

# مروری بر سامانه‌های دینامیکی خودرو و کاربرد ریزچرخش سنج در آنها

محمد رضا سلوک<sup>۱</sup>، محمد حسن شجاعی فرد<sup>۲</sup>، مسعود دهمرده<sup>۳</sup> و \*

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم های دینامیکی، دانشکده خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۲</sup> رئیس دانشکده و پژوهشکده خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۳</sup> عضو هیئت علمی دانشکده خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران

\*مسئول مکاتبات: mdahmardeh@iust.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

ژیروسکوپ در خودرو  
ژیروسکوپ MEMS  
سامانه‌های دینامیکی خودرو  
شناسه‌های کارایی ژیروسکوپ  
ژیروسکوپ و خودرو  
نیاز به ژیروسکوپ

امروزه بسیاری از سامانه‌های گوناگون برای بالابردن کارایی و کیفیت خودروهای نوین بکار گرفته می‌شوند، که بیشتر آن‌ها در زمره رویکردهای فعال قرار دارند. پیاده‌سازی رویکرد فعال نیازمند بکارگیری حسگرهای مناسب است، ازین رو طراح باید به شناخت مناسبی در هر دو زمینه دست یابد. واپایش الکترونیکی پایداری، سامانه واپایش کشش و برنامه پایداری الکترونیکی از دسته این سامانه‌ها هستند. از دیدگاه مدلسازی در هر مدل ریاضی خودرو (یا سامانه‌های دینامیکی وابسته آن) هرگاه ورودی مدل شامل سرعت یا شتاب زاویه‌ای باشد، آنگاه برای پیاده سازی مدل نیاز به ژیروسکوپ خواهد بود. مقاله پیش‌رو نخست با معرفی سامانه‌های دینامیکی خودرو و بررسی برخی از مدل‌های متداول این سامانه‌ها، نخست جایگاه ژیروسکوپ در خودرو را بررسی می‌کند، سپس با معرفی و ارزیابی ژیروسکوپ‌های MEMS و شناسه‌های کارایی‌شان، بازه مناسب این شناسه‌ها را برای کاربرد در خودرو بدست می‌دهد. چارچوب کاری این مقاله برای پاسخ‌گویی به دو پرسش بنیادین نهاده شده است؛ نخست، چه سامانه‌های خودرویی نیازمند ژیروسکوپ هستند؟ دوم، برای این کاربردهای خودرویی چه نوع ژیروسکوپ‌هایی مناسب اند؟

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۷/۲۹  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۲۲

## ۱ مقدمه

ترمز ضد قفل<sup>۴</sup> (ABS) که نخستین بار در سال ۱۹۷۸ بر روی مرسدس بنز کلاس اس بسته شد [۶]، سرآغاز توسعه سامانه‌های پیشرفته ترمز بود و پایه‌ای برای واپایش ضد سریدن<sup>۵</sup> (ASC) بدل گردید. این سامانه نیروی طولی میان تایرها و جاده را چه در هنگام شتاب‌گیری و چه در ترمزگیری واپایش کرده و اجازه نمی‌دهد تا بار تایلر از حد لغزش (ظرفیت بار تایلر) که موجب ناپایداری خودرو می‌شود بگذرد [۷].

این سامانه برای این منظور از معادله‌هایی که در مهندسی خودرو معروف به دینامیک طولی خودرو است کمک می‌گیرند. همکاری مرسدس بنز و بی‌ام‌و در سال ۱۹۸۷ به ساخت سامانه واپایش کشش<sup>۶</sup> (TCS) انجامید، که بر واپایش کشش خودرو از راه تنظیم رانش موتور و اعمال ترمز پی‌ریزی شده، توانایی افزایش فرمان‌پذیری خودرو را حتی در مانورهای گریزی<sup>۷</sup> با ریسک سرخوردن بالا فراهم می‌کند. سپس میتسوبیشی با افزودن پایش زاویه فرمان، سامانه واپایش کشش خود را (TCL) نامید.

در ادامه این روند، سال‌های آغازین دهه نود میلادی بود که خودروسازها نخستین نسخه‌های سامانه واپایش پایداری را (که امروزه ESC نام دارد) تجاری‌سازی کردند. در سال ۱۹۹۵ روی مرسدس کلاس اس برنامه پایداری الکترونیکی<sup>۸</sup> بکار گرفته شد. بنابر گزارش اداره کل ایمنی بزرگراهی امریکا (NHTSA) با بکارگیری این سامانه می‌توان از رخداد بیش از یک سوم حادثه‌های خطر آفرین جلوگیری به عمل آورد [۸]. همچنین زانتین در گزارش

پیچیده‌شدن سامانه‌های خودرویی، بکارگیری رویکردهای فعال در بهبود کارکرد خودرو را رونق داده است. از آنجا که پیاده‌سازی رویکرد فعال نیازمند بکارگیری حسگرهای مناسب است، بنابراین طراح سامانه‌های دینامیکی خودرو باید از شناخت کافی در زمینه ژیروسکوپ و شناسه‌های کارایی آن برخوردار باشد. در مدلسازی‌های متداول خودرو و سامانه‌های دینامیکی وابسته (خواه خطی یا غیر خطی و با هر درجه از آزادی) معمولاً سه دسته متغیر مطرح است: پارامترهای ورودی، متغیرهای حالت و پارامترهای خروجی [۱].

در دینامیک خودرو، متغیرهای زاویه‌ای فضای حالت با سه‌تایی (Roll, Pitch, Yaw) و نرخ زمانی آن به صورت  $(p, q, r)$  نمایش داده می‌شود [۲]. هرگاه در معماری واپایشی سامانه‌های دینامیکی خودرو، یکی از متغیرهای زاویه‌ای فضای حالت در جایگاه ورودی جای گیرد، آنگاه برای پیاده‌سازی آن سامانه به ژیروسکوپ نیاز است. بسیاری از سامانه‌های دینامیکی خودرو از این دست اند.

واپایش پایداری خودرو<sup>۱</sup> (VSC) یک عبارت کلی برای همه سامانه‌هایی است که در خودروهای نوین کاربرد دارند. برای نمونه می‌توان واپایش الکترونیکی پایداری<sup>۲</sup> [۳]، تعلیق فعال [۴] یا گردش فعال<sup>۳</sup> را نام برد [۵].

