



دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

عنوان

طراحی و شبیه سازی یک سیستم کنترلی برای ژيروسکوپ در ابعاد MEMS

استاد راهنما

دکتر احمد قنبری

استاد مشاور

دکتر جعفر کیقبادی

پژوهشگر

محمد رضا مقنی باویل علیائی

بهمن ماه ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نام خانوادگی دانشجو: مقنی باویل علیایی	نام: محمد رضا
عنوان پایان نامه: طراحی و شبیه سازی یک سیستم کنترلی برای ژيروسکوپ در ابعاد MEMS	
استاد راهنما: آقای دکتر احمد قنبری استاد مشاور: آقای دکتر جعفر کیقبادی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: طراحی کاربردی دانشگاه: تبریز دانشکده: فنی مهندسی مکانیک تاریخ فراغت از تحصیل: ۹۰/۱۱/۱۸	
کلید واژه‌ها: ژيروسکوپ MEMS، کنترل مود لغزشی، کنترل فازی، تخمین پارامتر	
<p>چکیده:</p> <p>ژيروسکوپها از دیرباز نقش بسیار مهمی را در جهت‌یابی و اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای در جهات گوناگون، در صنایع مختلف بر عهده داشته‌اند. با توجه به پیشرفت سریع علوم و فناوریهای نوین و توسعه صنایع مختلف، استفاده از وسایل جدید برای اندازه‌گیری با دقت بالا در جهات مختلف برای خودروها و هواپیماها امری ضروری است.</p> <p>از پیدایش اولین ژيروسکوپ میکرو الکترومکانیکی بیش از دو دهه نمی‌گذرد، اما ویژگی‌های بارز این نوع ژيروسکوپ اعم از عدم نیاز به یاتاقان و در نتیجه اصطکاک، سایش و اتلاف انرژی کمتر، قیمت ارزان، مصرف توان پایین و دقت و سرعت بالا، آن را در بسیاری از موارد نسبت به ژيروسکوپهای مرسوم رجحان داده است. با این حال، به دلیل وجود عیوب در ساخت آن، خطاهای ناشی از تغییرات دما و نویزهای گوناگون، خطاهایی در نتایج عملکرد ژيروسکوپ میکرو الکترومکانیکی وجود دارند. در این میان هر طرح کنترلی که در کمترین زمان و با دقت و کارایی بهتری بتواند عملکرد ژيروسکوپ را کنترل کند، مطلوب است.</p> <p>در این پایان نامه، پس از مطالعه ادبیات فن (پیشینه پژوهش کار دیگران)، دینامیک ژيروسکوپ در ابعاد MEMS مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس یک سیستم کنترلی برای ژيروسکوپ در ابعاد MEMS طراحی و ارائه خواهد شد. کنترلر ارائه شده برای ژيروسکوپ بایستی تخمین سرعت زاویه‌ای و (در صورت امکان) همه پارامترهای نامعلوم ژيروسکوپ شامل جفت شدگی های سفتی و میرایی را انجام دهد. شبیه سازی های عددی با استفاده از یک نرم افزار مهندسی (ترجیحا MATLAB) انجام خواهند شد.</p>	

تقدیم ہے:

پدر و مادر عزیزم

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د	فهرست جداول
ه	فهرست اشکال و نمودارها
ح	فهرست کلمات اختصاری
ط	مقدمه

فصل اول: بررسی منابع (پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش)

۱	مقدمه
۱-۱	ژیروسکوپ
۲-۱	فناوری سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی
۳-۱	ژیروسکوپ‌های میکرو الکترومکانیکی
۱-۳-۱	کاربردها
۲-۳-۱	ژیروسکوپ‌های ارتعاشی میکرو الکترومکانیکی
۴-۱	بررسی ادبیات فن در کنترل ژيروسکوپ ارتعاشی میکرو الکترومکانیکی
۱-۴-۱	نویز و کنترل

- ۱۲-۴-۱ کارکرد حلقه باز ۱۲
- ۱۳-۴-۱ کنترل نیرو-بالانس ۱۳
- ۱۵-۴-۱ کنترل تطبیقی ۱۵
- ۱۶-۴-۱ کنترل مود لغزشی فازی تطبیقی ۱۶
- ۲۱-۵-۱ هدف از تحقیق و بیان مساله ۲۱
- ۲۴-۶-۱ سهم عمده پایان نامه ۲۴
- ۲۴-۷-۱ ساختار پایان نامه ۲۴

