دانشگاه شهید چمران

دانشکده مهندسی

طراحی و ساخت سامانه‌ی ناوبری اینرسی

استاد/اساتید راهنما:

دکتر هومان کعبی

استاد/اساتید مشاور:

دکتر غلامرضا اکبری زاده

نگارنده :

محمد علی‌نژاد

بهمن ماه ۱۳۹۳

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

۹۳۴۲۱۰۲

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق

گرایش الکترونیک

عنوان :

طراحی و ساخت سامانه‌ی ناوبری اینرسی

استاد/اساتید راهنما:

دکتر هومان کعبی

استاد/اساتید مشاور:

دکتر غلامرضا اکبری زاده

نگارنده :

محمد علی‌نژاد

بهمن ماه ۱۳۹۳

باسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

(نتیجه ارزشیابی پایان‌نامه ارشد)

پایان‌نامه آقای محمد علی‌نژاد **دانشجوی رشته**: مهندسی برق **گرایش:** الکترونیک

دانشکده مهندسی **به شماره دانشجویی** ۹۰۴۲۱۰۳

با عنوان :

طراحی و ساخت سامانه‌ی ناوبری اینرسی

جهت اخذ مدرک : کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک **در تاریخ :** ۹۳/۱۱/۸ **توسط هیأت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه** عالی **تصویب گردید.**

		رتبه علمی	امضاء
۱.	**اعضا ی هیأت داوران :**		
	استاد راهنما: دکتر هومان کعبی	استادیار	.....
	استاد مشاور : دکتر غلامرضا اکبری زاده	استادیار	.....
	استاد داور : دکتر محمد سروش	استادیار	.....
	استاد داور : دکتر احسان نامجو	استادیار	.....
	نماینده تحصیلات تکمیلی : دکتر محدرضا صفاریان	استادیار	.....
۲.	**مدیرگروه :** دکتر ابراهیم فرشیدی	دانشیار	.....
۳.	**معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده :** دکتر علی حقیقی	دانشیار	.....
۴.	**مدیرتحصیلات تکمیلی دانشگاه :** دکتر عبدالرحمن راسخ	استاد تمام	.....

از جناب آقای دکتر کعبی که به‌عنوان استاد راهنما، راهنمایی‌های بی‌دریغی نمودند، صمیمانه سپاس‌گزاری و قدردانی می‌نمایم.

فهرست مطالب

قدردانی..... ا
فهرست مطالب.....ب
فهرست شکل‌ها و نمودارها.....ح
فهرست جداول.....د
فهرست پیوست‌ها.....ذ
چکیده ..... ر

فصل اول

مقدمه و انگیزه کار.....۱
۱-۱ مقدمه.....۱
۱-۲ تاریخچه.....۱
۱-۳ انگیزه کار.....۲
۱-٤ طبقه‌بندی روش‌های موقعیت‌یابی.....۳
۱-٤-۱ روش اندازه‌گیری نسبی(نقطه فرضی) ۳
۱-٤-۱-۱ مسافت‌سنجی.....٤
۱-٤-۱-۲ ناوبری اینرسی ٤
۱-٤-۲ روش اندازه‌گیری مطلق (سامانه مبتنی بر مرجع) ٤
۱-٤-۲-۱ قطب نمای الکترونیکی ۵
۱-٤-۲-۲ برج‌های فعال ۵
۱-٤-۲-۳ سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی.....۵
۱-٤-۲-٤ ناوبری نشانه یابی.....٦
۱-٤-۲-۵ موقعیت‌یابی مبتنی بر نقشه.....٦
۱-۵ ساختار پایان‌نامه ٦