<sup>۱</sup>Vehicle Stability Control <sup>۲</sup>Electronic Stability Control (ESC) <sup>۳</sup>Active Suspension /Active Cornering <sup>۴</sup>Anti Brak Lock <sup>۵</sup>Anti Skid Control <sup>۶</sup>Traction Control System <sup>۷</sup>Evasive <sup>۸</sup>Electronic Stability Program

## ۱.۲ برنامه پایداری الکترونیکی<sup>۱</sup> خودرو

برنامه پایداری الکترونیکی، یکی از مشهورترین سامانه‌های دینامیکی در خودروهای نوین است. از دید سینماتیکی هنگامی که قریب‌لک فرمان خودرو پیچانده شود، خودرو یک مسیر منحنی شکل را خواهد پیمود. هر چه مسیر پیمایش خودرو با منحنی پیچ جاده همخوانی بیشتری داشته باشد، آنگاه می‌توان گفت فرمان‌پذیری خودرو بهتر است (یا خودرو خوش فرمان‌تر است). معیار آکرمن یک معیار عمومی برای سنجش خوش فرمانی است. یکی از ایده‌هایی که برای خوش فرمان‌تر شدن خودرو بکار گرفته می‌شود، برنامه پایداری الکترونیکی خودرو است. بنیان این برنامه بر پایه بهبود شعاع حرکت خودرو به کمک واپایش کشش در محورهای خودرو است [۱۰]. الگوریتم این برنامه برای تخمین مداوم شعاع گردش دلخواه راننده از روی اندازه‌ی ورودی فرمان و واپایش دینامیک خودرو (از راه ترمزگیری برنامه‌ریزی شده است. در شکل ۲، الگوریتم یک برنامه پایداری الکترونیکی بر گرفته از [۱۰] نمایش داده شده است، که در آن شعاع دلخواه،  $R$  شعاع واقعی،  $L$  طول خودرو،  $V_x$  سرعت طولی خودرو،  $V$  سرعت خودرو،  $a_{CG}$  زاویه لغزش بدنه خودرو و  $ACC$  شتاب خودرو است. همانگونه که در گام سوم الگوریتم دیده می‌شود، دقت برنامه پایداری تابعی از حساسیت حسگر است. ازین رو انتخاب حسگرهای مناسب برای کارکرد درست این سامانه بسیار مهم است.

$$\begin{aligned} & \text{بر آورد شعاع دلخواه پیچ} & (1) \\ & R_m = \frac{L}{\delta}, \quad \delta: \text{زاویه ورودی فرمان} \\ & \text{بر آورد شعاع واقعی پیچ} & (2) \\ & R = \frac{V^2}{ACC} \begin{cases} V = V_x \cdot \cos(a_{CG}) \\ a_{CG} = \tan^{-1} \left( \frac{ACC_x}{ACC_y} \right) \end{cases} \\ & \text{حلقه شرط پایش} & (3) \\ & \text{اگر شعاع واقعی} > \text{حساسیت} * \text{شعاع دلخواه} \\ & \text{ترمز بر چرخ‌های جلو} \\ & \text{و اگر شعاع واقعی} < \text{حساسیت} * \text{شعاع دلخواه} \\ & \text{ترمز بر چرخ‌های عقب} \\ & \text{وگرنه} \\ & \text{کاری نکن} \\ & \text{سامانه مدام پایش شود} & (4) \end{aligned}$$

شکل ۲: الگوریتم برنامه پایداری الکترونیکی [۱۰] (برگردان به فارسی).

## ۲.۲ سامانه‌ی برنامه‌ریزی<sup>۲</sup> و پیروی راه<sup>۳</sup>

خودروی خودران، خودرویی است که در آن اختیار رانندگی به هوش‌ساختگی<sup>۴</sup> سپرده شده باشد. پس هوش‌ساختگی می‌باید از پس انجام همه وظایف رانندگی برآید. سه وظیفه‌ی اصلی برای رانندگی ایمن می‌توان برشمرد:

- تشخیص مرزهای جاده، حالت و جایگاه خودرو، و نیز هندسه و سینماتیک موانع<sup>۵</sup>، که همگی «تشخیص پیرامون» نامیده می‌شود،

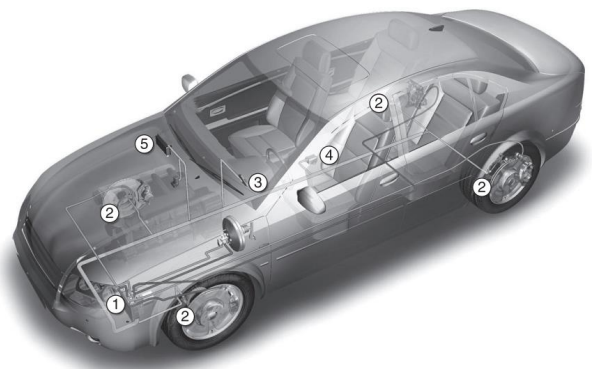
آزمون برنامه پایداری الکترونیکی شرکت بوش به صراحت اعلام داشت که این سامانه بهبود چشمگیری در فرمان‌پذیری خودرو دارد [۹]. ساختار کلی این مقاله بدین شرح است که نخست در جدول ۱ ده سامانه خودرویی که استعداد بالایی برای کاربرد ژيروسکوپ دارند، معرفی گردیده، سپس از آن میان چهار مورد بررسی تکمیلی شده است. در این بررسی مدل‌سازی، الگوریتم و بلوک دیاگرام‌های مفیدی برای پژوهشگران گردآوری شده است که هم به درک جایگاه ژيروسکوپ در سامانه‌های خودرویی کمک می‌کند و هم روندی از کارهای انجام شده پیشین را به نمایش می‌گذارد. در آخر باید توجه داشت که پوشش خط روند فناوری سامانه‌های خودرویی و ژيروسکوپ جدا از یکدیگرند.

بخش سوم به بررسی ژيروسکوپ‌های MEMS اختصاص دارد که با معرفی شناسه‌های کارایی ژيروسکوپ‌های ممزی دیجیتال بر پایه استاندارد IEEE یک واریسی تمام عیار از گرفتاری‌های کاربردی این سامانه‌ها بدست داده می‌شود. در پایان نیز گفتاری پیرامون بازه مناسب شناسه‌های ژيروسکوپ (یا ژيروسکوپ مناسب) برای کاربرد خودرویی بر پایه گزارش‌های بدست آمده از راه‌اندازی سامانه‌ها فراهم گشته. در فرجام این نوشته اندازه‌ی شناسه‌های کارایی چندی از ژيروسکوپ‌های بکار رفته برای پیاده‌سازی سامانه‌های معرفی شده بدست داده شده است.

## ۲ سامانه‌های دینامیکی خودرو

در بخش‌های پیش‌رو کوشش شده تا با بررسی نمونه‌هایی از کاربردهای عملی برای ژيروسکوپ در سامانه‌های واپایش پایداری خودرو، عبارت «کاربرد خودرویی» کنکاش گردیده و دسته‌بندی قابل قبولی برای کاربرد ژيروسکوپ در این سامانه‌ها ارائه شود. در این راستا جانمایی اعضای ESC تجاری‌سازی شده شرکت بوش نیز در شکل ۱ نمایش داده شده است. این بخش‌ها عبارتند از:

۱. بسته‌ی کنشگر و واپایشگر هیدرولیک،
۲. حسگر سرعت چرخ،
۳. حسگر زاویه فرمان،
۴. ژيروسکوپ،
۵. بخش ارتباط با ECU خودرو.



شکل ۱: جانمایی بخش‌های سامانه ESC شرکت بوش [۷]

<sup>1</sup>Electronic Stability Program

<sup>2</sup>Path Planning Systems

<sup>3</sup>Path Following

<sup>4</sup>Artificial Inteligent

<sup>5</sup>Obstacles

مستقیم از یگان سنجش لختی<sup>۷</sup> بهره برد. باید توجه داشت که به هرحال اندازه‌گیری نسبت به تخمین زدن، پسندیده‌تر است.