فصل دوم: مواد و روشها

- ۲۷-مقدمه ۲۷
- ۲۸-۱-۲ مدلسازی و دینامیک ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS ۲۸
- ۳۴-۲-۲ استنتاج معادلات فضای حالت و فرضیات مسئله ۳۴
- ۳۷-۳-۲ طراحی کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی ۳۷
- ۴۲-۴-۲ طراحی کنترل کننده منطق فازی ۴۲
- ۴۹-۵-۲ شبیه سازی عددی ۴۹

فصل سوم: بحث و نتیجه گیری

مقدمه	۵۶
۱-۳ نتایج شبیه‌سازی عددی	۵۶
۲-۳ نتیجه گیری	۶۲
۳-۳ پیشنهادها و کارهای آتی	۶۳
مراجع	۶۴
پیوست الف- پدیده پایداری لیپانوف	۷۰
پیوست ب- کنترل تطبیقی	۷۷
پیوست ج- کنترل مود لغزشی	۸۲
پیوست د- کنترل منطق فازی	۸۸
مقالات انتشار یافته	۱۰۸

چکیده انگلیسی

صفحه عنوان انگلیسی

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۴۹	جدول ۱-۲: پایگاه قوانین AFSMC
۵۱	جدول ۲-۲: پارامترهای ژيروسکوپ MEMS

فهرست اشکال و نمودارها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: ژيروسکوپ گیمبال	۲
شکل ۲-۱: یک ویفر	۵
شکل ۳-۱: کاربردهای تجاری میکرو ماشینکاری سطحی	۵
شکل ۴-۱: محدوده کاربرد تکنولوژی ژيروسکوپهای امروزی	۷
شکل ۵-۱: کاربرد در خودروسازی	۸
شکل ۶-۱: (الف) یک طراحی ژيروسکوپ نوع اول (ب) تصویر SEM یک ژيروسکوپ نوع اول ...	۱۰
شکل ۷-۱: (الف) یک طراحی از ژيروسکوپ نوع دوم (ب) تصویر SEM یک ژيروسکوپ نوع دوم بدون تشدید	۱۰
شکل ۸-۱: دیاگرام بلوکی سیستم کنترل مود لغزشی فازی تطبیقی	۲۱
شکل ۱-۲: ساختار کلی کنترل کننده	۲۷
شکل ۲-۲: مدل دینامیکی ژيروسکوپ MEMS محور z	۲۹
شکل ۳-۲: نمایش شماتیک دستگاه ژيروسکوپ چرخان نسبت به دستگاه اینرسی	۳۰
شکل ۴-۲: نمایش بردار موقعیت نسبت به دستگاه اینرسی A و دستگاه چرخان B	۳۱
شکل ۵-۲: توابع سویچینگ (الف) مود لغزشی (ب) مود لغزشی با لایه مرزی (ج) مود لغزشی فازی	۴۵
شکل ۶-۲: تابع عضویت متغیر ورودی s	۴۷
شکل ۷-۲: تابع عضویت متغیر ورودی sdot	۴۷
شکل ۸-۲: تابع عضویت متغیر خروجی uf	۴۸
شکل ۹-۲: سطح کنترل فازی برای کنترل کننده طراحی شده	۵۰

