

移動体制御における MEMS

ジャイロの台頭*

The Rise of MEMS Gyroscope in Mobile Control

熊谷秀夫**

Hideo KUMAGAI

Key words MEMS Gyro, MEMS IMU, angular rate sensor

1. はじめに

従来移動体の制御にはジャイロをはじめとする所謂慣性センサ（角速度計，加速度計）が多く用いられてきた。これは慣性空間における物体の動きを制御するのが目的であり，そのために慣性センサを必要とするのは当然で，例えば角速度計の出力がゼロになるように移動体の動きを制御できたとすれば，角速度のない動き，すなわち移動体を安定させていることになるのである。例えば飛行機の中で文字が書けるのはこの制御のおかげである。ではそれらの慣性センサであるが，従来はリングレーザーや光ファイバーといった光学式の角速度検出器や電磁式のサーボ型加速度計であったが，MEMS 技術の到来で，1990 年ごろより MEMS 加速度計，続いて MEMS 角速度計（ジャイロ）が開発され，徐々にその性能を向上させながら応用範囲を広げてきた。当初はデジタルカメラの手ぶれ防止やエアバックなど使用時間の短い応用であったが，最近では光ファイバージャイロや電磁式サーボ加速度計に匹敵する性能の MEMS センサも出現し，過去実験としては可能であったが，大きさ・価格の点で採用が難しかった分野においても使用される機会が増えてきた。そこで本論では特に MEMS ジャイロを中心にセンサの種類，性能，移動体への応用例などを紹介する。移動体と定義するのは難しいが，最近は携帯電話に 3 軸ジャイロ，3 軸加速度計が内蔵され，驚異的な小型・低価格化が実現されていることも特筆すべきことである。

2. MEMS ジャイロの構造・構成

MEMS ジャイロ開発のきっかけが米国の砲弾制御用で

あり，現在世界の MEMS ジャイロとしては軍用も存在しているが，ここでは主に民生用途で発表されている MEMS ジャイロに関して紹介する。その検出原理は，「速度をもった質量に角速度が印加されるとその直行方向にコリオリ力が発生する」というコリオリ力である¹⁾。

ジャイロの分類としては，連続した速度環境を作るために物体を振動させる所謂振動ジャイロである。構造は，柱を振動させるタイプ (Bulk)，櫛を振動させるタイプ (Surface Micromachining) に大別され，それぞれの素材としては，非誘電体のシリコン (Si)，誘電体の水晶 (SiO_2)，ニオブ酸リチウム (LiNbO_3) に分けられる。現在市場に出回っている MEMS ジャイロを上記の観点から区分けすると表 1 のようになる。誘電体は電極を取り付ければ振動駆動・角速度検出が可能であるが，非誘電体の場合は，静電容量・薄膜誘電体の貼付けによることになるが，それぞれの駆動力・検出感度・形状など，固有の特徴をもつ物が多い。

どのセンサも優劣は付け難いが，同じ大きさの駆動片の場合，駆動・検出感度は概ね $\text{LiNbO}_3 > \text{Si}$ (PZT 薄膜) $> \text{SiO}_2 > \text{Si}$ (静電) と考えられるが，加工方法に関しては， LiNbO_3 以外は DEEP RIE (Reactive Ion Etching) 手法や犠牲層エッチングで容易に複雑な加工ができることにより，構造体の小型化や感度 Up が可能になってきている。それぞれの MEMS ジャイロの諸性能に関しては，公開されている仕様書を参照いただきたいが，最近ではラン分散で数 deg/h のノイズ成分のジャイロも開発され，

表 1 各種 MEMS ジャイロとその材料・構成

メーカー	構造	素材
多摩川精機	Bulk	LiNbO_3
Panasonic	Bulk	Si (PZT 薄膜)
村田製作所	Bulk	Si (静電)
住友精密	Bulk	Si (静電)
Epson	Bulk	SiO_2
ST マイクロ	Surface	Si (静電)
InvenSense	Surface	Si (静電)
Honeywell	Surface	Si (静電)
Bosch	Surface	Si (静電)