## ۵.۲ جمع‌بندی

در این بخش با کنکاش سامانه‌های دینامیکی خودرو، کوشیده شد تا «کاربرد خودرویی» کنکاش گردد. در این راستا نخست پنج سامانه به صورت تفکیکی همراه با معرفی الگوریتم‌ها و چیدمان معماری‌شان ارائه گردید، سپس استعداد بکارگیری ژيروسکوپ در آن‌ها کاویده شد. همانگونه که این بررسی نشان داد، برای پیاده‌سازی سامانه‌های دینامیکی متداول در خودروها، استعداد فراوانی در کاربرد ژيروسکوپ وجود دارد. چکیده بررسی سامانه‌های دینامیکی و ایمنی خودرو برپایه نیازمندی به حسگرهای لختی متناظر برای هرکدام در جدول ۱ نشان داده شده، این جدول با اندکی تصرف، از [۱۴] آورده شده است. بنابر داده‌های جدول ۱، نیاز گسترده به ژيروسکوپ در سامانه‌های دینامیکی و سامانه‌های ایمنی خودرو بسیار روشن است. تمامی ده سامانه نامبرده شده در این جدول برای پیاده‌سازی به ژيروسکوپ نیاز دارند.

یکی از نکات مورد توجه در زمینه‌ی سامانه‌های پایداری خودرو، ارتباط شماتیک‌وار بین حسگرها در این سامانه‌هاست. از آنجا که در خودروهای مدرن ترکیبی از سامانه‌های یاد شده بکاربرده می‌شود چگونگی معماری کلی سامانه مهم خواهد بود، معماری نمونه سامانه در شکل ۶ نمایش داده شده است [۱۵].

جدول ۱: سامانه‌های دینامیکی خودرو برگرفته از [۱۴] با اندکی تصرف.

کاربرد	شتاب‌سنج	ژيروسکوپ
آراینده کیسه هوا	$X, Y$	$Z$
وآپایشگر الکترونیکی پایداری	$X, Y$	$Z$
سامانه ترمز ضد قفل مدرن	$X$	$Z$
سامانه کمک‌فرمان خودرو	$X, Y$	$Z$
پایداری غلتش	$Y, Z$	$X, Z$
سامانه ناوبری	-	$Z$
ترمز الکترونیکی پارکینگ	$X$	$X$
پیروی مسیر	$X, Y$	$Z$
برنامه‌ریزی مسیر	$X, Y$	$Z$
وآپایشگر کروز	-	$Z$

## ۳ ژيروسکوپ MEMS

میز (MEMS) سرواژه «Micro Electro Mechanical Systems» است. سامانه‌ای که ابعادش از مرتبه یک میلیونوم متر است را گویند. از این رو شاید در فارسی بتوان «ریزسامانه» را همتا با واژه میمز دانست. در زمینه ریزحسگرها؛ شتاب‌سنج، فشارسنج، دماسنج، نیروسنج و ... در زمینه ریزکنشگرها؛ سوئیچ، بازایاب توان، پنکه، چرخنده، همزن و ... را می‌توان از پرکاربردترین ریزسامانه‌های صنعت برشمرد. ژيروسکوپ مهمترین حسگر لختی است، چرا که بدون واسطه سرعت زاویه‌ای چارچوب لختی (که مهمترین متغیر فضای حالت در دینامیک حرکت است) را بدست می‌دهد. استاندارد IEEE برای تعریف شناسه‌های کارکرد حسگرها<sup>۸</sup>، ژيروسکوپ را

۲. برنامه‌ریزی راه ایمن برای حرکت خودرو که در آن خودرو باید بتواند برای انتخاب راه تصمیم‌گیری کند،  
۳. اجرای فرامین و واپایش خودرو برای دنباله‌روی راه انتخاب شده در بخش پیش است.

برای تشخیص پیرامون، دوربین و رادارهای گوناگون بکار گرفته می‌شوند. در برخی از این دستگاه‌ها با کمک ژيروسکوپ افزایش دقت و کاهش نوفه انجام می‌شود [۱۱]. سامانه‌ی نمونه نشان‌داده شده در شکل ۳ که از [۱۲] آورده شده، نرخ یاو، چه در بلوک برنامه‌ریزی و چه در بلوک پیروی، پارامتر ورودی است و اگر نخواهیم برای بالا بردن ایمنی سخت‌گیری کنیم، برای پیاده‌سازی این نمونه، کم کم به یک ژيروسکوپ نیازمندیم. بدون شک برای کاربرد ژيروسکوپ در خودروهای خودران پهنه‌ی گسترده‌ای فراهم است.

## ۳.۲ سامانه‌ی کمک‌فرمان<sup>۱</sup> خودرو

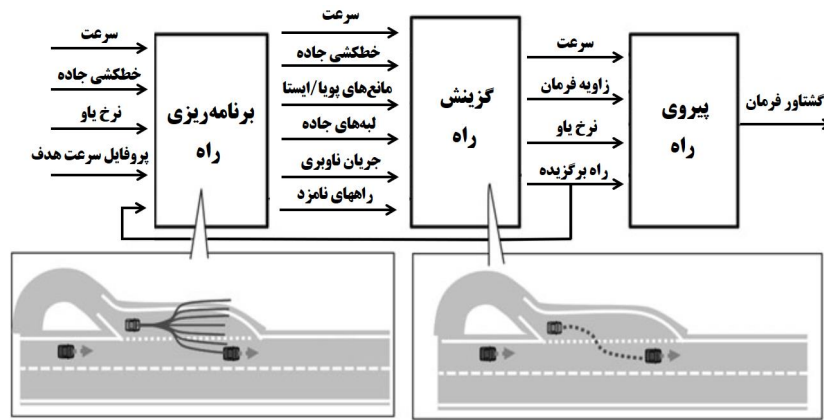
این سامانه بنا بر ادعای موجود در [۱۳] عبارت است از: سامانه‌ای که با ایجاد گشتاور جبرانی برای غلبه راننده بر گرایش بیش‌فرمانی به راننده کمک می‌کند تا خودرو به حالت خنثی<sup>۲</sup> (مطلوب) برگردد. این هدف با برآورد پیوسته بهره بیش‌فرمانی امکان‌پذیر می‌شود. همانگونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، این سامانه برای سنجش نرخ یاو به ژيروسکوپ نیاز دارد. قلب این سامانه، منطق فعالسازی آن است، چرا که باید بتواند زمان و چگونگی فعالسازی سامانه را برای شرایط اتفاقی کارکردی خودرو به درستی فراهم کند.

## ۴.۲ سامانه‌های پایداری غلتش<sup>۳</sup>

سامانه پایداری غلتش (جلوگیری از واژگونی<sup>۴</sup>) یکی از سامانه‌های فراگیر تجاری‌سازی شده در خودروهای سنگین است. البته برخی از خودروهای سواری نیز به این سامانه‌ها مجهز می‌شوند، اما از آنجا که رول در خودروهای با ارتفاع زیاد یا مفصل‌دار میزان ناپایداری را تشدید می‌کند، پس اهمیت آن در خودروهای سنگین بیشتر مطرح است [۴].