فصل دوم

سامانه‌ی ناوبری اینرسی.....۷
۲-۱ مقدمه.....۷

۲-۲ اصول سامانه‌ی ناوبری اینرسی..... ۹
۲-۳ حسگرهای اینرسی..... ۱۰
۲-۳-۱ شتاب‌سنج ۱۰
۲-۳-۲ چرخش‌سنج ۱۲
۲-٤ ساختار سامانه‌ی ناوبری اینرسی..... ۱۲
۲-۵ ناوبری اینرسی در یک بعد..... ۱۳
۲-٦ ناوبری اینرسی در دو بعد..... ۱٤
۲-۷ ناوبری اینرسی در سه بعد..... ۱۵
۲-۷-۱ معادلات گرانشی زمین..... ۱٦
۲-۷-۲ معادلات اساسی ناوبری در دستگاه مختصات اینرسی ۱۷
۲-۷-۳ معادلات اساسی ناوبری در دستگاه مختصات زمین..... ۱۸
۲-۷-٤ معادلات اساسی ناوبری در دستگاه مختصات جغرافیایی..... ۱۹
۲-۷-۵ معادلات وضعیت..... ۲۱
۲-۷-۵-۱ ماتریس کسینوس‌هادی..... ۲۱
۲-۷-۵-۲ زوایای اویلر..... ۲۲
۲-۷-۵-۳ چهارگان‌ها..... ۲٤
۲-۸ خطاهای حسگرهای اینرسی..... ۲٦
۲-۸-۱ خطاهای سامان‌مند..... ۲٦
۲-۸-۱-۱ آفست بایاس سامان‌مند..... ۲٦
۲-۸-۱-۲ خطای ضریب مقیاس..... ۲٦
۲-۸-۱-۳ غیرخطی بودن..... ۲۷
۲-۸-۱-٤ عدم تقارن علامت ضریب مقیاس..... ۲۷
۲-۸-۱-۵ ناحیه مرده..... ۲۸
۲-۸-۱-٦ خطای کوانتیزه کردن..... ۲۹
۲-۸-۱-۷ خطای عدم تعامد..... ۲۹
۲-۸-۱-۸ خطای عدم هم ترازی..... ۲۹
۲-۸-۲ خطاهای تصادفی..... ۳۰
۲-۸-۲-۱ خطای بایاس اجرا به اجرا..... ۳۱
۲-۸-۲-۲ خطای رانش بایاس..... ۳۱

۲-۸-۲-۳ بی‌ثباتی ضریب مقیاس ۳۱
۲-۸-۲-٤ نویز سفید ۳۲
۲-۹ مدل‌سازی خطاهای حسگرهای اینرسی..... ۳۲
۲-۹-۱ مدل‌سازی خطاهای حسگر شتاب‌سنج..... ۳۲
۲-۹-۲ مدل‌سازی خطاهای حسگر چرخش‌سنج..... ۳۳
۲-۱۰ مدل‌سازی انتشار خطاهای سامانه‌ی ناوبری اینرسی در فضای دوبعدی..... ۳٤
۲-۱۱ تأثیر خطاهای سامانه‌ی ناوبری اینرسی و حسگرهای اینرسی بر تعیین موقعیت در فضای دوبعدی..... ۳٤
۲-۱۲ مدل‌سازی انتشار خطاهای سامانه‌ی ناوبری اینرسی در فضای سه‌بعدی..... ۳۵
۲-۱۳ ترازیابی اولیه..... ٤۱
۲-۱۳-۱ محاسبه ماتریس انتقال برای ترازیابی اولیه..... ٤۱
۲-۱٤ تنظیم..... ٤۳
۲-۱٤-۱ مراحل تنظیم شتاب‌سنج‌ها..... ٤٤
۲-۱٤-۱-۱ حالت ساده‌ی مدل خطای شتاب‌سنج‌ها..... ٤٤
۲-۱٤-۱-۲ حالت پیچیده مدل خطای شتاب‌سنج‌ها..... ٤۷
۲-۱٤-۱-۳ وزن دهی معادله‌ی حداقل مربعات با استفاده از واریانس اندازه‌گیری..... ٤۹
۲-۱٤-۲ مراحل تنظیم چرخش‌سنج‌ها..... ۵۰

