٤٧٨٢٧

دانشگاه تهران

دانشکده فنی

مرکز اطلاعات مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

طراحی شتاب سنج MEMS

نگارش : علی ابوالقاسمی آزاد

۱۳۸۲/۸/۲۰

استاد راهنما : دکتر محمد محجوب جهرمی
استاد مشاور : دکتر منصور نیکخواه بهرامی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در
مهندسی مکانیک - طراحی کابردی

مهر ماه ۱۳۸۲

مرکز اطلاعات مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

٤٧٨٤٧

بنام خدا

دانشگاه تهران

دانشکده: فنـــــی

گروه آموزشی مکانیک

گواهی دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

هیات داوران پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم : علی ابوالقاسمی آزاد
در رشته:.....مکانیک .....گرایش: طراحی کاربردی
با عنوان : طراحی شتاب سنج MEMS
را در تاریخ ۸۲/۷/۱۵ .

با نمره نهایی :

به عدد	به حروف
۱۸/۵	هیجده و نیم

و درجه : کارشناسی ارشد ارزیابی نمود.

عالی

ردیف	مشخصات هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا موسسه	امضاء
۱	استاد راهنما استاد راهنمای دوم(حسب مورد):	محمد محجوب	استادیار	تهران	
۲	استاد مشاور	منصور نیکخواه	استاد	تهران	
۳	استاد مدعو (یا استاد مشاور دوم)	ناصر سلطانی	دانشیار	تهران	
۴	استاد مدعو	شمس الدین میاجرزاده	دانشیار	تهران	
۵	نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی گروه آموزشی:	نصرالله تابنده	دانشیار	تهران	

تذکر : این برگه پس از تکمیل توسط هیات داوران در ابتدای صفحه پایان نامه درج می گردد

دانشکده فنی دانشگاه تهران
تحصیلات تکمیلی

تقدیم به :

مادرم که مایه برکت زندگی من است

و

پدر عزیزم

چکیده

طراحی شتاب سنج بر مبنای فناوری میکرو ماشینکاری موضوع این پایان نامه می باشد. از میان انواع مبدلهای موجود در این مقیاس از نوع خازنی آن بهره برده ایم. جنس شتاب سنج پلی سیلیکان است. طراحی انجام شده بر مبنای محدودیتهای ابعادی موجود در روش ساخت *MUMPs* (که یک روش ماشینکاری سطحی پلی سیلیکان است)، صورت گرفته است. روش فوق به دلیل استاندارد بودن روش و محدودیتهای آن، انتخاب شده است. طرح و شکل فیزیکی حسگر طرح و شکل هندسی شتاب سنج را از مقاله ای که شتاب سنج خود را بر مبنای ماشینکاری سطحی پلی سیلیکان طراحی کرده، با اندکی تغییر در زبانه های بازخورد قرض گرفته ایم. پارامترهای حسگر برای رسیدن به مشخصات شتاب سنج با کاربرد در ناوبری خودروها، بدست آمده است. برای رسیدن به پهنای باند مورد نیاز و افزایش پایداری سیستم از مدار کنترلی بازخورد استفاده کرده ایم. این مدار بازخورد معمولاً به فنر با سختی منفی تعبیر می شود. در تحلیل و فرموله کردن شتاب سنج آنرا با یک سیستم جرم و فنر و دمپر مدل کرده ایم. سختی فنر در طرح شتاب سنج را از روش تحلیلی بدست آورده ایم و صحت آنرا با شبیه سازی المان محدود سنجیده ایم. رابطه ای برای جرم مؤثر فنر یو شکل نیز بدست آورده ایم. در طراحی خود را به طراحی شکل فیزیکی حسگر محدود کرده ایم. این طراحی در حقیقت یک حداقل سازی مقید است. تابع هدف ما در این حداقل سازی عکس حساسیت شتاب سنج بوده است. در نهایت نیز مشخصاتی چون حساسیت به محور عرضی، فرکانس تشدید، و مقاومت در برابر شوک مکانیکی را با نرم افزار تحلیل المان محدود (*ANSYS*) بدست آورده ایم. در پایان نیز پارامترهای عملکرد شتاب سنج را ارائه کرده ایم.