- شکل ۲-۱۰: نمودار شبیه سازی شده در MATLAB/SIMULINK..... ۵۲
- شکل ۲-۱۱: زیرسیستم مدل دینامیکی ژيروسکوپ MEMS ۵۳
- شکل ۲-۱۲: زیرسیستم تخمینگر تطبیقی..... ۵۴
- شکل ۲-۱۳: زیرسیستم کنترل معادل مود لغزشی ۵۴
- شکل ۲-۱۴: زیرسیستم سطح لغزشی ۵۵
- شکل ۲-۱۵: زیرسیستم موتور استنتاج فازی AFSMC..... ۵۵
- شکل ۳-۱: خطاهای تعقیب با استفاده از کنترلر مود لغزشی-فازی-تطبیقی در جهات x و y..... ۵۷
- شکل ۳-۲: تخمین سرعت زاویه‌ای با استفاده از کنترلر AFSMC و ASMC ۵۸
- شکل ۳-۳: سطوح لغزشی کنترل کننده AFSMC ۵۹
- شکل ۳-۴: حاصل ضرب سطح لغزشی در نرخ آن ۵۹
- شکل ۳-۵: نیروی کنترلی کنترل کننده ASMC ۶۰
- شکل ۳-۶: نیروی کنترلی کنترل کننده AFSMC ۶۱
- شکل ۳-۷: تخمین پارامترها با کنترل کننده AFSMC..... ۶۲
- شکل الف-۱: حالات تعادل و مسیرهای نمایشگر..... ۷۴
- شکل الف-۲: توابع لیاپانوف با مشتقات منفی متفاوت ۷۷
- شکل ب-۱: دیاگرام بلوکی یک سیستم کنترل تطبیقی ۸۰
- شکل ج-۱: نمودار گرافیکی از کنترل مود لغزشی ۸۴
- شکل ج-۲: پدیده چترینگ یا ارتعاشات فرکانس بالا حول سطح لغزشی $s=0$ ۸۷
- شکل ج-۳: فرایندهای همگرایی در کنترل مود لغزشی ۸۸
- شکل د-۱: اعمال اصلی روی مجموعه فازی ۹۲
- شکل د-۲: یک فرایند تصمیم گیری فازی ساده..... ۹۶

- شکل د-۳: ساختار کلی یک کنترل کننده منطق فازی ۹۷
- شکل د-۴: پردازش منطق فازی در FLC ۹۹
- شکل د-۵: فرایند فازی سازی ۹۹
- شکل د-۶: فرایند تصمیم‌گیری فازی (ارزیابی قانون) ۱۰۱
- شکل د-۷: فرایند تصمیم‌گیری (ارزیابی قانون) در FLC ۱۰۳
- شکل د-۸: فرایند نافازی سازی ۱۰۴

فهرست کلمات اختصاری، علائم و نشانه‌ها

Hemispherical Resonator Gyroscope (HRG)	ژیروسکوپ تشدید کننده نیمکره‌ای
Tuning-Fork Gyroscope (TFG)	ژیروسکوپ دوشاخه‌ای
Fiber-Optic Gyroscope (FOG)	ژیروسکوپهای فایبر اپتیک
Ring Laser Gyroscope (RLG)	ژیروسکوپهای رینگ لیزر
Micro Electro Mechanical System (MEMS)	سیستم میکرو الکترومکانیکی
Inertial Navigation System (INS)	سیستم ناوبری اینرسی
Global Positioning System (GPS)	سیستم موقعیت‌یاب جهانی
Micromachined Vibratory Gyroscope (MVG)	ژیروسکوپ ارتعاشی میکرو الکترومکانیکی
Sliding Mode Control (SMC)	کنترل مود لغزشی
Generalized modus ponens (GMP)	روش تعمیم یافته پونز
Generalized modus tollens (GMT)	روش تعمیم یافته تولنز
Fuzzy Logic Control (FLC)	کنترل منطق فازی
Zero Rate Output (ZRO)	خروجی در نرخ صفر
Phase Locked Loop (PLL)	حلقه فاز قفل شده
Multi-Input Multi-Output (MIMO)	چند ورودی چند خروجی
Adaptive Force-Balancing Control (AFBC)	سیستم کنترل نیرو-بالانسینگ تطبیقی
Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control (AFSMC)	کنترل مود لغزشی فازی تطبیقی

مقدمه

ژیروسکوپها از دیرباز نقش بسیار مهمی را در جهت‌یابی و اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای در جهات گوناگون، در صنایع مختلف بر عهده داشته‌اند. با توجه به پیشرفت سریع علوم و فناوریهای نوین و توسعه صنایع مختلف، استفاده از وسایل جدید برای اندازه‌گیری دقت بالا در جهات مختلف برای خودروها و هواپیماها امری ضروری است.

