دانشکده فناوری‌های نوین

گروه نانو الکترونیک

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

عنوان

طراحی و ساخت ژیروسکوپ مجتمع بسیار دقیق مبتنی بر میکرو رزوناتور حلقوی

استاد راهنما

پروفسور علی رستمی

استاد راهنمای دوم

دکتر رضا یدی پور

استاد مشاور

دکتر حامد باغبان

پژوهشگر

محمد رضا چگینی تلگرافچی

بهمن ۹۱

نام خانوادگی دانشجو: چگینی تلگرافچی نام: محمد رضا
عنوان پایان‌نامه: طراحی و ساخت ژیروسکوپ مجتمع بسیار دقیق مبتنی بر میکرو رزوناتور حلقوی
استاد راهنما: پروفسور علی رستمی استاد راهنمای دوم: دکتر رضا یدی پور استاد مشاور: دکتر حامد باغبان
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ناپیوسته رشته: نانو فناوری گرایش: نانو الکترونیک دانشگاه: تبریز دانشکده: فناوری‌های نوین تاریخ فارغ‌التحصیلی: ۱۳۹۱/۱۱/۱۲ تعداد صفحه:۶۴
کلید واژه‌ها: ژیروسکوپ، رزوناتور حلقوی، مدار مجتمع نوری
چکیده: در این پروژه روش‌های آشکارسازی مختصات (Gyro) مورد بررسی قرار می‌گیرد. ژیروسکوپ‌های موجود مکانیکی و فیبر نوری مورد تحلیل اقتصادی و فنی قرار می‌گیرد، بعد از بررسی مزایا و معایبی که این ژیروسکوپ‌ها دارند اقدام به طراحی و ساخت ژیروسکوپ مبتنی بر رزوناتور حلقوی می‌نماییم. ابتدا آرایش پایه برای آشکار سازی چرخش را آنالیز می‌نماییم سپس با ارایه ساختار بهینه بالاترین حساسیت را برای ژیروسکوپ محاسبه و شبیه سازی می‌نمایم. بعد از این مرحله ساختار محاسبه شده را در پایه Si اقدام به ساخت خواهیم نمود.

۱ پیشینه تحقیق ۲

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۱-۱ پدیده ژیروسکوپی چیست؟ ۲

۱-۱-۲ ژیروسکوپ چیست؟ ۳

۱-۱-۳ سیستم ناوبری لخت ۴

۱-۲ تاریخچه ۵

۱-۳ انواع ژیروسکوپ ۸

۱-۳-۱ ژیروسکوپ مکانیکی ۸

۱-۳-۲ ژیروسکوپ‌های نوری ۹

۱-۳-۲-۱ ژیروسکوپ‌های حلقوی لیزری RLG ۹

۱-۳-۲-۲ ژیروسکوپ‌های فیبر نوری FOG ۱۰

۱-۳-۲-۳ ژیروسکوپ مدار مجتمع نوری ۱۱

۱-۳-۳ MEMS ۱۲

۱-۳-۳-۱ سنسورهای اتم سرد ۱۳

۱-۴ روند جاری در برنامه‌های کاربردی فناوری ژیروسکوپ ۱۴

۲ بررسی منابع ۱۶

۲-۱ رزوناتور حلقوی: تئوری و مدل سازی ۱۶

۲-۱-۱ رزوناتور حلقوی ساده ۱۶

۲-۱-۲ پارامترهای رزوناتور حلقوی ۲۲

۲-۱-۳ رزوناتورهای حلقوی کوپل سریالی: ۲۵

۲-۱-۴ رزوناتور حلقوی دوتایی کوپل موازی ۲۸

۲-۲ اثر ساگناک ۳۰

۲-۲-۱ معرفی ۳۰

۲-۲-۲ اصول نظری اثر ساگناک ۳۲

۲-۳ محدودیت عملکرد ژیروسکوپ رزونانسی مدار مجتمع ۳۶

۲-۳-۱ معرفی ۳۶
۲-۳-۲ اصول ژیروسکوپ CROW ۳۹
۳-۳-۲ مدل کردن تغییر فاز ساگناک در CROW ۴۰
۲-۳-۴ تحلیل عددی ژیروسکوپ CROW با بایاس فاز غیر صفر ۴۵
۳ شبیه سازی و نتایج ۵۴
۳-۱ معرفی ۵۴
۳-۲ بررسی توان و فاز خروجی در ساختار اد-دراپ ۵۵
۳-۳ بررسی تلفات در ژیروسکوپ مدار مجتمع نوری ۵۸
۳-۴ ارائه ساختار بهینه در جهت بیشینه کردن حساسیت ۵۹

فصل اول

پیشینه تحقیق

۱ پیشینه تحقیق

۱-۱ مقدمه

۱-۱-۱ پدیده ژیروسکوپی چیست؟

از دوران کودکی به خاطر داریم که وقتی فرفره‌ی کوچکی را با کمک نیروی انگشتان خود می‌چرخانیم فرفره حول محورش و روی نوک تیز خود شروع به چرخش می‌کرد. بدون چرخش فرفره، امکان ایستادن فرفره روی نوکش وجود نداشت. در واقع چرخش فرفره حول محورش موجب پایداری و حفظ جهت فرفره می‌شد. این توضیح ساده مبنای کارکرد ژیروسکوپ های مکانیکی می‌باشد و از آن منظر، زمین نیز یک ژیروسکوپ است که به علت دوران، محور خود را در فضا ثابت نگه می‌دارد.