*原稿受付 平成 22 年 10 月 14 日
 **多摩川精機株式会社 (長野県飯田市大休 1879)
 熊谷秀夫
 2003 年立命館大学理工学研究科博士課程後期卒業
 業博士号取得 (「複合慣性計測装置に関する研究」)
 研究内容は慣性装置応用研究。著書は「ジャイロ活用技術入門」(工業調査会)共著。

徐々に一般的な FOG (Fiber Optic Gyro) の性能に迫る物になってきている。

■多摩川精機

<http://www.tamagawa-seiki.co.jp/jp/c16.html>

■Panasonic

http://industrial.panasonic.com/jp/products/automotive_electronics/automotive_electronics.html

■村田製作所

<http://www.murata.co.jp/products/sensor/index.html>

■住友精密工業

<http://www.sssj.co.jp/>

■エプソン

<http://www.epsontoyocom.co.jp/product/Sensor/index.html>

■ST マイクロエレクトロニクス

<http://www.st-japan.co.jp/products/families/sensors/gyroscopes.htm>

■InvenSense

<http://invensense.com/jp/mems/products.html>

■Honeywell

http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Missiles-Munitions/GG5300_Three_Axis_MEMS_Rate_Gyro.pdf

■Bosch

<http://www.bosch-sensortec.com/content/language1/html/3488.htm>

3. 各種 MEMS ジャイロの応用例

最近ではこれら MEMS ジャイロも、従来の手振れ補正、カーナビといった単に計測分野だけでなく、多様な移動体の制御領域まで広がってきている。国外では軍用としてミサイル、砲弾などに使われているが、ここでは主に国内の状況に関して紹介する。ただ、これらの用途は、すでに実用化されている場合と一部開発段階の場合のものもある。

3.1 人工衛星

昨今の人工衛星の小型化に伴って姿勢制御装置の小型・低価格化の要求が大きくなり、従来の高精度 FOG などの採用を MEMS 化する動きがあり、MEMS ジャイロの信頼性、耐放射線に関する研究が行われている。ミッションにもよるが 200 kg 以下の人工衛星には、アラン分散で数 deg/h の MEMS ジャイロの搭載が検討されている。また、これら小型衛星を打ち上げる小型ロケット用の姿勢制御用としても MEMS ジャイロの運用が検討されている。高精度ではないので、Star Tracker などとの複合運用が計画されている。話題を呼んだ「はやぶさ」には、FOG と MEMS 加速度計が採用されたが、次は MEMS ジャイロになる可能性は大きいと思われる。

http://nmp.nasa.gov/st6/TECHNOLOGY/AAS_03_003_



図 1 FAA 認証された MEMS AHRS

FINAL.pdf

3.2 小型民間航空機・無人航空機

海外の小型民間航空機の姿勢・方位基準装置 (AHRS: Attitude Heading Reference System) には、すでに MEMS ジャイロが用いられており、アメリカ連邦航空局 FAA (Federal Aviation Administration) の使用許可 (DO-178A) を取得した製品も販売されている。

<http://www.xbow.com/defense-solutions/products/NAV440.html>

また国内においても、無人標的機用 AHRS として MEMS を用いた商品が試験運用されている他、JAXA では、MEMS 慣性センサを使った GPS 複合型慣性航法装置を開発し、民間航空機の運用に適した慣性装置 (Micro-GAIA) を公開している²⁾。

3.3 車両

車両制御用としてはすでに一部の車種で搭載されている横滑り装置 (ESC: Electrical Stability Control) が北米・欧州で法令化されるのを受けて、現在多くの会社が新規開発を行っている。

ABS と連動したブレーキシステムに組み入れる場合、またエアバックシステムに組み入れる場合など運用もさまざまであるが、センサシステムもジャイロ・加速度計基板一体型、パッケージ一体型など、多様のバリエーションになりそうである。

その他、サイドエアバックのためのロールオーバー検出、パーキングアシストなどに使用されるが、車両の制御であり重要保安部品となるために、基本性能、信頼性、自己診断機能など一般の用途とは全く異なる信頼性要求を満たす必要がある。