۱- مقدمه ---------- ۱
۱-۱- مقدمه ---------- ۱
۱-۲- تاریخچه ریز سیستمهای الکترومکانیکی ---------- ۲
۱-۳- موقعیت سیستمهای میکرو الکترو مکانیکی در بازار و تحقیقات ---------- ۳
۱-٤- وضعیت ریز سیستمهای حسگرهای اینرسی در حال و آینده ---------- ٥
۱-٥- طبقه بندی حسگرهای اینرسی ---------- ۷
۱-٥-۱- طبقه بندی بر اساس فرآیند ساخت ---------- ۷
۱-۱-٥-۱- ماشینکاری حجمی ---------- ۷
۱-۱-٥-۱- ماشینکاری سطحی ---------- ۷
۱-٥-۱- طبقه بندی بر اساس برداشت سیگنال ---------- ۸
۱-۲-٥-۱- برداشت سیگنال پیزو مقاومتی ---------- ۸
۱-۲-٥-۱- برداشت سیگنال پیزو الکتریکی ---------- ۸
۱-۳-٥-۱- برداشت سیگنال خازنی ---------- ۸
۱-٤-٥-۱- برداشت سیگنال بوسیله المان تشدیدی ---------- ۹
۱-٦- انگیزه انجام کار ---------- ۹
۱-۷- ساختار پایان نامه ---------- ۱۰
۲- سابقه تحقیق ---------- ۱۲
۲-۱- مقدمه ---------- ۱۲
۲-۲- مروری بر مقالات ---------- ۱۲
۳- تئوری ---------- ۲٦
۳-۱-مقدمه ---------- ۲۷
۳-۲- شتاب سنجهای پیزو مقاومتی ---------- ۲۸
۳-۲-۱-پیزومقاومت ---------- ۲۸
۳-۲-۲-شتاب سنج پیزو مقاومتی ---------- ۳۰
۳-۲-۲-۱- طراحی تیر ---------- ۳۳
۳-۲-۲-۲- طراحی چهار-تیر ---------- ۳٤
۳-۳-شتاب سنجهای ارتعاشی ---------- ۳٤
۳-۳-۱-فرکانس تشدید ---------- ۳٤
۳-٤-شتاب سنجهای خازنی ---------- ۳۷
۳-٤-۱- شکل کلی آشکار سازهای خازنی ---------- ۳۸

۱-۱-٤-۳- شکل شانه جانبی ---------- ۳۸
۲-۱-٤-۳- شکل شانه محوری ---------- ٤۰
۳-۱-٤-۳- ساختار صفحات موازی ---------- ٤۱
۲-٤-۳-مدار الکتریکی آشکار ساز خازنی ---------- ٤۲
٥-۳- شتاب سنجهای حرارتی ---------- ٤۳
٤- طراحی شتاب سنج ---------- ٤٥
۱-٤- مقدمه ---------- ٤٦
۲-٤- ساختار مکانیکی شتاب سنج ---------- ٤۷
۳-٤- مدار کنترلی شتاب سنج ---------- ٤۸
٤-٤- پارامترهای عملکرد شتاب سنج ---------- ٤۹
۱-٤-٤- مدل سختی فنر ---------- ٥۰
۲-٤-٤- استهلاک ---------- ٥٤
۳-٤-٤- جرم مؤثر ---------- ٥٦
٤-٤-٤- حداقل شتاب قابل اندازه گیری ---------- ٥۹
٥-٤-٤- حداکثر شتاب قبل اندازه گیری ---------- ٦۱
٦-٤-٤- حساسیت ---------- ٦۲
۷-٤-٤- نیرو در زبانه های بازخورد ---------- ٦۳
۸-٤-٤- حساسیت عرضی ---------- ٦٥
۹-٤-٤- پهنای باند ---------- ٦٦
۱۰-٤-٤- پایداری الکترواستاتیک ---------- ٦۸
٥-٤- طراحی ---------- ۷۰
۱-٥-٤- متغیرهای طراحی ---------- ۷۰
۲-٥-٤- قیود هندسی ---------- ۷۲
۳-٥-٤- قیود عملکردی ---------- ۷۲
٤-٥-٤- الگوریتم طراحی ---------- ۷۳
٦-٤- تحلیل نتایج با شبیه سازی المان محدود ---------- ۷٤
۱-٦-٤-تحلیل سختی فنر ---------- ۷٤
۲-٦-٤- تحلیل حساسیت عرضی ---------- ۷۷
۳-٦-٤- تحلیل شوک مکانیکی ---------- ۷۸
٤-٦-٤- تحلیل فرکانسهای تشدید ---------- ۸۰
۷-٤- خصوصیات شتاب سنج طراحی شده ---------- ۸۱

