از نقاط سیگما، یک توزیع گاوسی را تخمین می‌زند تا مقدار میانگین و کواریانس حالت‌ها را به دست آورد. این فیلتر، می‌تواند عوامل غیرخطی را تا مرتبه دوم مدل کند. بنابراین اگر مدل ما خیلی غیرخطی باشد؛ UKF تخمین مناسبی ندارد [۶].

فیلتر ذره‌ای یا PF انعطاف‌پذیر و دارای قابلیت پردازش موازی[۱] می‌باشد [۷]. PF جایگزین مناسبی برای EKF در کاربردهای بلادرنگ می‌باشد. هر چه مدل ما غیرخطی‌تر و نویز غیرگاوسی باشد؛ کاربرد PF بهتر است. مخصوصاً در مواردی که توان محاسباتی کم و نرخ نمونه برداری نیز خیلی بزرگ نباشد [۱۳]. PF تابع چگالی احتمال را به صورت مجموعه‌ای از نمونه‌های تصادفی (ذره‌ها) تقریب می‌زند. PF بار محاسباتی بسیار زیادی دارد و یکی از دلایل استفاده از آن در سال های اخیر، ظهور چیپ‌ها و کامپیورهای سریع می‌باشد. همچنین با استفاده از پردازش موازی می‌توان زمان محاسبات فیلترهای ذره‌ای را کاهش داد [۱۴].

۱-۶- کارهای انجام شده روی فیلتر ذره‌ای

Arulampalam و همکارانش در [۱۵] نشان دادند که اگر فرض‌های فیلتر کالمن درباره فرآیند تصادفی اطلاعات سنسورها صدق کند هیچ فیلتری بهتر از آن عمل نخواهد کرد. اما در عمل همیشه این فرض‌ها درست نیست. همچنین آنها PF های مختلفی را بررسی کرده و نشان داده‌اند که در هر کاربرد خاصی، یکی از انواع PF بهتر عمل می‌کند.

Georgy و همکارانش در [۱۶] نشان دادن که در تلفیق INS با GPS ، فیلتر ذره‌ای به دلیل مدل سازی مناسب‌تر، بهتر از فیلتر کالمن عمل می‌کند.

Aggarwal و سایرین در [۱۷] نوع جدیدی از فیلتر ذره‌ای با نام HEPF [۲] را ارائه کردند که یک فیلتر ترکیبی از EKF وEPF[۳] می‌باشد. HEPF با توجه به دینامیک متحرک ترکیبی از این دو فیلتر را استفاده می‌کند. در نهایت نیز نشان داده شده که این فیلتر ترکیبی سریع‌تر از هر دو فیلتر به طور جداگانه عمل می‌کند.

Zhou و همکاران در [۱۸] فیلتر ذره‌ای AUPF[۴] را برای تلفیق Tightly coupled INS/GPS پیشنهاد داده‌اند و نتایج آن را با فیلترهای کالمنAUKF[۶] ,AEKF[۵] مقایسه کرده‌اند. آن‌ها نشان داده اند که نتایج AUPF بهتر از بقیه فیلترها است.

---

۱ Parallel processing
۲ Hybrid Extended Particle Filter
۳ Extended Particle Filter
۴ Adaptive Unscented Particle Filter
۵ Adaptive Extended Kalman Filter
۶ Adaptive Unscented Kalman Filter