از پیدایش اولین ژيروسکوپ میکرو الکترومکانیکی بیش از دو دهه نمی‌گذرد، اما ویژگی‌های بارز این نوع ژيروسکوپ اعم از عدم نیاز به یاتاقان و در نتیجه اصطکاک، سایش و اتلاف انرژی کمتر، قیمت ارزان، مصرف توان پایین و دقت و سرعت بالا، آن را در بسیاری از موارد نسبت به ژيروسکوپهای مرسوم رجحان داده است. با این حال، به دلیل وجود عیوب در ساخت آن، خطاهای ناشی از تغییرات دما و نویزهای گوناگون، خطاهایی در نتایج عملکرد ژيروسکوپ میکرو الکترومکانیکی وجود دارند. در این میان هر طرح کنترلی که در کمترین زمان و با دقت و کارایی بهتری بتواند عملکرد ژيروسکوپ را کنترل کند، گوی سبقت را از دیگران خواهد ربود.

در این پایان‌نامه، ابتدا در فصل اول به بررسی منابع و مطالعه ادبیات فن در ارتباط با ژيروسکوپ میکرو الکترومکانیکی می‌پردازیم و نقاط ضعف و قوت هر روش کنترلی را ذکر می‌کنیم. سپس در فصل دوم معادلات دینامیکی را از روی مدل ژيروسکوپ ارتعاشی میکرو الکترومکانیکی بدست آورده و سپس براساس پیشینه پژوهش صورت گرفته یک کنترل‌کننده پیشرفته‌ی هوشمند با عنوان کنترل‌کننده مود لغزشی فازی تطبیقی طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. در فصل سوم نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترل‌کننده طراحی شده روی مدل دینامیکی ژيروسکوپ ارائه و تحلیل می‌شوند.

فصل اول: بررسی منابع (پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش)

فصل اول

بررسی منابع (پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش)

مقدمه

در این فصل، ابتدا ژيروسکوپ، فرایند میکرو ماشینکاری و فناوری میکرو الکترومکانیکی^۱ به طور خلاصه تشریح می‌شوند. سپس انواع ژيروسکوپهای میکرو ماشینکاری شده، طبقه‌بندی و ارائه شده و کاربردهای ژيروسکوپ میکرو الکترومکانیکی را در صنعت و فناوری ذکر می‌کنیم. در قسمت ۱-۵ به بررسی پژوهشهای انجام یافته در کنترل ژيروسکوپ ارتعاشی میکرو الکترومکانیکی می‌پردازیم. در قسمت ۱-۶ به هدف از تحقیق و بیان مسئله پرداخته می‌شود. در نهایت در قسمت ۱-۷ سهم عمده پایان نامه مطرح شده و ساختار پایان نامه در قسمت ۱-۸ تشریح خواهد شد.

۱-۱ ژيروسکوپ

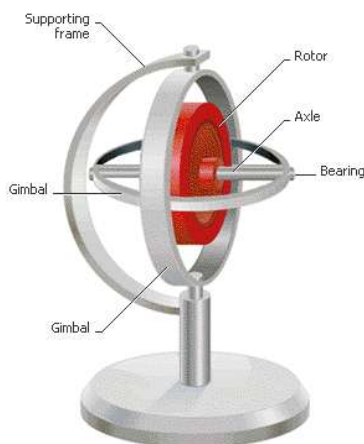
کلمه ژيروسکوپ^۲، برای اولین بار در سال ۱۸۵۲ توسط دانشمند فرانسوی به نام فوکالت^۳ ابداع شد. این کلمه ترکیبی از دو کلمه یونانی "gyros" به معنی چرخش و "skopien" به معنی «دیدن» است. بنابراین، یک ژيروسکوپ دستگاهی برای مشاهده چرخش است. اولین ژيروسکوپ، یک پاندول نوسانی بود که توسط فوکالت برای اثبات چرخش زمین ساخته شد و اولین مثال از ژيروسکوپ برای اندازه‌گیری زاویه مطلق بود [۱]. در طول قرن گذشته، ژيروسکوپ پیشرفته یک سری فرایندهای تکاملی را پشت سر گذاشته تا به ژيروسکوپهای موجود امروزی رسیده است. سابقه استفاده از ژيروسکوپها در کشتیرانی به اوایل قرن بیستم برمی‌گردد، زمانی که