طبق اصل بقای اندازه حرکت زاویه ای، هر جسم متقارن در حال چرخش سعی دارد جهت خود را همواره در فضا حفظ کند. از این رو اگر یک جسم متقارن را با دور بالا بچرخانیم و اطراف آن را با یاتاقان و بلبرینگ آزاد بگذاریم که نیروهای خارجی بر آن اعمال نشود، یا چرخش قابی که جسم درون آن دوران می‌کند، جهت چرخش جسم دوار تغییر نمی‌کند، بنابراین می‌توانیم با کمک این وسیله در اجسام متحرک جهت چرخش جسم دوار تغییر نمی‌کند، بنابراین می‌توانیم با کمک این وسیله در اجسام متحرک جهت ثابتی داشته باشیم که وضعیت فعلی خود را در هر لحظه با آن مقایسه نماییم و لذا موقعیت زاویه ای و محاسبه سرعت تغییر سرعت زاویه ای را بدست آوریم.

عضو اصلی ژیروسکوپ های مکانیکی، یک دستگاه دوار یا روتور است که معمولاً با سرعت زیاد حول محور تقارن خود دوران می‌کند این سرعت از ۳۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ دور در دقیقه می‌باشد لذا در اثر اینرسی جرم دوار، اندازه حرکت (ممنتوم) نسبتاً بزرگی ایجاد می‌شود. اگر یاتاقان بندی محور چرخش را در طوقه ای معلق تعبیه کنیم به نحوی که گشتاور خارجی به آن وارد نشود، با وجود تمام حرکت‌های قاب، محور چرخش روتور همواره به جهت ثابتی اشاره می‌کند و موقعیت خود را در فضا حفظ می‌کند. با این روش می‌توان جهت و یا محورهای ثابتی را برای وسیله نقلیه تعریف کرد که هرگونه حرکت زاویه ای نسبت به این محورها سنجیده شود.[۱]

۱-۱-۲ ژیروسکوپ چیست؟

ژیروسکوپ عضو اصلی سیستم‌های هدایت اینرسی است و عمدتاً برای اندازه گیری مقدار دوران ، سرعت و ایجاد محورهای مختصات مرجع در وسایل نقلیه هوایی ، فضایی و دریایی (مانند هواپیما ،موشک ،ماهواره ،سفینه‌های فضایی ، کشتی‌ها و زیر دریایی‌ها)به کار می‌رود . با استفاده از ژیروسکوپ می‌توان جهت و یا محورهای ثابتی را برای وسیله نقلیه تعریف کرد که هر گونه حرکت زاویه ای وسیله نقلیه نسبت به آن محور ها سنجیده می‌شود .

در تمام وسایل حرکتی اطلاع از موقعیت و زاویه جسم و سرعت زاویه ای آن امری ضروری است، چرا که بدون اطلاع از وضعیت جسم، کنترل آن به سمت هدف غیر ممکن بوده و امری محال به نظر می‌رسد. به دست آوردن این اطلاعات از روی زمین برای اجسامی مانند موشک یا ماهواره و یا گوشی‌های تلفن همراه، کاری بسیار پیچیده و در بعضی موارد غیر ممکن است؛ به عنوان مثال اگر مسیر موشک را در مدت زمان معین نتوانیم کنترل کنیم، موشک از مسیر خارج شده و ما را به هدف نخواهد رساند.

کلمه ژیروسکوپ از دو کلمه Gyro به معنای دوران و Scope به معنای نشان دادن تشکیل شده است؛ بنابراین به این وسیله می‌توان دوران نما نیز گفت که وظیفه خود یعنی نمایش دوران را بیان می‌کند.

ژیروسکوپ‌ها سنسورهایی هستند که ما از آن‌ها جهت به دست آوردن سرعت زاویه ای و موقعیت زاویه ای

استفاده می‌کنیم. با پردازش این اطلاعات می‌توان موقعیت کلی جسم را نیز بر اساس محاسبات به دست آورد. ژیروسکوپ عضو اصلی سیستم‌های هدایت اینرسی می‌باشد. سیستم هدایت اینرسی که در ناوبری اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، سیستمی است که جهت مشخص کردن موقعیت یک متحرک مانند وضعیت هواپیما یا کشتی با استفاده از متغیر های اینرسی آن مثل سرعت و شتاب به کار می‌رود؛ این امر از طریق اندازه گیری این کمیت‌ها توسط حس کننده اینرسی انجام می‌گیرد.

در حالت کلی سیستم هدایت اینرسی عبارت است از ژیروسکوپ‌ها و شتاب سنج‌ها که بر روی پایه ثبات اینرسی نصب می‌شوند. وظیفه اصلی ژیروسکوپ‌ها ایجاد یک دستگاه مختصات مرجع است و شتاب سنج‌ها شتاب متحرک در امتداد چنین محورهایی را اندازه می‌گیرند، این شتاب می‌تواند نسبت به دستگاه مرجع اینرسی یا دستگاه مرجع دیگری مثل دستگاه متصل به زمین باشد.