また、車両制御とは異なるが、車両の挙動計測装置 (Drive Recorder) にもジャイロが用いられ、ドライバーの安全運転指導に役立っている。

<http://www.esc-jpromo-activesafety.com/>

3.4 鉄道

福知山線の脱線事故を契機に、慣性センサを用いた脱線検出、脱線防止用のセンサとして、MEMS ジャイロが用いられている。車両の振動などの動きを検出し、脱線アラームを発生する装置であるが、将来は脱線予知を行い、未

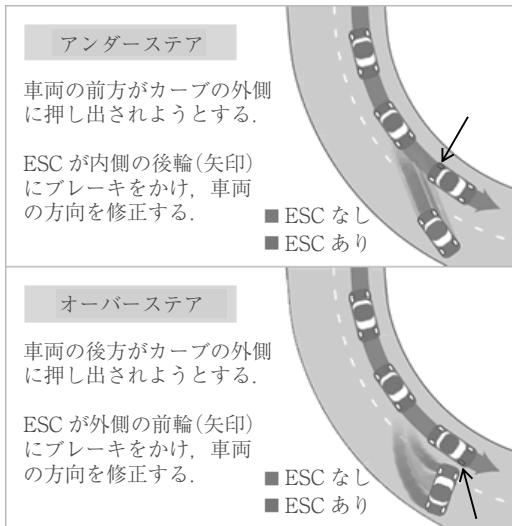


図2 ESC 概要

フィンスタビライザー [fin stabilizer]

横揺れ防止装置。船底の両側から羽根のようなフィンを出し、それによる揚力を利用して横揺れを防ぐ。日本人造船技術者によって発明され、波がなく、海が凪いているときには船体に格納されている。



図3 フィンスタビライザー

然に事故を防ぐことを目的としている。また、新幹線においてカーブで速度を減少させることなく通過させるために車両を若干傾ける制御を行っているが、その際 MEMS ジャイロによりカーブの認識をしたり、前後の車両の方向を比較することで事故を未然に防ぐ対策に使用されている。
http://www.nozomi.iis.u-tokyo.ac.jp/iis2009/iis2009_DetectionOfSignsOfDerailment.pdf

3.5 船舶、水中航走体

船舶では運用時間が比較的に長いので、寿命の長い流体ジャイロなどが船舶の揺れ制御に使用されてきたが、MEMS ジャイロも寿命が長いために、今後使われる可能性が高く、低コストジャイロ採用により、小型船舶にも横揺れ装置が装備されていく可能性がある。また、水中航走体の AHRS としても標的機をはじめとして運用され始めている。

<http://www.venus-cruise.co.jp/introduce.html>

3.6 フォークリフト 無人搬送車

従来よりフォークリフトの転倒防止としてジャイロが用いられている。高旋回を検出して、その際サスペンションを保持するなどの機能により、転倒防止を図っている。

また現在の無人搬送車の多くは、地表面に張られた磁気テープを認識して走行を行っており、このテープを取り除くために、従来からジャイロによる自立走行は可能であることは実証されていたが、価格の問題で採用されなかつ