¹ Micro-Electro-Mechanical Systems

² Gyroscope

³ Foucault

ژیروکامپس‌های^۴ اختراع شده توسط المر اسپری^۵، توسط دریانوردان برای هدایت کشتی در دریاهای آزاد استفاده شدند. در مقابل پاندولهای نوسانی، اولین ماکرو ژيروسکوپها دیسکهای بزرگ چرخانی بودند که به عنوان مراجع اینرسی به کار می‌رفتند و به وسیله آنها حالت‌ها تعیین می‌شدند. در دهه ۱۹۵۰، ژيروسکوپ گیمبال^۶ و سیستمهای شتابسنج برای احساس حرکت با شش درجه آزادی در سیستمهای هواپیما به کار رفتند [۲]. در این زمان، شرکت اسپری یکی از اولین ژيروسکوپهای نرخ زاویه‌ای را ساخت، که یک طراحی براساس پاسخ شاخه‌های یک دوشاخه‌ی^۷ مرتعش در مقیاس بزرگ به چرخشهای زاویه‌ای بود. به خاطر پیچیدگی و هزینه ساخت یک سیستم مرجع با حالت گیمبال، ایده سیستمهای چسبان (متصل)^۸، در دهه ۱۹۷۰ رواج یافت [۳].



شکل ۱-۱: ژيروسکوپ گیمبال

⁵ Elmer Sperry

⁷ Tuning Fork

⁸ Strapdown

^۴ نوعی قطب‌نما که همواره شمال حقیقی را نشان می‌دهد (gyrocompasses)

^۶ اسبابی که برای تراز نگه داشتن قطب‌نما و ژيروسکوپ به کار می‌رود. (gimbal)

بعد از کاربرد موفقیت آمیز ژيروسکوپ در هواپیماها، کارشناسان طراحی فضاپیماها از ژيروسکوپ برای جهت‌یابی در فضا استفاده کردند، زیرا جهت‌یابی در فضا کار ساده‌ای نبود و بایستی ابتدا دماغه فضاپیما با زاویه‌ی خاصی وارد جو زمین می‌شد. کارکرد ژيروسکوپ به صورت است که صفحه نگهدارنده ژيروسکوپ به همه طرف می‌چرخد ولی چرخ آن ثابت می‌ماند و سوزن تنها یک جهت ثابت را نشان می‌دهد. در واقع فضاپیما به هر طرف که بچرخد ژيروسکوپ همیشه همان جهتی را که باید نشان بدهد نشان می‌دهد. عملکرد ژيروسکوپ ربطی به میدان جاذبه یا میدان مغناطیسی زمان ندارد، بنابراین می‌توانستند از آن برای مرجع جهت‌یابی استفاده کنند.

همانگونه که گفته شد، ژيروسکوپهای اولیه، مانند ژيروسکوپ اسپری، و بسیاری از ژيروسکوپهای پیشرفته، از یک چرخ مومنتوم چرخان متصل به سازه گیمبال استفاده می‌کنند. با وجود این، این ژيروسکوپها معایب زیادی، عمدتاً مربوط به اصطکاک غلتشی (یاتاقانی) و سایش، دارند. ژيروسکوپهای ارتعاشی، مانند ژيروسکوپ تشدیدگر نیمکره‌ای^۹ و ژيروسکوپ دوشاخه‌ای^{۱۰}، راه حلی موثر برای مسائل یاتاقان و حذف قسمت‌های چرخان ارائه می‌دهند.

[۳].

همچنین، دیگر تکنولوژیهای با بازدهی بالا، مانند ژيروسکوپهای فایبر اپتیک^{۱۱} و ژيروسکوپهای رینگ لیزر^{۱۲} براساس اثر ساگناک توسعه یافته‌اند. با حذف مجازی همه محدودیتهای مکانیکی مانند ارتعاش، حساسیت به ضربه و اصطکاک، این ژيروسکوپهای اپتیکی کاربردهای زیادی با وجود هزینه‌های بالایشان پیدا کرده‌اند.