۱-۱-۳ سیستم ناوبری لخت[1]

یک سیستم ناوبری اینرسی شامل حداقل یک کامپیوتر و یک سکو یا جایگاه شامل شتاب سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها یا وسایل حس کننده دیگر برای حرکت خود است. این سیستم، موقعیت و سرعت خود را در آغاز به وسیله مرجعی دیگر به دست می‌آورد (یک انسان یا GPS و ...) و سپس موقعیت و سرعت جدید خود را به وسیله تجزیه اطلاعات دریافت شده از سنسورهای حرکتی خود محاسبه می‌کند. مزیت این سیستم آن است که به جز در نقطه شروع، برای تعیین موقعیت و جهت گیری و یا سرعت خود، احتیاج به هیچ مرجع خارجی ندارد.

به دلیل دقت و حساسیت کار معمولاً از ژیروسکوپ با ۳ درجه آزادی استفاده نمی‌شود، بلکه از ۳ ژیروسکوپ با یک درجه آزادی[2] یا ۲ ژیروسکوپ با ۲ درجه آزادی استفاده می‌شود.

---

[1] **Inertial guidance system**

[2] در این ژیروسکوپ روتور به جز حرکت حول محور چرخش تنها حول یک محور دیگر می تواند چرخش کند. در امتداد یک محور که طوقه داخلی باشد، این حرکت امکان پذیر است، این ژیروسکوپ، تنها چرخش در یک محور را حس می کند.

۱-۲ تاریخچه

نخستین پدیده‌ی ژیروسکوپی،۱۲۵ سال قبل از میلاد حضرت مسیح توسط ایرخوس کشف شد. تا زمان نیوتن یعنی اواخر قرن ۱۷ میلادی، تنوع چندانی در این خصوص صورت نگرفت. اما در قرن ۱۸، برخی محققین مانند اولر، تحقیقات قابل ملاحظه ای در دینامیکی اجسام دوار صورت دادند. در همین قرن، در انگلستان درباره ایجاد یک افق مصنوعی برای کشتی‌ها، بررسی‌هایی عمل آمد. به این منظور از یک قرقره دوار استفاده شد که یک آینه مسطح مصنوعی برای کشتی‌ها، بررسی‌هایی عمل آمد. به این منظور از یک قرقره دوار استفاده شد که یک آینه مسطح عمود بر امتداد محور چرخش آن قرار داشت.

در اواسط قرن ۱۹، فوکو، دانشمند فرانسوی برای نشان دادن دوران زمین از یک ژیروسکوپ استفاده کرد که این بار به علت نداشتن یک موتور الکتریکی مناسب، به شکل دقیقی انجام نگرفت. همین دانشمند بود که برای نخستین بار در سال ۱۸۵۲ میلادی نام ژیروسکوپ را برای آن برگزید و در سال ۱۹۰۰ شخصی آلمانی به نام آنشوش کامف تصمیم به ساختن زیر دریایی برای کاوش در قطب شمال گرفت. اما وسایل هدایت و راه یابی دقیق برای این کار وجود نداشت. به ویژه قطب نماهای مغناطیسی در محدوده قطب شمال به دلیل وجود میدان‌های مغناطیسی قوی، از دقت و عملکرد صحیح می‌افتادند. از این رو تلاش کرد تا قطب نمای دیگری که مستقل از خواص مغناطیسی عمل کند بسازد. تلاش وی منجر به ساخت قطب نمایی شد که بر اساس خواص ژیروسکوپی کار می‌کرد و آن را قطب نمای ژیروسکوپی نام نهادند. این قطب نما، در واقع نخستین وسیله دقیق هدایت و راه یابی است که بر اساس اصول اینرسی کار می‌کرد. پیشرفت صنعت و پدیدار شدن وسایل نقلیه فضایی، لزوم ابداع و هدایت و کنترل دقیق را بیش از پیش آشکار ساخت. به ویژه وقوع جنگ جهانی اول و دوم و تولید نسل‌های جدید انواع هواپیما و موشک‌ها، دانشمندان و محققین را به نحو بارزی بر آن داشت تا در زمینه ابداع وسایل دقیق‌تر و با کیفیت بالاتر تلاش بیشتری صورت دهند. قدم اساسی در این زمینه طی جنگ جهانی دوم در دانشگاه ام آیتی آمریکا برداشته شد که تحت سرپرستی شخصی به نام چارلز دراپر، ژیروسکوپ‌هایی دقیق و کوچک برای نصب روی هواپیما ساخته شد که به خاطر همین تلاش‌هایش او را آقای جایرو لقب نهادند. پس از جنگ جهانی دوم، روش هدایت و ناوبری اینرسی به