این سامانه‌ها با پایش و برآورد بارهای وارد شده بر جرم‌های فزبنندی شده، یا با بهره‌مندی از کنشگر<sup>۵</sup> برای ایجاد گشتاور جبران‌ساز به واپایش رول با هدف جلوگیری از چپ شدن خودرو می‌پردازند، یا مجهز به سازکاری برای هشدار به راننده نسبت به خطر واژگونی خودرو می‌باشند. در شکل ۵، همانگونه که دیده می‌شود، مدل ۱۴ درجه آزادی خودرو با بهره از یک الگوریتم عددی متغیرهای فضای حالت از جمله رول و یاو را تخمین زده و سپس با بهره از فیلتر کالمن گسترش‌یافته<sup>۶</sup> به کمک زاویه فرمان، اثر عرضی وزش باد را نیز برآورد کرده و حالت دینامیکی خودرو را مشخص می‌نماید [۴]. سپس حلقه واپایش درونی میزان گشتاور ایجاد کنشگرها را تعیین می‌کند و این‌گونه پایداری غلتشی خودرو فراهم می‌گردد. اگرچه در این نمونه برای بدست آوردن متغیرهای زاویه‌ای فضای حالت (یاو و رول) از تخمینگر بهره گرفته شده است، اما در پیاده‌سازی واقعی برای جلوگیری از افزایش بار محاسباتی که منجر به افزایش توان پردازشی می‌گردد، می‌توان به صورت

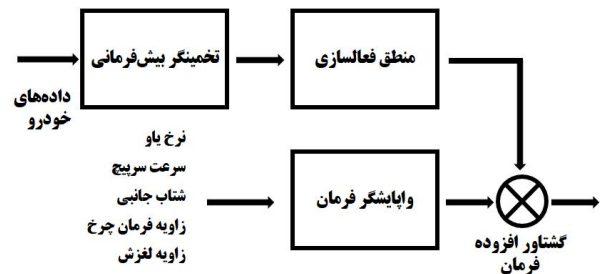
<sup>1</sup>Steering Asistant <sup>2</sup>Nutral <sup>3</sup>Roll Stability <sup>4</sup>Anti Roll-Over System <sup>5</sup>Actuator <sup>6</sup>Extended Kalman Filter <sup>7</sup>Inertial Measurement Unit <sup>8</sup>IEEE Standard for Sensor Performance Parameter Definitions



شکل ۳: یک نمونه از معماری یکپارچه برنامه‌ریزی، انتخاب و پیروی مسیر در خودروهای خودران [۱۲]. (برگردان به فارسی).

در سال ۲۰۰۲ آنالوگ دیوایز ژيروسکوپ دوطین‌گر ساخت. در سال ۲۰۰۳ آیر در رساله دکتری خود، اقدام به انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک میکرو-ژيروسکوپ سیموس غیرآرمانی کرد [۱۸]. در سال ۲۰۰۸ درپیر در قالب پایان‌نامه ارشد به مدل‌سازی یک ژيروسکوپ دندان‌شانه‌ای بر پایه دیمدولاتور<sup>۲</sup> فازی پرداخت [۱۹]. سال ۲۰۱۱ یونگ‌پنگ در سومین کنفرانس جهانی فناوری اندازه‌گیری و خودکار سازی مکترونیک<sup>۳</sup> مدل یک ژيروسکوپ دندان‌شانه‌ای خارج صفحه با میرایی لایه‌فشرده را ارائه کرد [۲۰]. در سال ۲۰۱۵ در کنفرانس ترنس‌دیسوسیر آلاسکا، فینگ ساختار تماما دی‌کوپله دندان‌شانه‌ای با دو طنین‌گر را ارائه داد [۲۱]. فوریه سال ۲۰۱۵ شیکل در آزمایشگاه ریزماشین دانشگاه ارواین کالیفرنیا ساختار دو-آونگی فوکو<sup>۴</sup> را گزارش داد و ادعا نمود که این ساختار کوچکترین ساختار ممکن برای ساخت یک ژيروسکوپ متوازن دینامیکی با مدل جرم توده‌ای<sup>۵</sup> است [۲۲]. در سال ۲۰۱۶ ژنگ و همکاران گونه‌ای از میکروژيروسکوپ چهارجرمی را در نشست جهانی سامانه‌ها و حسگرهای لختی<sup>۶</sup> معرفی کردند [۲۳]، سپس نمونه‌ای کارا از آن را ساخته و ارائه نمودند [۲۴].

این‌گونه تعریف می‌کند: «حسگری که سرعت چرخش جسم را بریکای (واحد) درجه بر ثانیه [dps] یا رادیان بر ثانیه [r/s] اندازه‌گیری کند» [۱۶]. دارپر، هانیول، آژانس پروژه‌های پژوهشی پیشرفته دفاعی امریکا، سازمان هوافضای بریتانیا و ... و شرکت‌های بزرگ (دایملر بنز، رابرت بوش، سامسونگ، آنالوگ دیوایس و ...) طرحواره‌ها و نمونه‌های بیشماری از ریز میکروژيروسکوپ گزارش داده‌اند. در ۱۹۹۱ آزمایشگاه دارپر<sup>۱</sup> ساخت نخستین میکروژيروسکوپ نوسانی را گزارش داد، این آزمایشگاه در سال ۱۹۹۳ در نسل دوم میکروژيروسکوپ‌های خود از ساختار خطی دندان‌شانه‌ای بهره جست [۱۷].



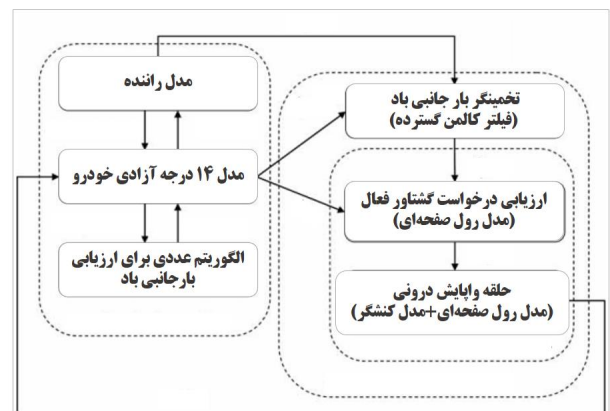
شکل ۴: بلوک دیاگرام سامانه کمک‌فرمان [۱۳]. (برگردان به فارسی)