فصل سوم

سخت‌افزار و نرم‌افزار سامانه..... ۵۲
۳-۱ مقدمه..... ۵۲
۳-۲ سخت‌افزار سامانه..... ۵۲
۳-۲-۱ بلوک دیاگرام سخت‌افزار سامانه..... ۵۲
۳-۲-۲ واحد کنترل..... ۵۲
۳-۲-۳ سامانه‌ی میکروالکترومکانیکی MPU6050..... ۵۳
۳-۲-٤ نمایشگر..... ۵۳
۳-۲-۵ رابط سریال به USB..... ۵۳
۳-۲-٦ نقشه و مدارچاپی ۵٤
۳-۳ نرم‌افزار سامانه..... ۵٤
۳-۳-۱ عملکرد الگوریتم برنامه..... ۵٦

۳-۳-۱-۱ راه‌اندازی حسگر MPU6050 و تنظیم کردن آن..... ٥٦
۳-۳-۱-۲ ترازیابی اولیه..... ٥٦
۳-۳-۱-۳ تعیین وضعیت سامانه با توجه به وضعیت لحظه قبل..... ٥٧
۳-۳-۱-٤ انتقال شتاب و سرعت‌زاویه‌ای از دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات جغرافیایی..... ٥٧
۳-۳-۱-٥ محاسبه سرعت سامانه با توجه به سرعت در لحظه‌ی قبل..... ٥٧
۳-۳-۱-٦ محاسبه موقعیت سامانه با توجه به موقعیت لحظه‌ی قبل..... ٥٨

فصل چهارم

کارهای صورت گرفته و نتایج عملی..... ٦٠
٤-۱ مقدمه..... ٦٠
٤-۲ نتایج عملی تنظیم..... ٦٠
٤-۳ حذف قسمتی از نویز تصادفی و داده‌های با دامنه نامعتبر..... ٦٣
٤-٤ تعیین زوایای غلت، چرخش ارتفاعی و چرخش سمتی و تأثیر خطا در این زوایا..... ٦٤
٤-٥ انجام آزمایش‌های محاسبه موقعیت..... ٦٧
٤-٥-۱ آزمایش اول موقعیت‌یابی..... ٦٧
٤-٥-۲ آزمایش دوم موقعیت‌یابی..... ٧٠
٤-٦ مقایسه نتایج..... ٧١

فصل پنجم

جمع‌بندی و ارائه پیشنهادها..... ٧٢

مراجع..... ٩٩

فهرست شکل‌ها و نمودارها

شکل ۲-۱ : الگوریتم کلی سامانه‌ی ناوبری اینرسی..... ۹

شکل ۲-۲ : (الف) ساختار حسگر شتاب‌سنج درحالی‌که هیچ نیرویی به آن وارد نشده است. (ب) ساختار حسگر شتاب‌سنج درحالی‌که شتابی در جهت راست به حسگر وارد شده است..... ۱۱