⁹ Hemispherical Resonator Gyroscope (HRG)

¹⁰ Tuning-Fork Gyroscope (TFG)

¹¹ Fiber-Optic Gyroscope (FOG)

¹² Ring Laser Gyroscope (RLG)

۲-۱ فناوری سیستمهای میکرو الکترومکانیکی

همانگونه که از خود کلمه برمی آید، سیستمهای میکرو الکترومکانیکی فناوری ای است که سیستمهای الکتریکی و مکانیکی را در مقیاس میکرو با هم ترکیب می کند. به طور عملی، هر دستگاهی که با استفاده از تکنیکهایی که اساس آنها فوتو-لیتوگرافی در مقیاس میکرومتر بوده و از هر دوی توابع الکتریکی و مکانیکی استفاده بکند، می-تواند تحت عنوان سیستمهای میکرو الکترومکانیکی مورد ملاحظه قرار گیرد. سیستمهای میکرو الکترومکانیکی عموماً به دستگاههایی اطلاق می شود که در مقیاس میلیمتر بوده و دارای دقت در مقیاس میکرو هستند.

همانگونه که از فناوریهای ساخت نیمه هادی ها نتیجه شده است، اساسی ترین خصوصیت فناوری سیستمهای میکرو الکترومکانیکی این است که در آنها امکان ساخت میکرو-ساختارهای متحرک روی یک زیرلایه فراهم می-شود. در واقع، سیستمهای میکرو الکترومکانیکی تلفیق المان های مکانیکی، حساسه ها، محرکه ها، و الکترونیک بر روی یک زیرلایه سیلیکونی معمولی با بهره گیری از فناوری ساخت میکرو^{۱۳} است. با وجود این توانایی سیستمهای مکانیکی و الکتریکی بی نهایت پیچیده می توانند ایجاد شوند. جرمها، خمیدگی ها، محرکه ها، ردیابها، اهرمها، اتصالات، دنده ها، میراگرها و بسیاری دیگر از کنده ساخت های^{۱۴} تابعی را می توان برای ساخت سیستمهای کاملاً پیچیده بر روی یک تراشه با هم ترکیب کرد. حساسه های اینرسی^{۱۵} مانند شتاب سنج ها وژیروسکوپ ها از این قابلیت برای کامل کردن خود استفاده می کنند. همچنین، از آنجاییکه یک سیستم کامل بر روی یک تراشه می-تواند واقعیت پیدا کند، سیستمهای میکرو الکترومکانیکی نوید این را می دهند تا با دستجات وسیعی از تولیدات همکاری داشته باشند [۴].

روشهای انتقال الگو، با اساس فوتو-لیتوگرافی، و الگوسازی متوالی لایه های ساختاری نازک، گرفته شده از فرایندهای ساخت IC استاندارد، فناوریهای توانمند بعد از میکرو ماشینکاری هستند. با کوچک کردن و طی فرایند بچ^{۱۶} سیستمهای الکترومکانیکی کامل، کاهش ذاتی در اندازه، وزن و هزینه وسیله قابل دستیابی است.