عنوان روشی دقیق و قابل اعتماد برای هدایت وسایل فضایی ساخته شد. نخستین سامانه هدایت که به طور کامل بر مبنای اصول اینرسی توسط ژیروسکوپ‌ها و شتاب سنج‌ها عمل می‌کرد و در آن از یاتاقان‌های گازی برای تعلیق طوقه‌ها استفاده شده بود، در سال ۱۹۵۰ مورد آزمایش پروازی قرار گرفت. امروزه نیز سامانه هدایت اینرسی، به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای هدایت و کنترل در امر هوانوردی و فضانوردی و همچنین هدایت موشک‌ها، کشتی‌ها و زیردریایی‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار دارد و به تبع این امر، انواع مختلفی از ژیروسکوپ‌ها و شتاب سنج‌ها اختراع شده‌اند که در این مقاله به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

سیستم‌های ناوبری لخت از ابتدایی‌ترین آن‌ها که سنسورهای الکترومکانیکی لخت می‌باشند که هدایت راکت V2 را بر عهده داشت تا ماشین‌های خود کنترل گری که امروزه طراحی می‌شوند، پیشرفت و تکامل چشمگیری داشته‌اند. این سنسورها توسط فناوری‌های MEMS,MOEMS,NEMS,NOEMS ساخته می‌شوند.

آغاز فناوری میکرو مهندسی در قرن ۱۵ می‌باشد، زمانی که ساعت سازها اولین ساعت جیبی را ابداع کردند. [۱] در سال ۱۹۶۰ شرکت سیکو و یک ائتلافی از شرکت‌های سوییسی به رقابت برای توسعه اولین ساعت مچی کوارتز پرداختند که نتیجه کار موفقیت آمیز بود. در سال ۱۹۶۹ شرکت سیکو ساعت کوارتز آستورن را به بازار عرضه کرد، که اولین ساعت کوارتز در دنیا می‌باشد، سپس در سال ۱۹۷۰ شرکت همیلتون اولین ساعت الکترونیکی به نام پولسار را به جهان معرفی کرد . این اولین ساعت‌ها که با نام کوارتز شناخته می‌شوند، اولین دستگاه های MEMS واقعی بودند.

امروزه MEMS به دلیل پتانسیل گسترده آن‌ها در کاربردهای، صنعتی، نظامی و پزشکی، مورد علاقه زیادی واقع شده است. در نتیجه تلاش‌های بسیاری جهت طراحی و ساخت MEMS انجام شده است. MEMS اشاره به دستگاه‌هایی دارد که طول مشخصی بین ۱ میکرومتر تا ۱ میلی متر دارند، که ترکیبی از اجزای الکتریکی و مکانیکی می‌باشند و با استفاده از فناوری مدار مجتمع ساخته می‌شوند [۲].

با تکامل شگفت انگیزی که در فیزیک و فناوری ساخت روی داد منجر به پیشرفت زمینه های نوری و

الکترونیکی گردید که این امکان را برای توسعه سنسورهای چرخشی اپتو-الکترونیک[1] فراهم ساخت. نتایج به دست آمده همچنان دیدنی و جذاب است. این تکامل بازتاب گسترده ایی در توسعه سیستم‌های ناوبری لخت بدون اجزای[2] متحرک پدید آورد .

توسعه قطعات و ظهور فناوری‌های پیشرفته ساخت، برتری سنسورهای اپتوالکترونیک بر مکانیکی را از نظر عملکرد و کاهش اندازه به ارمغان آورد. استفاده از نور به مقدار قابل توجهی باعث افزایش عمر سنسور، بازده عملکرد[3] و کاهش زمان راه اندازی در حدود میلی ثانیه و کاهش اختلالات ناشی از تداخل الکترومغناطیسی شده است. کوچک سازی با استفاده از فناوری مدار مجتمع نوری به دست آمده است. بنابراین آن را می‌توان مشابه با فناوری مدارات مجتمع الکترونیکی نامید. این مدارات نوری شامل اجزایی مانند :تلفیق کننده‌ها[4] و تقویت کننده‌ها و سوییچ‌هایی که همگی بر روی یک بستر[5] طراحی و ساخته می‌شوند، می‌باشد. در سال‌های اخیر توجه در طراحی و تولید سنسورهای "حالت جامد" متمرکز شده است، به طوری که بتوان تمام اجزا را بر روی یک تراشه اجرا کرد.

در حال حاضر سنسورهای چرخش و حرکت انتقالی بر اساس آثار زیر عمل می‌کنند:

اثر پیزوالکتریک، پیزو مقاومتی، اثر ساگناک، تونل زنی الکترون، سنسورهای خازنی، سنسورهای الکترومغناطیسی، سنسورهای با شبکه براگ، سنسورهای الکترواستاتیکی و مغناطیسی به حالت تعلیق در جرم[6] سنسورهای مغناطیسی تشدید شونده و الکترومغناطیس، ارتعاشی، آکوستیک، موج سطحی، فیبر نوری، لیزری، سنسورهای ایزوتوپ رادیو اکتیو، سنسورهای قطبشی و...