شکل ۲-۳ : تأثیر نیروی جاذبه زمین بر حسگر شتاب‌سنج..... ۱۱

شکل ۲-٤ : نمایی ساده از اساس کار حسگرهای چرخش‌سنج میکروالکترومکانیکی..... ۱۲

شکل ۲-۵ : ساختار کلی یک سامانه‌ی ناوبری اینرسی..... ۱۳

شکل ۲-٦ : نمایش حرکت یک‌بعدی جسم..... ۱٤

شکل ۲-۷ : حرکت جسم در یک سامانه دوبعدی..... ۱٦

شکل ۲-۸ : نحوه انتقال بردارهای شتاب از مختصات بدنه به مختصات جغرافیایی..... ۱٦

شکل ۲-۹ : خطای آفست بایاس حسگر اینرسی..... ۲۷

شکل ۲-۱۰ : خطای ضریب مقیاس حسگر اینرسی..... ۲۷

شکل ۲-۱۱ : غیرخطی بودن..... ۲۸

شکل ۲-۱۲ : عدم تقارن علامت ضریب مقیاس..... ۲۸

شکل ۲-۱۳ : ناحیه مرده..... ۲۹

شکل ۲-۱٤ : خطای کوانتیزه کردن..... ۳۰

شکل ۲-۱۵ : خطای عدم تعامد..... ۳۰

شکل ۲-۱٦ : خطای عدم هم ترازی..... ۳۰

شکل ۲-۱۷ : خطای رانش بایاس..... ۳۱

شکل ۲-۱۸ : نویز سفید..... ۳۲

شکل ۲-۱۹ : انتشار خطا در سامانه‌ی ناوبری اینرسی دوبعدی..... ۳٦

شکل ۲-۲۰ : نمایی از زوایای غلت، چرخش ارتفاعی و چرخش سمتی، در دستگاه مختصات جغرافیایی..... ٤۲

شکل ۲-۲۱ : یک نمونه ۱۲ تایی جهت‌گیری، در راستای تنظیم..... ٤٦

شکل ۳-۱ : بلوک دیاگرام سخت‌افزار سامانه..... ۵۳

شکل ۳-۲ : برد مدار چاپی سامانه..... ۵٤

شکل ۳-۳ : نقشه مدار..... ۵۵

شکل ۳-٤ : نمودار گردشی الگوریتم سامانه..... ۵۸

شکل ٤-۱ : مقایسه بین خروجی‌های شتاب‌سنج در راستای محور y ، قبل و بعد از تنظیم..... ٦۲

شکل ٤-۲ : مقایسه بین خروجی‌های چرخش‌سنج در راستای محور x ، قبل و بعد از تنظیم..... ٦۳

شکل ٤-٣ : پرش‌های خروجی حسگرهای شتاب‌سنج‌ها درحالی‌که سامانه کاملاً ثابت بوده است..... ٦٤
شکل ٤-٤ : صفر کردن دامنه‌های کوچک‌تر از ۰/۱ متر بر مجذور ثانیه در شتاب‌سنج..... ٦٥
شکل ٤-٥ : چرخش سامانه به اندازه‌ی ۹۰ درجه ساعت‌گرد و سپس ۹۰ درجه پادساعت‌گرد و بازگشت به حالت اولیه..... ٦٥
شکل ٤-٦ : خطای ایجاد شده‌ی زوایا پس از ۵ دقیقه..... ٦٦
شکل ٤-٧ : مسیر اصلی پیموده شده در آزمایش اول (۱۰۰ متر)..... ٦٧
شکل ٤-٨ : مسیر محاسبه‌شده توسط سامانه‌ی ناوبری اینرسی در آزمایش اول..... ٦٨
شکل ٤-٩ : شتاب اندازه‌گیری شده، توسط سامانه‌ی ناوبری اینرسی در آزمایش اول..... ٦٩
شکل ٤-١٠ : سرعت اندازه‌گیری شده توسط سامانه‌ی ناوبری اینرسی در آزمایش اول..... ٦٩
شکل ٤-١١ : مسیر اصلی پیموده شده در آزمایش دوم (۳۰۰ متر)..... ٧٠
شکل ٤-١٢ : مسیر محاسبه‌شده توسط سامانه‌ی ناوبری اینرسی در آزمایش دوم..... ٧٠

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ : تأثیر خطاهای حسگرهای اینرسی و سامانه‌ی ناوبری اینرسی بر تعیین موقعیت در فضای دوبعدی..... ۳۶
جدول ٤-۱ : ضرایب مربوط به تنظیم شتاب‌سنج‌ها..... ٦۱
جدول ٤-۲ : ضرایب مربوط به تنظیم چرخش‌سنج‌ها..... ٦۲
جدول ٤-۳ : خطای زوایای غلت، چرخش ارتفاعی و چرخش سمتی..... ٦٦
جدول ٤-٤ : خطای زوایای غلت، چرخش ارتفاعی و چرخش سمتی پس از چرخش ۹۰ درجه‌ای سامانه..... ٦٦
جدول ٤-۵ : مقایسه نتایج مقاله [۵۲] و سامانه‌ی ناوبری اینرسی طراحی‌شده در این پایان‌نامه..... ۷۱