### ۱.۳ دسته‌بندی

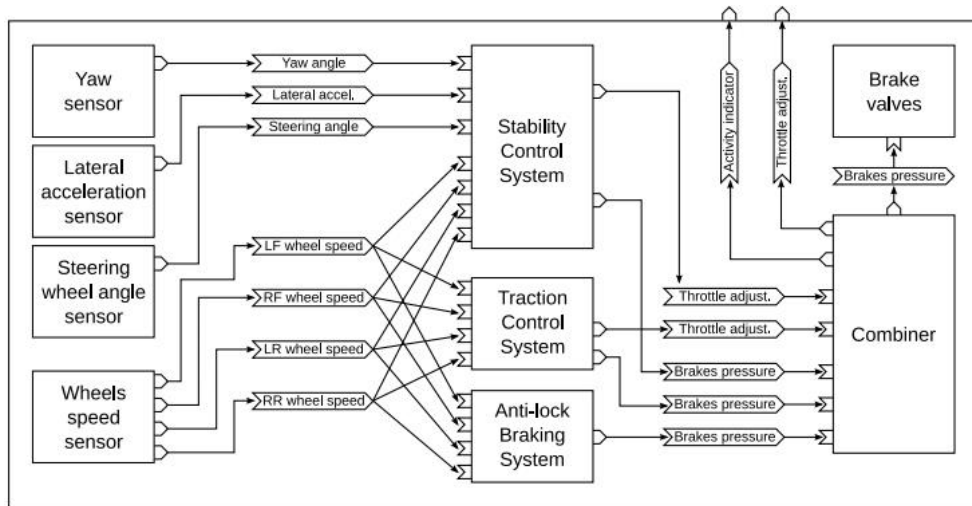
میکروژيروسکوپ‌های گوناگونی به صورت‌های (کوربولیسی / غیرکوربولیسی<sup>۷</sup>)، (صفحه‌ای / فضایی)، (یک درجه آزادی / چند درجه آزادی)، (پیچشی / گردشی / خطی) هستند. همچنین این اصل که سازوکار سنجش حسگر بر پایه گذار میان کدام پدیده‌ی فیزیکی (الکترواستاتیک / پیزوالکتریک / ترموالکتریک / پیزورزیستو) استوار است خود بر این گوناگونی‌ها می‌افزاید. با این پیش درآمد روشن است که دسته‌بندی‌های گوناگونی برای میکروژيروسکوپ‌ها وجود دارد، که در پیوست نماواره‌های مربوط به برخی از نمونه‌های ساخته شده گنجاده شده است. از دید ساختاری نیز ژيروسکوپ‌های کوربولیسی را می‌توان بر سه گونه دانست:

۱. رفت و برگشتی نوسانی (دندان‌شانه‌ای)

شکل ۵: نمونه‌ای از معماری کارکردی سامانه پایداری غلتش بهره‌مند از کنشگر برای ایجاد گشتاور جبران‌کننده [۴]. (برگردان به فارسی)



<sup>1</sup>Darper Lab <sup>2</sup>Demodulator <sup>3</sup>Measuring Technology & Mechatronics Automation 2011 <sup>4</sup>Dual Foucault pendulum (DFP) <sup>5</sup>Minimal Realization of dynamically balanced lumped mass <sup>6</sup>IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems <sup>7</sup>Levitation / Sagnac / RMOG / NMR



شکل ۶: معماری یکپارچه در خودروهای مدرن، که ارتباط شماتیک بخش‌های سامانه‌ها در این خودروها را نمایش می‌دهد [۱۵]

ژیروسکوپ‌ها است.

۲. گردش نوسانی (حلقه نوسانی‌گردشی/دیسک نوسانی‌گردشی)

۳. پیچشی نوسانی (آلاکنگی)

### ۲.۳ شناسه‌های کارایی ژيروسکوپ

برای مقایسه کارایی هر دستگاهی، یک سری شناسه تعریف می‌گردد که میزان کارایی آن دستگاه بر پایه چنین شناسه‌هایی سنجیده می‌شود. برای نمونه در یک خودرو زمان شتابگیری ۰ تا ۱۰۰، مصرف سوخت خودرو در ۱۰۰ کیلومتر، میزان شیروی و ... بخشی از شناسه‌های کارایی است. در ادامه برخی از شناسه‌های کارایی ژيروسکوپ بر پایه استاندارد شماره ۲۷۰۰ موسسه IEEE معرفی می‌گردد [۱۶]. در اینجا خاطر نشان می‌گردد که برخی از شناسه‌های کارایی بیش از یک نام داشته که حتی در متن استاندارد نیز این نکته گوشزد می‌گردد.

از این گذشته، ژيروسکوپ‌ها به دو رسته<sup>۱</sup> کلی تقسیم می‌شوند؛ رسته یک (که زاویه را می‌سنجند) و رسته دو (که نرخ زاویه‌ای را می‌سنجند) [۲۵]. بیشتر چرخش‌سنج‌های نوسانی لرزشی که تجاری‌سازی شده‌اند نرخ زاویه را می‌سنجند (رسته دو هستند).

از میان دسته‌بندی‌های ارائه شده، ژيروسکوپ‌های نوسانی به گستردگی تجاری‌سازی شده‌اند. این ژيروسکوپ‌ها ارزان بوده و توانسته‌اند سهم بیشتری در بازار خودرو پیدا کنند. پیکربندی عمومی ژيروسکوپ نوسانی برگرفته از [۱۷]، در شکل ۷ نمایش داده شده است.

زمان راه‌اندازی<sup>۴</sup> کمترین زمانی که از روشن کردن (تغذیه) حسگر باید بگذرد تا حسگر به دقت کافی در اندازه‌گیری برسد.

رزولوشن<sup>۵</sup> بزرگترین مقدار قابل اندازه‌گیری حاصل از کوچکترین تغییر در ورودی به ازای هر مقدار ورودی بزرگتر از سطح دقت.

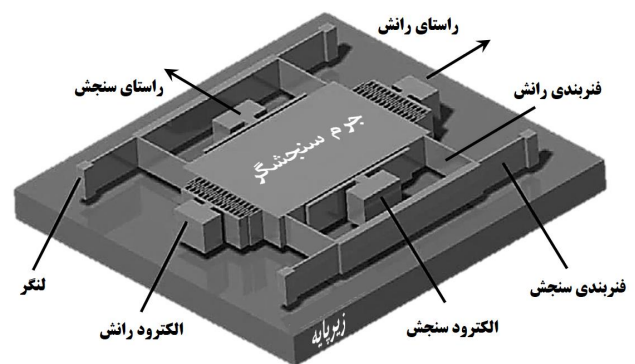
ستبری<sup>۶</sup> تاب و مقاومت حسگر در برابر ضربه و شوک مکانیکی را گویند. برد کاری<sup>۷</sup> بیشترین زاویه (یا نرخ زاویه‌ای) مثبت یا منفی (فارغ از جهت) که در حالت اشباع نشده سنجیده می‌شود.

پهنای باندها<sup>۸</sup> بازه‌ای از بسامدهای نرخ زاویه‌ی ورودی بر حسب هرتز که ژيروسکوپ توانایی سنجش آن‌ها را دارد.

بایاس<sup>۹</sup> (نرخ خروجی به صفر): اختلاف نرخ چرخش خروجی صفر بر حسب درجه بر ثانیه نسبت به مقدار قابل انتظار نرخ چرخش خروجی صفر در هر محور.

دقت کمترین تغییر قابل اندازه‌گیری در نرخ چرخش خروجی نسبت به ولتاژ ورودی که از «توان دو میانگین ریشه»<sup>۱۰</sup> محاسبه گردد.

طنین مکانیکی<sup>۱۱</sup> بسامد طنین مکانیکی ساختار یک حسگر بر حسب هرتز.