۸-٤- خاتمه ---------- ۸۱
٥- خاتمه ---------- ۸۲
فهرست مراجع ---------- ۸٤
پیوست ---------- ۸۸

فصل اول

مقدمه

۱ – ۱ – مقدمه

استفاده از ریز حسگرها[۱] برای سنجش فشار، شتاب، سرعت زاویه ای و جریان سیال بطور فزاینده ای گسترش یافته است زیرا فن آوری میکروماشینکاری کما بیش رشد کافی داشته است. این حسگرها درگستره وسیعی از جمله در خودروها، کنترل فرآیند ، در حوزه پزشکی و ابزار آلات علمی مورد استفاده قرار گرفته اند. مطالعات بازار نشان می دهد که در سالهای آینده نیاز به این حسگرها رشد زیادی خواهد داشت.

هزینه تولید یک فشار سنج به زیر یک دلار کاهش یافته است. برای شتاب سنجها نیز چنین روندی را انتظار داریم. فن آوری ساخت این ریز حسگرها برگرفته ازفناوری ساخت مدارهای مجتمع می باشد که قیمت هر قطعه به شدت وابسته به تعداد قطعات تولیدی است. این روش تولید را ''فرآیند گروهی[۲]'' می نامند که تعداد زیادی از قطعات در یک زمان تولید می شوند . اساسا سیلیکان با تکنیکهای حکاکی[۳]، لایه گذاری[۴] و پیوند لایه ای[۵] ماشینکاری می شود . امروزه این روش ماشینکاری ''ریز ماشینکاری سیلیکان[۶]'' نامیده میشود. ریزماشینکاری سیلیکان روشی مطمئن است، که دلیل دیگری برای موفقیت تجاری ریز حسگرها می باشد.

اساس کار حسگرهای مکانیکی (مگر رده خاصی از جریان سنجها) مبتنی بر تغییر شکل مکانیکی ساختمان حسگر می باشد(مانند خمش ورق یا تیری که از آن جرمی آویزان است). این تغییر شکل سپس به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می شود.

اتفاقاً سیلیکان یک ماده بسیار مناسب برای حسگرهای مکانیکی میباشد واین به دلیل خواص مکانیکی واقعاً شگفت آور آن است. برای حسگرها یک خصیصه لازم قابلیت تعمیم سیگنال است وبرای حسگرهای مکانیکی این بدان معناست که تحت دو بار مساوی به یک صورت تغییر شکل پیدا کند.

بنابراین ماده مورد نیاز نباید هیسترزیس[۷] مکانیکی داشته باشد ، همچنین خزش نیز نباید داشته باشد . هیسترزیس به علت تسلیم مواد است، یا به عبارت دیگرحاصل از تغییر شکل پلاستیک می باشد. سیلیکان قبل از تغییر شکل پلاستیک می شکند، حداقل در دمای اتاق. در حقیقت تنشی که درآن سیلیکان می شکند بطور محسوسی بیشتر از تنش تسلیم فولاد است:با این دید سیلیکان قویترین

۱– micro sensors
۲– batch processing
۳–etching
۴– film deposition
۵– wa fer bonding
۶– silicon micromachining
۷– hysteresis

فنزاست . این بدان معنی نیست که سیلیکان برفولاد درهمه سازه ها برتری دارد . این خاصیت سیلیکان -تردی- برای حسگرها امتیازی است: اگر حسگر بیش ازحددرگذاری شود ،می شکند و دیگر کار نمیکند،بجای اینکه سیگنال اشتباه بدهد.

خاصیت مهم دیگربرای تعمیم پذیری تغییر شکل مکانیکی خزش ست. این خاصیت در همه مواد دیده میشود و آن تغییر شکل مداوم تحت بار ثابت خارجی است. این پدیده حتی اگربارب اندازه کافی کوچک باشد که کرنش از حد تسلیم تجاوز نکند رخ می دهد . این فرآیندی است که دقایقی یا حتی ممکن است ساعتها طول بکشد . یک سیلیکان تک کریستال بهترین مواد با توجه به این خاصیت است . میزان خزش به شکل هندسی نمونه بستگی دارد . مطالعات بت[2] نشان داد که خزش سیلیکون و دیگر مواد برای تیرهای نازک بسیار جدی است .