خطاهای اصلی در ناوبری لخت شامل : شروع به کار نادرست سیستم ناوبری، عیوب ناشی از استفاده نادرست از مدل جاذبه در برنامه‌های کاربردی و عیوب سنسورهای Gyro و شتاب سنج‌ها می‌باشد [۳]. خروجی

[1] Opto-Electronic
[2] Strap-down
[3] Scale factor performance
[4] Modulators
[5] Substrate
[6] Electrostatic and magnetic suspended mass sensors

بدست آمده از سنسور که پس از آن به ناوبر عرضه می‌شود در این حالت بسیار زیان آور خواهد بود. برای ژیروسکوپ‌ها معمولاً بزرگ‌ترین اشتباهات ناشی از بی‌ثباتی بایاس می‌باشد که پیامد آن بیشترین مقدار خطا در اندازه گیری که همان میزان سرعت زاویه ای می‌باشد است. (که بر حسب deg/h برای خطای رانش بایاس ژیروسکوپ[1] و پایداری عامل مقیاس[2])که معمولاً با عنوان یک قسمت در میلیون واحد ppm حس شده مقدار اینرسی بیان می‌شود. ناوبر هر چقدر کوچک‌تر، کیفیت بهتر و دقت بیشتری داشته باشد با ارزش‌تر خواهد بود [۳].

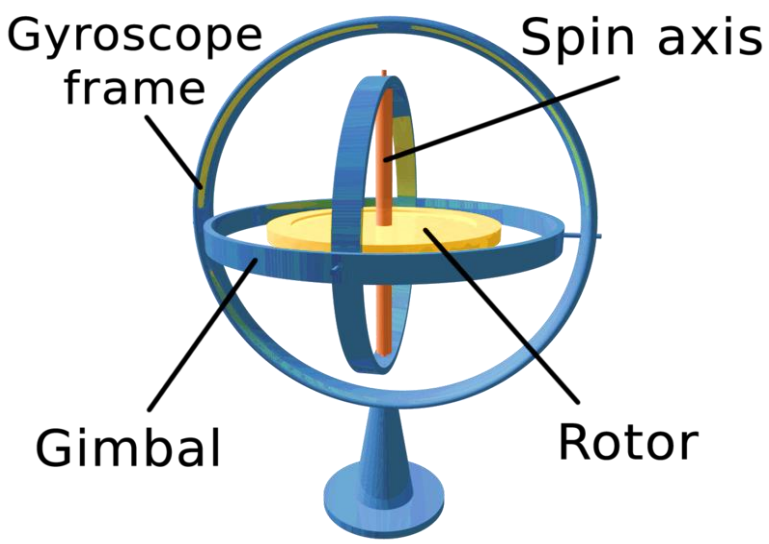
در سال‌های اخیر، در تشخیص لختی سه فناوری عمده به پیشرفت‌های قابل توجهی در برنامه‌های نظامی و تجاری منجر شده است. این ۳ دسته عبارتند از:ژیروسکوپ‌های لیزری حلقوی[3] (از سال ۱۹۷۵)، ژیروسکوپ‌های فیبر نوری[4] (از سال ۱۹۸۵) و MEMS (از سال ۱۹۹۵)

۱-۳ انواع ژیروسکوپ

۱-۳-۱ ژیروسکوپ مکانیکی

طبق اصل بقای اندازه حرکت زاویه ای، هر جسم در حال چرخش متقارن، سعی دارد جهت خود را همواره در فضا حفظ کند؛ لذا اگر یک جسم متقارن با وزن زیاد را با سرعت بالا بچرخانیم و اطراف آن را با یاتاقان و بلبرینگ آزاد بگذاریم تا نیروهای خارجی بر آن اعمال نشود، با چرخش قاب سیستم، جهت چرخش جسم دوار تغییر نمی‌کند؛ بنابراین می‌توانیم بدین وسیله در اجسام متحرک، جهت ثابتی داشته باشیم که وضعیت فعلی خود را در هر لحظه با آن مقایسه نماییم و موقعیت زاویه ای و نیز با محاسبه سرعت تغییر، سرعت زاویه ای را به دست آوریم.

[1] Gyroscope bias drift
[2] Scale factor stability
[3] Ring LASER Gyro(RLG)
[4] Fiber optic Gyro(FOG)



شکل ۱-۱: ژیروسکوپ مکانیکی

عضو اصلی ژیروسکوپ های مکانیکی، یک دستگاه دوار یا روتور (rotor) است که معمولاً با سرعت زیاد حول محور تقارن خود دوران می‌کند. این سرعت از ۳۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ دور در دقیقه است؛ بنابراین در اثر اینرسی جرم دوار، اندازه حرکت (ممنتوم) نسبتاً بزرگی ایجاد می‌شود. اگر یاتاقان بندی محور چرخش را در طوقه ای معلق تعبیه کنیم، به طوری که گشتاور خارجی به آن وارد نشود، با وجود تمام حرکت‌های قاب، محور چرخش روتور همواره در جهت ثابتی می‌ماند و موقعیت خود را در فضا حفظ می‌کند. با این روش می‌توان جهت و یا محورهای ثابتی را برای وسیله نقلیه تعریف کرد که هر گونه حرکت زاویه ای نسبت به این محورها سنجیده می‌شود.