شکل ۷: پیکربندی ریز-ژیروسکوپ نوسانی [۱۷]. (برگردان به فارسی)

همانگونه که دیده می‌شود ژيروسکوپ نشان داده شده هم برای رانش<sup>۲</sup> و هم برای سنجش<sup>۳</sup> از پدیده فیزیکی الکترواستاتیک بهره می‌جوید. اندازه این ژيروسکوپ به گونه‌ای است که برای کاربرد خودرویی مناسب است. اندازه ژيروسکوپ نوسانی تولیدی شرکت اِس‌تی میکروالکترونیک از  $4/4 * 7/5$  میلی‌متر برای مدل  $33^0DL$  در سال ۲۰۰۹ به  $3 * 3$  میلی‌متر برای مدل  $L3GD20H$  در سال ۲۰۱۳ بهبود یافته است. قیمت مدل  $LSM33^0TR$  در ژانویه ۲۰۱۸ حدود ۲/۵ دلار آمریکا است که بسیار ارزاتر از دیگر

<sup>1</sup>Type <sup>2</sup>Drive <sup>3</sup>Sense <sup>4</sup>Start-up time <sup>5</sup>Resolution <sup>6</sup>Robustness <sup>7</sup>Operation Range <sup>8</sup>Band Width <sup>9</sup>Bias <sup>10</sup>Root Mean Square (rms) <sup>11</sup>Mechanical Resonance

### ۳.۳ جمع بندی

در این بخش نخست به بررسی و کنکاش گونه‌ها و دسته‌بندی ژيروسکوپ میزای پرداخته شد، سپس اقتصادی‌ترین گونه که در سامانه‌های دینامیکی خودرو پرکاربرد است (یعنی ژيروسکوپ کوریولیزی لرزشی (CVG) با سازوکار انگیزش و سنسجش الکترواستاتیکی)، معرفی شد و ساختار آن نمایش داده شد، سپس قیمت و ابعاد چند نمونه از محصولات بازار بررسی و در نهایت برخی از شناسه‌های کارایی مهم بر پایه استاندارد معرفی شد.

### ۴ نتیجه‌گیری

در پایان بازه شناسه‌های کارایی ژيروسکوپ مناسب برای کاربرد خودرویی را در سال جاری می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

رزولوشن ۵/۰ درجه بر ثانیه، دقت ۳/۰ ولت بر درجه بر ثانیه، حساسیت ۲۵۰ درجه بر ثانیه، بردکاری  $\pm 300$  درجه بر ثانیه، پهنای باند ۱۰۰ هرتز و نوفه کمتر از ۰/۱ درجه بر ثانیه بر ریشه هرتز، توانایی تاب ضربه ۱۰ هزار  $g$  در یک میلی ثانیه را داشته باشد. در نهایت دمای کاری یک ژيروسکوپ مناسب خودرو در بازه  $40 - 150$  درجه سانتیگراد برای جایابی در اتاق خودرو و تا  $125 +$  درجه سانتیگراد برای جایابی در زیر هود خودرو است.

در نهایت نگاهی به چشم‌انداز پیش‌روی ژيروسکوپ و خودرو، نشان می‌دهد که پژوهش‌ها در این زمینه بر چهار بخش تمرکز یافته‌اند. نخست ترکیب ساختارهای گوناگون در جهت‌های مختلف برای بدست آوردن حسگرهای چند سویه<sup>۲</sup> [۳۲]. بخش دوم بهینه‌سازی هندسی و ساختاری ژيروسکوپ با هدف کاهش اندازه و افزایش شناسه‌های کارکردی است [۳۳]. بخش سوم شامل طراحی و ساخت مدارهای دیمدولاتور مجهز به جبران‌ساز<sup>۴</sup> با هدف حذف نوفه‌های گرمایی و ... می‌شود [۳۴]. دربخش چهارم برخی از پژوهش‌ها پیرامون بکارگیری ترکیبی از حسگرهای گوناگون و بکار بستن روش‌های برهم‌نهی سیگنال<sup>۵</sup> برای کاهش و حذف خطای حسگرها انجام می‌گردد [۳۵].

### ۵ پیوست

در زیر تلاش شده که با ارائه نمودار، طرح‌واره و تصویر تا حد امکان مطالب و مفاهیم اشاره شده در متن، پیرامون ساختار و درجه آزادی (DOF) ژيروسکوپ برای خواننده گرمی تشریح گردد. همچنین چند تصویر از ریزژيروسکوپ‌های ساخته شده و متناظر با هر طرح‌واره یا نمودار ارائه شده است.

### مراجع

- [1] Rowell, Derek. State-space system representation of LTI systems. <http://web.mit.edu/2.14/www/Handouts/StateSpace.pdf>, 2002.
- [2] Mashadi, Behrooz and Crolla, David. *Vehicle powertrain systems*. Wiley, 2012.
- [3] Liebemann, EK, Meder, K, Schuh, J, and Nenninger, G. Safety and performance enhancement: The bosch electronic stability control (esp). tech. rep., SAE Technical Paper, 2004.
- [4] Braghin, Francesco, Cheli, Federico, Corradi, Roberto, Tomasini, GISELLA, and Sabbioni, Edoardo. Active anti-rollover system for heavy-duty road vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 46(S1):653-668, 2008.

در این بخش نخست به بررسی و کنکاش گونه‌ها و دسته‌بندی ژيروسکوپ میزای پرداخته شد، سپس اقتصادی‌ترین گونه که در سامانه‌های دینامیکی خودرو پرکاربرد است (یعنی ژيروسکوپ کوریولیزی لرزشی (CVG) با سازوکار انگیزش و سنسجش الکترواستاتیکی)، معرفی شد و ساختار آن نمایش داده شد، سپس قیمت و ابعاد چند نمونه از محصولات بازار بررسی و در نهایت برخی از شناسه‌های کارایی مهم بر پایه استاندارد معرفی شد.

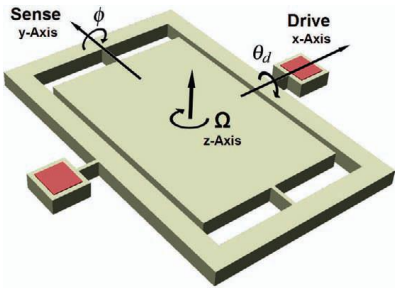
حساسیت و بهره هر سامانه وابسته به ساختار و معماریش است. پس برای انتخاب ژيروسکوپ مناسب هر کاربرد باید تحلیل حساسیت صورت گیرد. طراحی ژيروسکوپ‌ها نسبت به شتاب‌سنج و فشارسنج دست‌خوش چالش‌های فراوان‌تری است، چرا که معماری ساختاری آن‌ها از سرهمبندی دو سازوکار نوسانی ایجاد می‌شود که چنین ساختاری را خودکوک‌شو<sup>۱</sup> می‌نامند. پایین بودن دامنه نوسان راستای سنسجش (گاهی تا ۳ مرتبه) در ژيروسکوپ‌ها را می‌توان چالش دیگری نسبت به شتاب‌سنج‌ها برشمرد [۱۷].