فهرست پیوست‌ها

پیوست الف (کدهای avr)..... ۷۳
پیوست ب (کدهای تنظیم در نرم‌افزار متلب)..... ۹۵

چکیده

نام خانوادگی : علی نژاد	**نام:** محمد	**شماره دانشجویی :** ۹۰۴۲۱۰۳
عنوان پایان‌نامه : طراحی و ساخت سامانه‌ی ناوبری اینرسی		
استاد/ اساتید راهنما: دکتر هومان کعبی		
استاد/ اساتید مشاور: دکتر غلامرضا اکبری زاده		
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	**رشته:** مهندسی برق	**گرایش:** الکترونیک
دانشگاه : شهید چمران اهواز	**دانشکده:** مهندسی	**گروه :** برق
تاریخ فارغ التحصیلی :		**تعداد صفحه:**

کلید واژه‌ها : شتاب‌سنج، چرخش‌سنج، سرعت، موقعیت، وضعیت، ناوبری اینرسی، شتاب، سرعت‌زاویه‌ای

در این پایان‌نامه، سامانه‌های ناوبری اینرسی بررسی و الگوریتمی جهت تنظیم حسگرهای شتاب‌سنج و چرخش‌سنج بدون نیاز به تجهیزات خاص ارائه شده است. بر این پایه، سامانه‌ای طراحی و ساخته شده که توانایی محاسبه موقعیت مکانی جسم نسبت به موقعیت اولیه آن را دارد.

قابل ذکر است که چون معادلات حاکم بر سامانه‌ی ناوبری اینرسی شامل انتگرال‌گیری از شتاب و سرعت می‌باشد، پس از گذشت زمان، خطای تجمعی موجب ایجاد خطای بزرگی در سامانه‌ی ناوبری اینرسی می‌شود. به همین منظور در طراحی این سامانه الگوریتم‌هایی جهت کاهش و بهبود این خطا ابداع شده است. درنهایت سامانه ساخته شده، به‌صورت عملی توسط خودرو، در مسیرهای متفاوت آزموده و مورد ارزیابی قرارگرفته است و نتایج آن ارائه و با کارهای قبلی مقایسه شده است.

فصل اول

مقدمه و انگیزه کار

۱-۱ مقدمه

ناوبری[1] علم تعیین موقعیت[2]، سرعت[3] و وضعیت[4] یک وسیله نقلیه می‌باشد[۱]. از دیرباز تا کنون انسان این عمل را با استفاده از فنون زمان خود انجام داده است. درواقع ناوبری یک مهارت بسیار کهن است که امروزه به یک علم پیچیده تبدیل شده است، به‌طوری‌که می‌توان از روش‌های مختلف ناوبری با بهره بردن از حسگرهای مختلف که هرکدام دارای ویژگی و دقت خاصی می‌باشند استفاده کرد[۲]. سامانه ناوبری هم می‌تواند به‌صورت مستقل عمل کند و هم وابسته به منابع خارجی و یا تلفیقی از هر دو نوع باشد[۳]. موقعیت نقاط مورد نظر با توجه به چارچوب مرجعی مشخص می‌شود که از قبل تعیین شده است. به‌طور مثال می‌توان هر نقطه‌ای بر روی زمین را با توجه به خطوط استوا و نصف‌النهار مبدأ با تعیین طول و عرض جغرافیایی آن نقطه تعیین کرد [٤].