۱-۳-۲ ژیروسکوپ‌های نوری

۱-۳-۲-۱ ژیروسکوپ‌های حلقوی لیزری RLG

ژیروسکوپ‌های حلقوی لیزری RLG اگرچه اولین بار به صورت یک ساختار مربعی در سال ۱۹۶۳ به نمایش در آمد، ولی اولین بار در سال ۱۹۸۰ وارد بازار شدند. ژیروسکوپ‌های مکانیکی در آن زمان بازار را در اختیار خود داشتند و RLG ها چون یک سیستم ایده‌آل برای دینامیک بالا و بدون اجزای متحرک بودند در شرایط سخت مورد استفاده قرار می‌گرفت، برای سیستم‌های نظامی مورد نیاز بودند. RLGها در فاکتور مقیاس

بسیار پایدار و خطی می‌باشند، همچنین حساسیت ناچیز به شتاب، خروجی دیجیتال، راه اندازی سریع، ثبات بسیار عالی در سراسر محدوده کاری و اینکه اجزای متحرک ندارد از مزایای این ژیروسکوپ‌ها می‌باشد. امروزه RLG ها به عنوان یک فناوری بالغ در نظر گرفته می‌شوند و پیشرفت‌ها در جهت کاهش قیمت به نسبت افزایش کارایی می‌باشد [۴-۶]

۱-۳-۲-۲ ژیروسکوپ‌های فیبر نوری FOG

ژیروسکوپ‌های مبتنی بر فیبر نوری نیز یک فناوری بالغ و رشد یافته می‌باشد و به عنوان یک جایگزین ارزان قیمت برای RLG محسوب می‌شود. امروزه RLG ها در زمینه هزینه ساخت و به همین ترتیب کارایی جایگاه بالایی بدست آورده است. که از این جهت امتیاز ویژه ایی در مجموعه نظامی و کاربردهای تجاری پیدا کرده است[۷, ۸] . مطالعات، زمینه ایی را فراهم ساخته که نشان می‌دهد پیشرفت در المان‌های نوری حالت جامد و فناوری فیبر نوری می‌تواند کارایی این سنسورها را تا دقت deg/h ۰.۰۰۱ در حالت کوچک سازی شده به پیش ببرد.

در سال ۱۹۷۶ در دانشگاه یوتا[1] امکان سنجی IFOG [2] ها نشان داده شد، هنگامی که الگوی تداخل اثر ساگناک از نوری که فیبر نوری را در جهت عقربه‌های ساعت و خلاف عقربه‌های ساعت می‌پیماید تشخیص داده شد. فواید IFOG که آن را نسبت به RLGچیره ساخته است این است که نیاز به منبع نور با ولتاژ بسیار زیاد نداریم (منبع نور با پهنای بالا مانع پراکندگی به عقب[3] می‌شود بنابراین هیچ وابستگی به میزان ورودی کم وجود ندارد) که این یک پتانسیل بسیار خوب جهت هزینه‌های پایین‌تر و وزن سبک‌تر می‌باشد[۳].

به خاطر وجود زیر بنای اجزایی که به طور خاص برای RLG ها ساخته شده است، IFOG ها هنوز جای RLG ها را نگرفته است [۹]. به هر حال IFOG ها به پیشرفت خود ادامه می‌دهند تا بازار را از آن خود کنند.

[1] Utah
[2] Interferometric Fiber Optic Gyro
[3] Backscatter

FOG های معمول دارای یک حلقه فیبر نوری به قطر ۵ سانتی‌متر برای کاربردهای با رتبه بندی تـاکتیکی[۱] مورد استفاده قرار می‌گیرند.

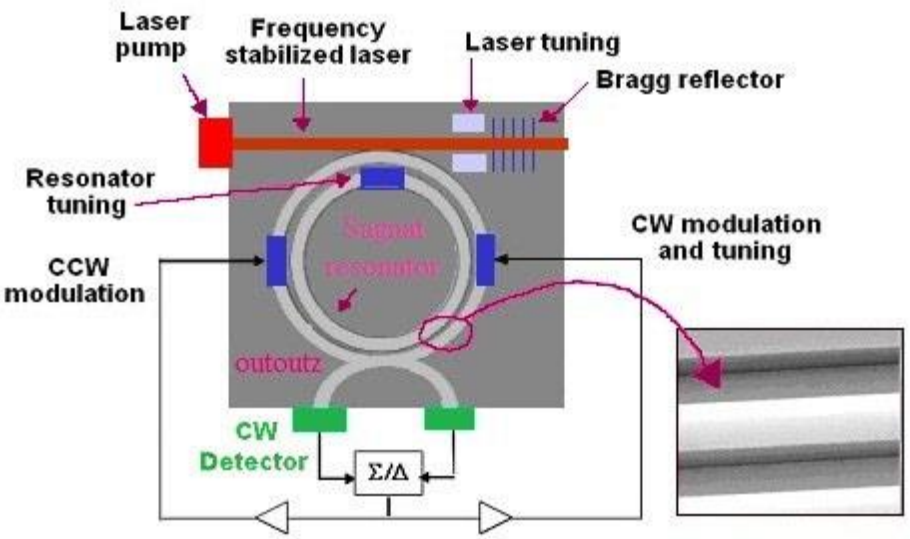
با کمک محققین در زمینه تداخل سنجی[۲]، تداخل سنج‌های FOG به رقابت با فناوری RLG در کاربردهـای دقت بالا، هدف گیری دقیق تلسکوپ‌ها، سیستم‌های عکس برداری و آنتن‌ها یا برای سیسـتم‌هـای راهبـردی اندازه گیری درجه در زیر دریایی‌ها با یک قیمت معقول و مناسب با پارامترهـای :پایـداری کمتـر از $\deg/h$ ۰.۰۰۰۳، ARW[۳] کمتر از $\deg/\sqrt{h}$ ۰.۰۰۰۰۸فاکتور خطای درجه‌بندی کوچک‌تر از ppm ۰.۵ [۷].