۲-۱- تاریخچه ریزسیستمهای الکترومکانیکی[1]

نکته ای که در اینجا لازم به ذکر است این است که لیست زیر یک لیست کامل از مسیر تحولات ریز سیستمها نیست بلکه یک آشنایی اجمالی با سیر تحولات دانش مست که به امروزه منجر به ساخت این سیستمها شده است [۱] :

۱۹۵۷	ساخت اولین موتور الکترواستاتیکی
؟	کشف سیلیکان
۱۹۲۷	آشکارشدن خاصیت ترانزیستور اثر میدان
۱۹۴۷	اختراع ترانزیستور
۱۹۵۴	انتشار مقاله[3] : «خاصیت پیزو مقاومتی در ژرمانیوم و سیلیکان»
۱۹۵۸	عرضه سیلیکاهای کرنش سنج به بازار
۱۹۶۱	ساخت اولین فشار سنج سیلیکانی
۱۹۶۷	اختراع ماشینکاری سطحی
۱۹۷۰	ساخت اولین شتاب سنج سیلیکانی
۱۹۷۷	ساخت اولین فشار سنج خازنی

۱ –Microelectromechanical systems ۲ – Bethe (1989)

۳ – Smith .C.S."Piezoresistive effect in Germanium and Silicon Physical Reviwe",94.1.April 1954

۱۹۸۰	انتشار مقاله[۱] : «آینه اسکن کننده پیچشی سیلیکانی»
۱۹۸۱	ساخت میدل فشار خون برای عرضه در بازار
۱۹۸٤	اولین وسیله میکرو ماشینکاری پلی سیلیکانی[۲]
۱۹۸۸	ساخت موتورهای دوار با تحریک جانبی[۳]
۱۹۸۹	محرک شانهای جانبی[٤]
۱۹۹۱	اتصال پلی سیلیکانی[٥]
۱۹۹۲	شبکه تنظیم نور[٦]
۱۹۹۲	آغاز پروسه MUMPS توسط مرکز MCNC
۱۹۹۳	فروش اولین شتاب سنج ماشیکاری سطحی[۷]
۱۹۹٤	استفاده از XeF_2 برای سیتمهای میکرو الکترونیکی
۱۹۹٤	ابداع پروسه بوش برای حکاکی عمیق با یون واکنشگر[۸]
۱۹۹٥	بلوغ سیستمهای بیو الکترومکانیکی[۹]
۲۰۰۰	توسعه تجاری خرید و فروش سوئیچهای فیبری MEMS

۳-۱- موقعیت سیستمهای میکرو الکترو مکانیکی در بازار و تحقیقات

تکنولوژی ساخت وسایل در ابعاد میکرون که بر اساس ساخت مدار مجتمع بنا شده است . کاربردهای گستردهای در جهان یافته است. یکی از موفقترین این وسایل فشارسنج است که فروش آن از سه ملیون در سال ۱۹۸۳ به ۵۰ میلیون در سال ۱۹۹۵ رسیده است . شتاب سنجها بعد از وسایل اندازه گیری فشار رده بعدی را در رشد و توسعه به خود اختصاص داده اند.

در ایالات متحده دولت این کشور ۲۰ میلیون دلار در سال صرف تحقیقات در زمینه های مختلف این صنعت می کند. این رقم در مقایسه با کشور آلمان که در سال ۷۰ میلیون دلار برای تحقیق در این حوزه مصرف می کند خیلی مهم به نظر نمی رسد. یکی دیگر از کشورهای پیشرو در این زمینه.

۱-Petersen,K.E."Silicon Torsional Scanning Mirror" IBM J.R&D . v24 . p631 .1980

۲-Howe . Muller ۳-Fan,Tai,Muller ٤-Lateral comb drive(Tang,Nguyen,Howe)

٥-Pister,Judy,Burgett,Fearing ٦-Solgaard,Sandejas,Bloom ۷-Analog Devices, ADXL50

۸-Deep Reactive Ion Etching ۹-Bio-MEMS

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

کشور ژاپن است؛ آژانس دولتی MITI در این کشور بین سالهای ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۶ مبلغی حدود ۲۰۰ میلیون دلار صرف تحقیقات بر روی MEMS کرده است[۲].