۱-۲ تاریخچه

در قرن نوزدهم ساخت چرخش‌سنج تحولی در علم ناوبری ایجاد کرد. در این قرن اولین تجهیزات و ابزار چرخش‌سنجی ساخته شد. در اوایل قرن بیستم این تحولات و پیشرفت‌ها ادامه داشت تا اینکه برای اولین بار استفاده از چرخش‌سنج و شتاب‌سنج برای ساخت یک سامانه‌ی کامل

---

[1] Navigation
[2] Position
[3] Velocity
[4] Attitude

ناوبری اینرسی مطرح گردید. بااین‌حال در آن زمان حسگرهای اینرسی کیفیت و دقت لازم برای ساخت چنین دستگاهی را نداشتند [٤].

در زمان جنگ جهانی دوم دانشمندان آلمانی از اصول ناوبری اینرسی بر روی برخی موشک‌های خود استفاده کردند که اولین قدم‌ها در مسیر تکامل این سامانه بود. از آن زمان به بعد فعالیت‌های زیادی جهت ساخت سامانه‌های ناوبری جدیدتر و با دقت بالاتر در نقاط مختلف جهان صورت گرفت. در دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی پیشرفت‌های زیادی در زمینه‌ی فعالیت‌های ناوبری اینرسی به‌دست آمد، حسگرهای با دقت بسیار بالاتر ساخته شد و از فنّاوری‌های پیشرفته‌تر برای ساخت شتاب‌سنج و چرخش‌سنج استفاده شد، به‌عنوان‌مثال خطا در حسگرهای چرخش‌سنج از ۱۵ درجه بر ساعت به ۰.۰۱ درجه بر ساعت کاهش پیدا کرد [٤] و [٥]. در دهه‌ی ۱۹٦۰ میلادی سامانه‌های ناوبری اینرسی برای هواپیماهای نظامی، کشتی‌ها و زیردریایی‌ها ، استانداردسازی شد. این دوره شاهد تحولات بیشتری با دقیق‌تر شدن تجهیزات و کوچک‌تر شدن آن‌ها در زمینه‌ی ناوبری اینرسی بود[٦].

در دو دهه‌ی گذشته پیشرفت‌های بزرگ در زمینه‌ی میکروکامپیوترها و همین‌طور ساخت چرخش‌سنج‌هایی با محدوده پویا بزرگ موجب شد تا ساخت سامانه‌های ناوبری اینرسی متصل به بدنه[1] امکان‌پذیر شود. با استفاده از این فنّاوری اندازه و پیچیدگی این سامانه‌ها کمتر و همین‌طور ارزان‌تر شده و همین باعث کاربردی‌تر و فراگیرتر شدن این سامانه‌ها می‌شود [٧].

۱-۳ انگیزه‌ی کار

دست یافتن به فنّاوری سامانه‌ی میکروالکترومکانیکی[2] ، توسعه و پیشرفت سامانه‌های ناوبری اینرسی را به‌طور هیجان‌انگیز و چشم‌گیری افزایش داده است، به‌طوری‌که باوجود دقت پایین در مدل‌های ارزان‌تر این حسگرها همچنان برای استفاده در ربات‌ها و برای سامانه‌ی ناوبری که حساسیت کمتری دارند در دسته‌ی بهترین‌ها قرار می‌گیرند [٤]. در دسترس بودن و ارزان قیمت بودن این

[1] Strapdown
[2] MicroElectroMechanical Systems (MEMS)

حسگرها راه را برای بسیاری از پیشرفت‌ها در زمینه‌ی ناوبری اینرسی باز کرده است، همین‌طور وجود تحریم‌ها و عدم دسترسی به سامانه‌های دقیق دلیل مضاعفی است برای طراحی و ساخت دستگاهی که از این فنّاوری بهره می‌گیرد و می‌تواند در بسیاری از تجهیزات کاربرد داشته باشد.