ژيروسکوپ‌ها نسبت به همه گیرودارهای ساخت مانند بسته‌بندی و ... دقت بالاتر و نسبت به همه عدم قطعیت‌های کاربرد مانند شتاب خطی جسم، دما، ضربه و ... حساسیت بالاتری دارند. طرح ژيروسکوپ باید هر سه زمینه مکانیکی، الکترونیکی و بسته‌بندی را در رویکردی یکپارچه پی‌ریزی کند. در زمینه نخست، بهتر است تا جایی که می‌توان بخش‌ها کوچک شوند و طراحی فرآیند ساخت به گونه‌ای باشد که نیاز به پرداخت زائده‌ها در گام‌های پسا-ساخت نباشد [۲۶]. در زمینه الکترونیکی نیز، کاربست همبند سیگما-دلتا<sup>۲</sup> به همراه پسخور تراز کننده نیرویی، مانند آنچه که فنگ در [۲۷] گزارش کرد پیشنهاد می‌گردد. چنین کاربستی، بهره واپايشی سامانه را افزایش می‌دهد [۲۸]. در زمینه سوم نیز برای کاهش هزینه‌ها، کپسوله‌سازی دستگاه درون یک بسته‌بندی پلاستیکی استاندارد نسبت به بسته مهر و موم شده سرامیکی پسندیده‌تر است [۲۹]. ژيروسکوپ مناسب برای **سامانه‌های پایداری** نباید رزولوشنی کمتر از ۵/۰ درجه بر ثانیه داشته باشد تا بتواند اثر بیش فرمانی یا کم فرمانی را شناسایی کرده و برآورد دقیقی به الگوریتم برنامه پایداری الکترونیکی برساند [۱۷]. همچنین حساسیت به شوک چنین ژيروسکوپی نباید بیش از ۷۵ درجه بر ثانیه باشد.

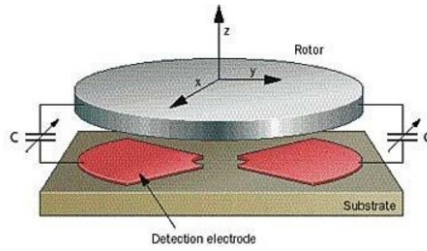
در یک **سامانه برآورد غلت**، ژيروسکوپ بکار رفته باید حداقل رزولوشنی برابر با ۱ درجه بر ثانیه داشته باشد. اندازه رزولوشن در کارکرد مناسب **سامانه آراینده کسبه هوا** برای برآورد درست زمان بازشدن کیسه هوا و تنظیم کشش کمربند ایمنی نیز برابر با ۱ درجه بر ثانیه است [۳۰]. از سوی دیگر حساسیت موردنیاز برای خوانش نرخ غلت برابر با ۲۵۰ درجه بر ثانیه است. برای بهبود مکان‌یابی جهانی در یک **سامانه ناوبری**، حداقل رزولوشن قابل قبول برابر با ۵/۰ درجه بر ثانیه است [۳۰].

در کاربرد غیرمستقیم در **سامانه‌های پایدارکننده دوربین** برای بالا بردن کیفیت پردازش تصویر شرکت بوش، از ژيروسکوپ‌های ADXRS300 و

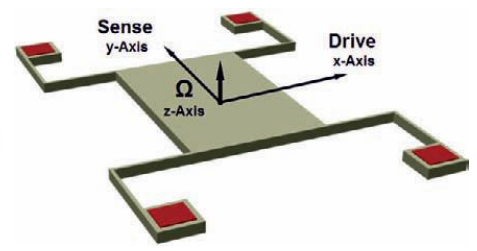
<sup>1</sup>Self-Tuned <sup>2</sup>Electro-Mechanical  $\Sigma\Delta$  modulator <sup>3</sup>Combo-gyros <sup>4</sup>Compensator Filter <sup>5</sup>Signal Fusion



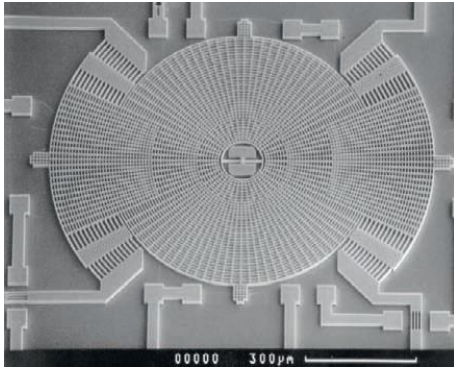
(ج) نماواره یک ژيروسکوپ آلکانگی [۷]



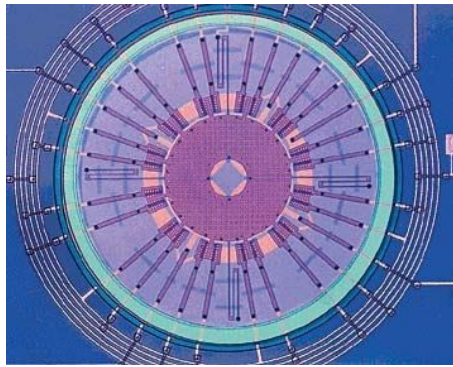
(ب) نماواره یک ژيروسکوپ نوسانی چرخشی



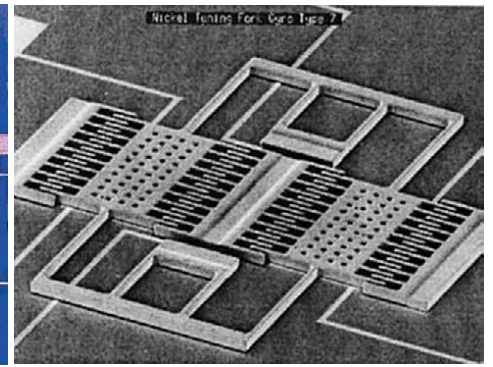
(الف) نماواره ژيروسکوپ نوسانی خطی [۷]



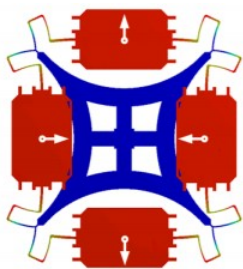
(و) نخستین نمونه آلکانگی بوش [۷]



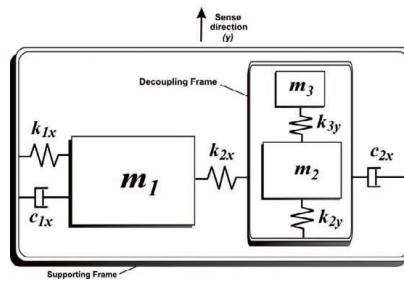
(ه) نخستین نمونه نوسانی چرخشی بریکلی [۱۹]



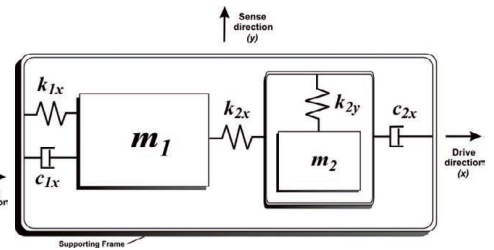
(د) نخستین نمونه نوسانی خطی دارپر [۷]



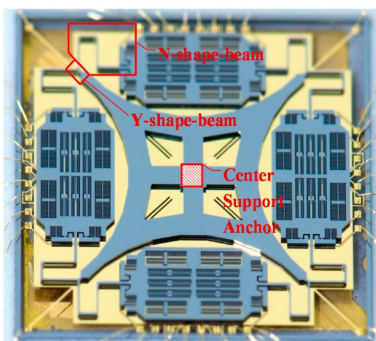
(ط) نماواره ژيروسکوپ نوسانی خطی ۴ جرمی [۱۳]



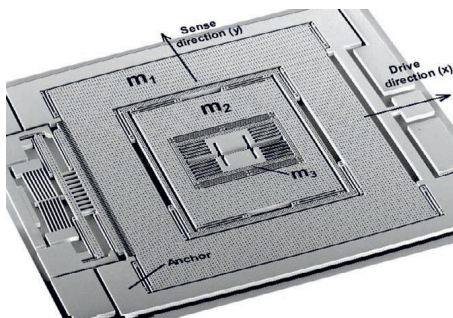
(ح) طرح‌واره ژيروسکوپ نوسانی خطی ۳ جرمی [۷]