این فناوری می رود تا جای خود را در تمام زمینه ها باز کند. جدول زیر این رشد را بین سالهای ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۵ به تصویر می کشد [۲] :

سال	۱۹۸۰	۱۹۸۵	۱۹۹۰	۱۹۹۵
تعداد سازمانهای تجاری فعال	۳	۵	۱۰	۳۲
تعداد شرکتهای جنگ های MEMS	۳	۵	۶	۱۱
تعداد شرکتهای جنگ های الکترو مکانی	۰	۰	۱	۳
تعداد شرکتهای سیستمهای MEMS غیر جنگ	۰	۰	۴	۱۸
تعداد مراکز فعال دانشگاهی R&D	۲	۲	۱	۳
کارمندان تجاری	۱۳۰	۱۶۰	۴۲۰	۹۹۰
فروش	$۹M	$۱۱M	$۳۵M	$۱۰۰M
فروش شرکتهای جنگ ساز	$۹M	$۱۱M	$۳۳M	$۱۰۰M
فروش شرکتهای سازنده سیستمهای غیر جنگ	۰	۰	$۳M	$۱۰M
تعداد کل فروش به هر کارمند	$۶۹M	$۶۹M	$۸۳M	$۱۱۷M
کمترین فروش به کارمند	$۷۰M	$۷۵M	$۹۵M	$۱۳۵M

جدول (۱-۱) : رشد سازمانهای تجارت سیستمهای میکرو الکترو مکانیکی سیلیکنی

پیش بینی هایی برای رشد فروش انواع این ریزسیستمها وجود دارد. در جدول صفحه بعد نمونه ای از آن آورده شده است[۲] :

سال	۱۹۹۵	۲۰۰۵
حسگرهای فشار سنج	$۱/۰B	$۲/۵B
حسگرهای نیرویی	$۰/۴B	$۰/۸B
کنترلر های مسائل	$۰/۰۱B	$۰/۱B
ذخیره کننده های اطلاعات	$۰/۰B	$۱/۰B
نمایشگرها	$۰/۰B	$۱/۰B
پیو تراشه ها	$۰/۰B	$۰/۲B
ارتباطات	$۰/۰۱B	$۱/۰B
جمع کل ریز سیستمها	$۱/۴۵B	$۶/۷B
جمع کل ریز سیستمهای غیر حسگر	$۰/۰۵B	$۳/۴B

جدول (۲-۱) : پیش بینی بریزک (Bryzek) از فروش ریز سیستمها

مزایای این ریز سیستمها و به تبع آن کاربرد وسیع آنها باعث شده است که مراکز زیادی در این زمینه به فعالیت و تحقیق بپردازند؛ برای آگاهی بیشتر در این زمینه به مرجع [۲] مراجعه کنید. زمینه استفاده از این سیستمها روز به روز گسترش می یابد؛ از کاربردهای پزشکی، کیسه هوا و سیستمهای حفظ پایداری در خودرو ها، صنایع پزشکی ، تا ناوبری و صنایع نظامی. همچین برای درک جایگاه این سیستمها در صنایع نظامی و حجم کارهایی که کشورهای مختلف در رابطه با این وسایل انجام می دهند می توان به مرجع [۳] مراجعه کرد.

٤-١- وضعیت ریز سیستمهای حسگرهای اینرسی در حال و آینده

به دلیل پایان جنگ سرد تعداد سیستمهای جنگی که د رآینده تولید خواهد شد، خیلی مشخص نیست. ولی حرکت عمومی از سیستمهای راهبردی بزرگ به سوی سیستمهای نظامی کوچکتر و محصولات نظامی با کاربرد تجاری می باشد. که این یعنی بازار بزرگ و احتیاج به سیستمهای اینرسی با قیمت پایین دارد.