پژوهش در زمینه FOG ها و به طور مشابه در RLG ها، با هدف کاهش اندازه و هزینـه‌هـای تولیـد در یـک سطح تقریباً ثابت از عملکرد می‌باشـد. پیشـرفت در زمینـه FOG بـر پایـه دسـتاوردهای صـنعت مخـابراتی می‌باشد [۵]. مهم‌ترین کشف در این زمینه، پیدایش فیبرهای فوتونیک کریستالی[۴] PCF می‌باشـد، کـه قـدم خیلی مهمی در ساخت ابزار IFOG به حساب می‌آید. معرفـی فوتونیـک کریسـتال‌هـا در کاربردهـای IFOG فواید چشمگیری در بر داشت مانند: کاهش تلفات خمش[۵]، کاهش اندازه فیبر در مقایسه با فیبرهای معمول، کاهش قطر کویل فیبر نوری [۱۰].

۱-۳-۲-۳ ژیروسکوپ مدار مجتمع نوری

گام بعدی در کوچک سازی FOG ها، ایجاد مدار مجتمع نوری است، کـه شـامل منبـع نـور و آشـکار سـاز و مدولاتور به صورت یک‌پارچه است. در این مرحله، مشکلات تکنولوژیکی مربوط به پاشـندگی وجـود دارد. بـا گذر از ابزار اندازه گیری نوری و ورود به حوضه MEMS مدارات مجتمع نوری ارزش خود را نشان می‌دهنـد، که با نان ژیروسکوپ نوری بر روی یک تراشه نامیده می‌شوند. IOG یک ژیروسکوپ است که بـر اسـاس اثـر ساگناک و با ترکیب فناوری MEMS وبا امکانات ارائه شده توسط مدارات مجتمع نوری کار می‌کند.

[1] Tactical
[2] Interferometry
[3] Angular Random Walk
[4] Photonic Crystal Fiber
[5] Bending Loss



شکل ۱-۲ ژیروسکوپ مدار مجتمع نوری IOG [۱۱]

تمام اجزای یک IOG و موجبر آن را از نمای نزدیک بر روی یک تراشه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، دو پرتو از نور در جهت مخالف، حول حلقه رزونانسی در گردشند. برای رسیدن به کلاس دقت (۰.۰۱ deg/h و ۰.۰۱ $grad/\sqrt{h}$ ARW) IOG باید دارای تلفات موجبر کمتر ۰.۰۰۱ dB/cm باشد. جهت گیری پژوهش‌های انجام شده در زمینه IOG در یافتن راه‌های رسیدن به نور آهسته می‌باشد. مطالعات برای رسیدن به این منظور در حال انجام است [۱۲, ۱۳].

در سال ۱۹۸۰، ژیروسکوپ رزونانس نیم کره[1] توسعه یافت، یک ژیروسکوپ ارتعاشی با کارایی بالا، یک سنسور از جنس سیلیکای خالص[2] به شکل نیم‌کره که با یک فیلم نازک فلزی پوشیده شده است. HRG بسیار سبک کوچک و بدون اجزای متحرک و عمر آن محدود به اجزای الکترونیکی آن می‌باشد [۱۱].

MEMS ۳-۳-۱

این سنسورها برای اولین بار با کاهش اندازه قابل توجه ولی با کاهش بسیار زیاد عملکرد در صنایع نظامی[3] ارائه شدند. (مانند جنگ افزارهای هدایت شونده، UAV، برنامه های تاکتیکی که نیاز به یک سطح پایین‌تر از عملکرد ناوبری لخت دارند، سنسورهای کوچک لخت) MEMS,NEMS با مزایایی (مانند اندازه کوچک،