۱-٤ طبقه‌بندی روش‌های موقعیت‌یابی

روش‌های موقعیت‌یابی در دو گروه و در هفت دسته طبقه‌بندی می‌شوند[۳]. دو گروه ذکر شده شامل، روش اندازه‌گیری نسبی(نقطه فرضی[۱]) و روش اندازه‌گیری مطلق (سامانه‌ی مبتنی بر مرجع[۲]) می‌باشد، که روش اندازه‌گیری نسبی شامل، مسافت‌سنجی[۳] و ناوبری اینرسی[٤] می‌باشد و روش اندازه‌گیری مطلق شامل، قطب نمای الکترونیکی[٥] ، برج‌های فعال[٦]، سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی[۷]، ناوبری نشانه یابی[۸] و موقعیت‌یابی مبتنی بر نقشه[۹]، می‌باشد.

۱-٤-۱ روش اندازه‌گیری نسبی(نقطه فرضی)

در این گروه از روش‌های اندازه‌گیری، موقعیت جسم بر اساس مشخص بودن موقعیت قبلی و اندازه‌گیری آخرین حرکات جسم به‌دست می‌آید. در این روش خطای موجود در موقعیت قبلی با مقادیر اندازه‌گیری شده آخرین حرکات جسم، جمع می‌شود و در بلندمدت می‌تواند موجب انحراف موقعیت محاسبه شده و موقعیت واقعی شود. این روش اندازه‌گیری به دو دسته تقسیم می‌شود[۳].

---

[1] Dead-reckoning
[2] Reference-based Systems
[3] Odometry
[4] Inertial Navigation
[5] Electronic Compasses
[6] Active Beacons
[7] Global Navigation Satellite Systems(GNSS)
[8] Landmark Navigation
[9] Map-Based Positioning (Or Model Matching)

۱-٤-۱-۱ مسافت‌سنجی

در روش مسافت‌سنجی، داده‌ها به‌وسیله‌ی حسگری که حرکت چرخشی محور یک چرخ را حس می‌کند به‌دست می‌آیند. به کمک این روش حرکت چرخشی چرخ به جابجایی خطی تبدیل می‌شود. مزایای این روش دقت کوتاه‌مدت، نرخ نمونه‌برداری بالا و قیمت ارزان آن است. از معایب آن این است که فقط به چرخش چرخ حساس است و در صورت لغزش چرخ، نمی‌تواند حرکت را حس کند. با فرض یک موقعیت اولیه برای سامانه، حرکت تدریجی سامانه در هر لحظه از زمان با لحظه‌ی قبل جمع شده و جابجایی جسم را تعیین می‌کند. این امر منجر به افزایش خطاهای کوچک و جمع شدن آن‌ها روی هم می‌شود[۳].

۱-٤-۱-۲ ناوبری اینرسی

در روش ناوبری اینرسی داده‌های سامانه، شتاب و سرعت‌زاویه‌ای است که توسط حسگرهای شتاب‌سنج و چرخش‌سنج اندازه‌گیری می‌شوند. با استفاده از سرعت‌زاویه‌ای می‌توان زاویه‌ی چرخش و با استفاده از شتاب می‌توان سرعت و موقعیت جسم را محاسبه کرد. در این روش سامانه‌ی ناوبری مستقل است، یعنی نیازی به منابع خارجی ندارد. این روش نیز مانند روش مسافت‌سنجی باعث تجمع خطاهای کوچک بر روی یکدیگر شده و به مرور زمان موجب خطاهای بزرگ‌تر در محاسبات ناوبری می‌شود[۸].

۱-٤-۲ روش اندازه‌گیری مطلق (سامانه‌ی مبتنی بر مرجع)

در روش اندازه‌گیری مطلق، سامانه با استفاده از منابع خارجی و بدون اطلاع و شناخت مسیر، می‌تواند موقعیت جسم را تعیین کند. این روش اندازه‌گیری در پنج دسته طبقه‌بندی می‌شود[۳].

۱-٤-۲-۱ قطب نمای الکترونیکی

قطب‌نمای الکترونیکی دستگاهی است که به کمک یک مغناطیس‌سنج، زاویه‌ی سامانه را نسبت به شمال جغرافیایی و مغناطیسی تعیین می‌کند. از معایب این سامانه این است که تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی غیر از میدان مغناطیسی زمین ازجمله سیم‌های برق فشارقوی و یا ساختمان‌های فلزی، قرار می‌گیرد و باعث محاسبه اشتباه زاویه نسبت به شمال جغرافیایی و یا شمال مغناطیسی می‌شود[۳].