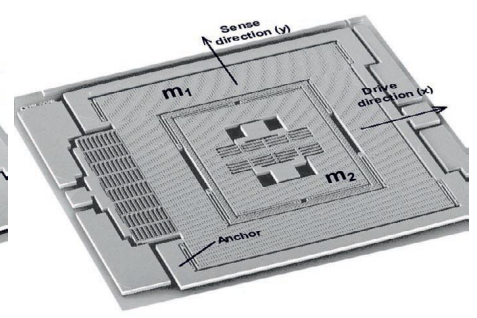
(ز) طرح‌واره نوسانی خطی ۲ جرمی [۱۶]



(ل) نمونه نوسانی خطی ۴ جرمی دانشگاه پکن [۱۴]



(ک) نمونه نوسانی خطی ۳ جرمی دارپر [۷]



(ی) نمونه نوسانی خطی ۲ جرمی دارپر [۱۶]

vehicle stability control applications. in *Mems for Automotive and Aerospace Applications*, pp. 29-53. Elsevier, 2013.

[8] Dang, Jennifer N. Preliminary results analyzing the effectiveness of electronic stability control (esc) systems. tech. rep., US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2004.

[9] Van Zanten, Anton T. Bosch esp systems: 5 years of experience. tech. rep., SAE Technical Paper, 2000.

[5] Parsons, Keith GR, Pask, Mark, and Burdock, William. The development of ace for discovery ii. tech. rep., SAE Technical Paper, 2000.

[6] Nuessle, Marcus, Rutz, Ruediger, Leucht, Matthias, Nonnenmacher, Markus, and Volk, Hardy. Objective test methods to assess active safety benefits of esp. in *20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*. Citeseer, 2007.

[7] Reze, M and Osajda, M. Mems sensors for automotive

- [23] Zhou, Bin, Zhang, Tian, Yin, Peng, Chen, Zhiyong, Song, Mingliang, and Zhang, Rong. Innovation of flat gyro: Center support quadruple mass gyroscope. in *2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems*, pp. 42–45. IEEE, 2016.
- [24] Zhang, Tian, Zhou, Bin, Yin, Peng, Chen, Zhiyong, and Zhang, Rong. Optimal design of a center support quadruple mass gyroscope (csqmg). *Sensors*, 16(5):613, 2016.
- [25] Shkel, Andrei M. Type i and type ii micromachined vibratory gyroscopes. in *2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium*, pp. 586–593. IEEE, 2006.
- [26] Reze, M and Osajda, M. Mems sensors for automotive vehicle stability control applications. in *Mems for Automotive and Aerospace Applications*, pp. 29–53. Elsevier, 2013.
- [27] Chen, Fang, Chang, Honglong, Yuan, Weizheng, Wilcock, Reuben, and Kraft, Michael. Parameter optimization for a high-order band-pass continuous-time sigma-delta modulator mems gyroscope using a genetic algorithm approach. *Journal of micromechanics and microengineering*, 22(10):105006, 2012.
- [28] Liu, Kai, Zhang, Weiping, Chen, Wenyuan, Li, Kai, Dai, Fuyan, Cui, Feng, Wu, Xiaosheng, Ma, Gaoyin, and Xiao, Qijun. The development of micro-gyroscope technology. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(11):113001, 2009.
- [29] Tilli, Markku, Paulasto-Krockel, Mervi, Motooka, Teruaki, and Lindroos, Veikko. *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies*. William Andrew, 2015.
- [30] Dixon, Richard and Bouchaud, Jérémie. Prospects for mst sensors in automotive applications. in *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2006*, pp. 3–12. Springer, 2006.
- [31] Way, O. T. and Writer. Gyroscope catalogue adxrs300. Brochure, 2017.
- [32] Efimovskaya, A, Senkal, D, and Shkel, AM. Miniature origami-like folded mems timu. in *2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, pp. 584–587. IEEE, 2015.
- [33] Sigmund, Ole. Systematic design of electrothermomechanical microactuators using topology optimization. *Modelling and simulation of microsystems, semiconductors, sensors and actuators*, pp. 1492–1500, 1998.
- [34] Yin, Tao, Wu, Huanming, Wu, Qisong, Yang, Haigang, and Jiao, Jiwei. A tia-based readout circuit with temperature compensation for mems capacitive gyroscope. in *2011 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, pp. 401–405. IEEE, 2011.
- [35] Klein, Lawrence A and Klein, Lawrence A. *Sensor and data fusion: a tool for information assessment and decision making*, vol. 324. SPIE press Bellingham, 2004.
- [10] Katzourakis, Diomidis Ioannis and Katzourakis, Antonis Ioannis. Scaled test bed for automotive experiments: Evaluation of single accelerometer electronic stability control. in *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2008*, pp. 239–257. Springer, 2008.
- [11] Ferraresi, Marco and Pozzi, Stefano. Mems sensors for non-safety automotive applications. in *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2009*, pp. 355–367. Springer, 2009.
- [12] Sugawara, Toshiharu, Altmannshofer, Heiko, and Kakegawa, Shinji. Applications of road edge information for advanced driver assistance systems and autonomous driving. in *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2017*, pp. 71–86. Springer, 2018.
- [13] Barton, Andrew Dennis, Farrelly, James Owen Patrick, and Alford, Nicholas. Oversteer steering assistance controller, May 17 2005. US Patent 6,895,318.
- [14] Meyer, Gereon, Valldorf, Jurgen, and Gessner, Wolfgang. *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2009*. Springer, 2009.
- [15] Sentilles, Séverine, Vulgarakis, Aneta, Bureš, Tomáš, Carlson, Jan, and Crnković, Ivica. A component model for control-intensive distributed embedded systems. in *International Symposium on Component-Based Software Engineering*, pp. 310–317. Springer, 2008.
- [16] Group, The P2700 Working. Ieee standard for sensor performance. Brochure, 2014.
- [17] Acar, Cenk and Shkel, Andrei. *MEMS vibratory gyroscopes: structural approaches to improve robustness*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [18] Iyer, Sitaraman V. Modeling and simulation of non-idealities in a z-axis cmos-mems gyroscope. tech. rep., CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA DEPT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 2003.
- [19] Dreyer, Antonie Christoffel. *Modelling of MEMS vibratory gyroscopes utilizing phase detection*. Ph.D. thesis, Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2008.
- [20] Yongpeng, Wen and Huilin, Shang. Modeling and simulation for a vibratory tuning-fork mems gyroscope. in *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, vol. 2, pp. 605–608. IEEE, 2011.
- [21] Lee, Feng-Yu, Liang, Kai-Chih, Cheng, Emerson, and Fang, Weileun. Design and implementation of a fully-decoupled tuning fork (fdtf) mems vibratory gyroscope for robustness improvement. in *2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, pp. 1160–1163. IEEE, 2015.
- [22] Senkal, Doruk, Efimovskaya, Alexandra, and Shkel, Andrei M. Dual foucault pendulum gyroscope. in *2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, pp. 1219–1222. IEEE, 2015.