¹³ Micro-Fabrication

¹⁴ Building Block

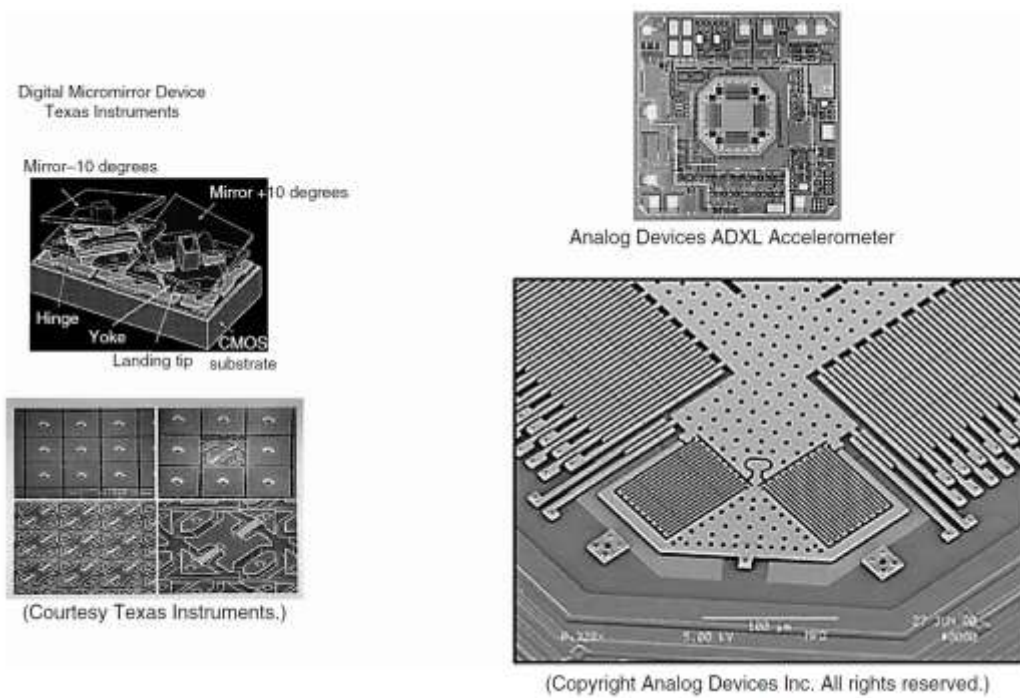
¹⁵ Inertial Sensors

¹⁶ Batch Processing



شکل ۱-۲: یک ویفر^{۱۷} ۱۵۰ میلیمتری از نمونه اولیه یک ژيروسکوپ. در یک فرایند تولید متداول،

معمولا بیش از ۲۰۰۰ وسیله^{۱۸} بر روی یک ویفر ۱۵۰ میلیمتری وجود دارد [۱]



شکل ۱-۳: کاربردهای تجاری میکرو ماشینکاری سطحی [۴]

¹⁷ Wafer

¹⁸ Device

۳-۱ ژيروسكوپهای ميكرو الكترومكانيكي

همانگونه كه گفته شد، ژيروسكوپها براي اندازه‌گيري چرخش زاويه‌اي در بسياري از كاربردها مورد استفاده قرار مي‌گيرند. در سرعتهاي بالا، ژيروسكوپها پايداري فوق‌العاده‌اي به تعادل از خود نشان مي‌دهند و جهت محور چرخش سرعت بالاي روتور مركزش را ننگه مي‌دارد. در چندين دهه گذشته، ژيروسكوپهاي متفاوت زيادي توسعه يافته‌اند. گرچه چرخ گردان مرسوم، ژيروسكوپهاي فايبر اپتيك و رينگ ليزر، كاربردهاي دقت بالا را به خود اختصاص داده‌اند، اما، اين ژيروسكوپها بزرگ بوده و اغلب خيلي گران هستند، به‌طوريكه نمي‌توان از آنها در بسياري از كاربردهاي نوين استفاده كرد.

پيشرفته‌هاي اخير در فناوري ميكرو ماشينكاري، طراحي و ساخت ژيروسكوپهاي ميكرو الكترومكانيكي را ممكن کرده است. يك ژيروسكوپ ميكرو الكترومكانيكي نوعي حسگر براي اندازه‌گيري نرخ زاويه است، كه اندازه آن چندين مرتبه كوچكتر از ژيروسكوپهاي مكانيكي است. ژيروسكوپهاي ميكرو الكترومكانيكي مي‌توانند به تعداد زيادي توسط فرايند بچ ساخته شوند. در مقايسه با ژيروسكوپهاي مكانيكي، اين ژيروسكوپها ارزان، كوچك و سبك بوده و در زمينه ابزارهاي اينرسي^{۱۹} قابليت كاربرد دارند [۵].

۱-۳-۱ كاربردها

همانگونه كه در شكل ۴-۱ نشان داده شده است، مشخصات بازدهي ژيروسكوپهاي با درجه ناوبري در مقايسه با ناوبري اينرسي و پايدارسازي سكو امروزه فقط با ژيروسكوپهاي مكانيكي بالک و ژيروسكوپهاي اپتيكي قابل دستيابي هستند. ژيروسكوپهاي MEMS، با عنوان ژيروسكوپهاي نرخ و انتگرالگيري در شكل ۴-۱ آورده شده‌اند.

¹⁹ Inertial Instruments