۱-٤-۲-۲ برج‌های فعال

سامانه‌ی ناوبری برج‌های فعال، معمول‌ترین سامانه‌ی ناوبری کشتی‌ها و هواپیماها است. این سامانه‌ها قابل اعتماد و دقیق هستند. اما هزینه‌های بالا برای نصب، راه‌اندازی، تعمیر و نگهداری از معایب این سامانه‌ها است. در این سامانه‌ها تعیین موقعیت بر اساس زمان و سرعت انتقال سیگنال است که می‌تواند رادیویی یا انواع دیگر ارتباطات بی‌سیم باشد. با استفاده از ترکیب اطلاعات مکانی حداقل سه برج فعال، سامانه ناوبری با استفاده از مثلث سازی یا الگوریتم‌های دیگر، مکان مورد نظر را تشخیص می‌دهد. لازم به ذکر است که در این روش مکان برج‌ها باید به‌صورت دقیق مشخص باشد[۳].

۱-٤-۲-۳ سامانه‌ی ماهواره‌ای ناوبری جهانی

سامانه‌ی ماهواره‌ای ناوبری جهانی، سامانه‌هایی هستند که به گیرنده‌های کوچک اجازه می‌دهند تا موقعیت خود را که شامل طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع است، مشخص کنند. این قابلیت از طریق انتقال امواج رادیویی بین دستگاه و ماهواره صورت می‌گیرد. معروف‌ترین این سامانه‌ها، سامانه موقعیت‌یاب جهانی[1] است. در این سامانه تا زمانی که گیرنده به تعداد لازم از

[1] Global Positioning System (GPS)

ماهواره‌ها متصل باشد، موقعیت گیرنده قابل تشخیص است، اما در مکان‌هایی که سیگنال‌های این ماهواره‌ها در دسترس نباشند امکان استفاده از این سامانه‌ها وجود ندارد[۹].

۱-٤-۲-٤ ناوبری نشانه یابی

این نوع روش ناوبری برای جسمی قابل استفاده است که در محیط‌هایی با تعدادی از اشیاء کاملاً شناخته شده حرکت می‌کند. جسم متحرک باید پایگاه داده‌ای از ویژگی‌ها و موقعیت دقیق این اشیاء داشته باشد و توسط حسگرهایی که بر روی آن تعبیه شده، آن‌ها را تشخیص داده و با توجه به موقعیت آن‌ها ، مکان خود را مشخص کند[۳].

۱-٤-۲-۵ موقعیت‌یابی مبتنی بر نقشه

در این روش جسم متحرک با استفاده از حسگرها و دوربین‌هایی که بر روی آن تعبیه شده از محیط اطراف نقشه‌ای تهیه کرده و آن را با نقشه کلی که از قبل در حافظه‌ی جسم قرار داده شده تطبیق می‌دهد و از این طریق مکان خود را به‌دست می‌آورد. این روش فقط در محیط‌هایی قابل استفاده است که از قبل به‌طور کامل شناخته شده باشند[۳].

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

در طی این پروژه اصول اولیه یک سامانه‌ی ناوبری اینرسی و الگوریتم‌های لازم جهت ساخت چنین دستگاهی به‌طور کامل توضیح داده شده است. این مبحث در فصل دوم به‌طور جامع گنجانده شده است. فصل سوم مربوط به توضیحاتی در مورد نرم‌افزار و سخت‌افزار طراحی شده برای این سامانه می‌باشد. در فصل چهارم نتایج عملی و شرایط و توضیحات مراحل آزمایش‌ها بیان می‌شود. و سرانجام در فصل پنجم جمع‌بندی و پیشنهادهایی جهت ادامه کار ارائه شده است.