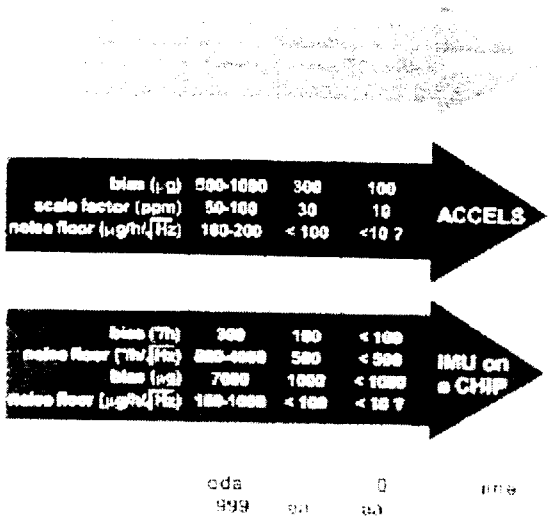
در حال حاضر پایداری بایاس[۱] شتاب سنجهای میکرو الکترومکانیکی بین ۱۰ (ug) تا ۱۰۰۰۰ (ug) و پایداری ضریب-مقیاس[۲] آنها بین ۱ (ppm) تا ۱۰۰۰ (ppm)[۳] می باشد در حالی که برای شتاب سنجهای مکانیکی موجود پایداری بایاس بین چند صدم تا ۱۰ (ug) و پایداری ضریب-مقیاس از چند صدم تا ۱۰ (ppm) می باشد. اما انتظار می رود در سال ۲۰۰۵ به یک INS[٤] میکرو مکانیکی با ابعاد $2\,in^3$ با کارآیی هدایت پرواز برای چند دقیقه برسیم[٤]. به نظر می رسد که این سیستمها تا سال ۲۰۲۰ برای کاربرد در موشکهای اتمی دقت لازم را پیدا نکنند. اصولاً قیمت یک شتاب سنج مکانیکی در برابرقیمت یک موشک دوربرد یا میانبرد خیلی محسوس نیست لذا کاربرد اصلی آنها در خودرو سازی، موشکهای کوچک و غیره می باشد.

شکل (۱-۱) یک پیش بینی برای حسگرهای اینرسی میکروالکترومکانیکی در رابطه با سه پارامتر ضریب-مقیاس ، بایاس و اغتشاش را ارائه می کند[٥]. این سه پارامتر برای قضاوت درباره صحت کارکرد سیستم بررسی می شود. از این شکل برای کوتاه مدت دو نتیجه بدست می آید. اول اینکه حسگرها نسبت به IMU[٥] بر روی تراشه[٦] به صحت بالاتری می رسد. این مسئله یعنی

۱-Bias stability ۲-Scale-factor stability ۳-part per million

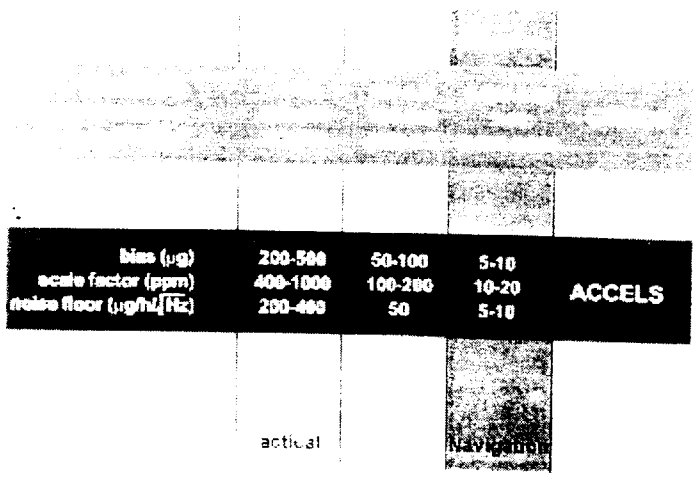
٤-Inertial navigation system ٥-Inertial mesurement unit ٦-IMU-on-a-chip

صحت کارکرد بستگی به ابعاد سیستم دارد. دوم اینکه،این نوع IMU ها با اهداف نظامی تا سال ۲۰۰۹ محقق خواهد شد ولی برای اهداف ناوبری پاسخ منفی است.



شکل (۱-۱) : تحدس از دقت حسگرهای اینرسی تا سال ۲۰۰۹

شکل (۲-۱) برای داشتن درک بهتر از دقت مورد نیاز برای کاربردهای نظامی و ناوبری به ما کمک می کند[۵].



شکل (۲-۱) : دقت مورد نیاز حسگرهای اینرسی برای کاربردهای نظامی و ناوبری