[1] Hemipherical Resonant Gyro
[2] Fused-silica
[3] Storm military applications

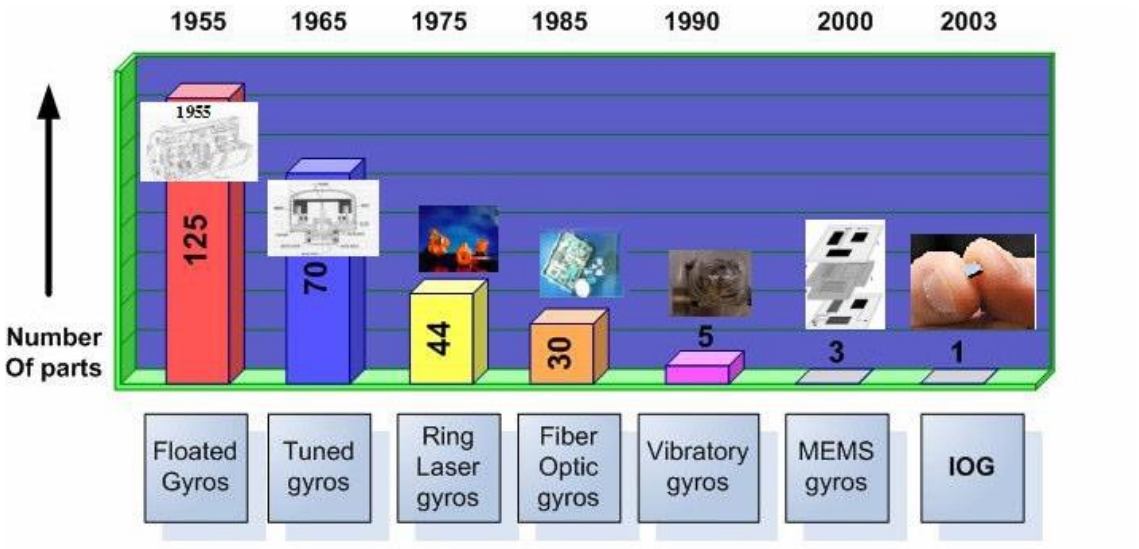
استحکام شدید، کم هزینه و وزن بسیار کم) جهت پیشرفت برنامه‌های جدید و کاربردی که به سرعت در بازار به دست می‌آید بسیار مطلوب می‌باشد.

روند تکامل ژیروسکوپ‌ها در نشان می‌دهد که چگونه اصول فیزیکی و تعداد اجزای دستگاه‌ها میکرو مکانیکی در طول زمان دست‌خوش تغییر شده است [۴, ۹].

۱-۳-۳-۱ سنسورهای اتم سرد[1]

علاوه بر فناوری‌هایی که در بالا ذکر شد، یک فناوری دیگر نوید دهنده، بر اساس تداخل اتمی در حال توسعه بسیار سریع می‌باشد.

تداخل اتمی به تازگی به دنیا آمده و ظهور آن به اواخر دهه ۸۰ میلادی برمی‌گردد، و از آغاز یک فناوری با چشم انداز روشن به حساب می‌آمد. این فناوری مبتنی بر کنترل اتم‌های سرد است، اتم‌ها که یک میلیونیم درجه بالاتر از صفر مطلق تولید شده، و پس از آن با استفاده از تکنولوژی لیزر به دام می‌افتند .



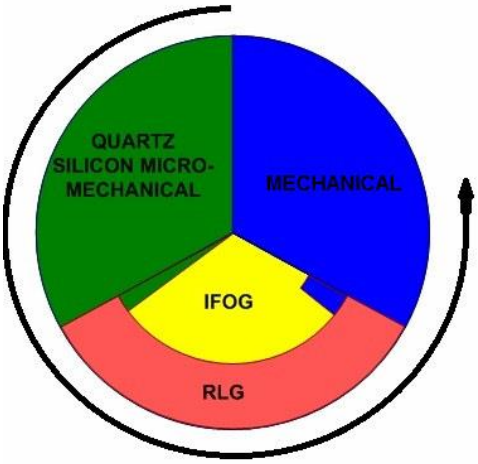
شکل ۱-۳: روند تکاملی فناوری ژیروسکوپ

تداخل اتمی در اصل به تداخل نوری بسیار شبیه است، با این تفاوت که امواج نوری جای خود را امواج مادی داده‌اند.

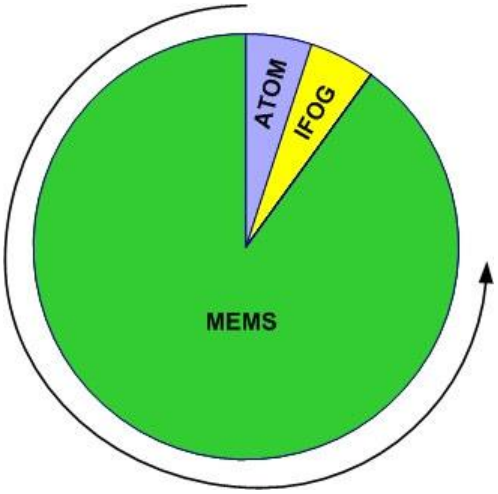
[1] Cold Atom Sensors

۱-۴ روند جاری در برنامه‌های کاربردی فناوری ژیروسکوپ

شکل ۱-۴ نشان دهنده شماتیک روند فعلی استفاده از فناوری ژیروسکوپ در کوتاه مدت است .در حالی که شکل ۱-۵ نشانگر مروری بر استفاده از فناوری‌های ژیروسکوپ در دراز مدت و در برنامه‌های کاربردی جدید است.توجه داشته باشید که فناوری مدار مجتمع نوری و MEMS طیف کاملی از برنامه‌های کاربردی با کارایی متوسط و کم را در بر خواهند گرفت. به هر حال، جایگزینی فناوری MEMS مشروط به بهبود عملکرد، افزایش ایمنی و کاهش قیمت می‌باشد [۳, ۹].



شکل ۱-۴: استفاده از فناوری ژیروسکوپ- مروری کلی از فناوری‌های مورد استفاده در حال حاضر و در آینده‌ای نزدیک[۱]



شکل ۱-۵: استفاده از فناوری ژیروسکوپ در دراز مدت [۱]

فصل دوم

بررسی منابع