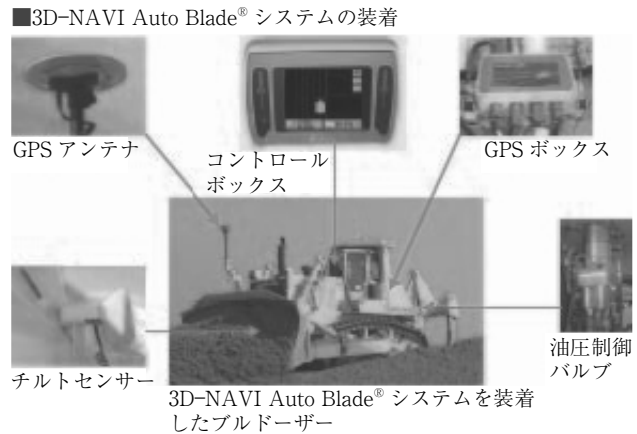


図4 自動掘削システム コマツホームページより

た。搬送車のために磁気テープを設備することは、維持管理も含めてコスト高であり、高性能化されたジャイロを使う方向に動きつつある。

<http://www.toyota-lf-osaka.co.jp/FAQ/safety.html>

3.7 建設機械 (IT 施工) クレーン

最近ではパワーシャベルのような建設機械ではその自己中心位置は精密 GPS により計測が可能で、あとは MEMS ジャイロを用いた腕の角度の精密計測をすることにより、バケットの位置を高精度に計測できる状況になってきた。また、最近の施工図は多くが 3 次元 CAD により作成されており、その図面とバケットの位置を同時に表示することで、施工図通りの工事をリアルタイムに行うことができるようになった。

<http://www.gis.nilim.go.jp/jouho/index.html>

また、建設現場で使用されるクレーンも、大きな揺れで別の建物への傷害を防ぐための揺れ防止として MEMS ジャイロが使用される。ジャイロを使つての揺れ防止が可能なのは実証されているが、価格の問題で実用化されなかったが、高精度で低価格な MEMS ジャイロの出現で徐々に可能になりつつある。クレーンは工事現場だけでなく、製鉄所、港湾など、多くの場面で必要であり、ジャイロを使った揺れ防止が実現すると、その市場は相当量になる。

3.8 ヒューマノイドロボット 2 輪車

介護ロボット、案内ロボットをはじめ、多くのヒューマノイドロボットが開発されているが、それらの姿勢制御には MEMS ジャイロが必要である。姿勢・方向などを精度良く検出するためには、ロボットに装備されたその他のセンサとの効果的な複合化が重要である。

また、セグウェイを代表とする一人乗り電動車の開発が行われているが、その制御には MEMS ジャイロが必要であり、高い信頼性を要求されている。

■産総研 ヒューマノイドロボット

http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090316/pr20090316.html



図5 各種一人乗り電動車

■トヨタ自動車 ウイングレット

http://www2.toyota.co.jp/jp/tech/p_mobility/winglet/

■ホンダ 電動一輪車

<http://trendy.nikkeibp.co.jp/article/news/20090925/1029057/>

■セグウェイ

<http://www.segway-japan.net/index.html>

3.9 工作機械 ロボット

MEMS ジャイロが小型・高精度化されたことにより、工作機械の刃先付近に搭載し加工状態をモニタリングするシステムや、テキスタイルやワイヤーボンディングにおける装置の振動状況をモニターするシステムなど、微小変動の状況を把握するセンサとして応用される可能性がある。

また塗装ロボット、溶接ロボット、運搬ロボットなどのロボットの3次元位置や速度を計測し、より精度の高い作業やティーチングが不要な作業など、ロボットアームの実際の動きを直接検出することで、従来の予備作業を省略するなどの省力化も可能になりつつある。

3.10 家庭用ゲーム機 携帯電話

移動体の制御とは若干ジャンルが異なるが、昨今家庭用ゲーム機のコントローラ（リモコン）に3軸加速度計、3軸ジャイロが採用され、コントローラの動きを忠実に画面に反映させている。画像との複合的な運用が可能であり、慣性センサの弱点を克服できる用途の1つであるが、慣性センサの小型・低価格化がキーとなっている。

また、2010年携帯電話にも3軸加速度計、3軸ジャイロが装備された。内蔵のゲームのコントローラとして、ある

いは入力デバイスとして使われている。

3.11 医療用機器

この分野も制御とは異なるが、医療用機器・健康用機器としても用いられている。リハビリの前後における治療の進捗度を角度で客観的に表現する装置であったり、万歩計のような日々の生活の活動状況を数値化して表現する装置が販売されている。

<http://www.microstone.co.jp/product/sensor-wireless-motionrecorder.html>

4. MEMS ジャイロの今後の動向

4.1 市場

今後もゲーム機や携帯端末に使われる電子部品感覚の慣性センサが大量に出回ると同時に、ESCに代表される重要保安部品としても相当量の需要が見込まれる。また、それら大量生産による低価格化により、従来はジャイロ搭載が不可能であった分野への応用がますます広がり、さらに新しい用途への拡大が期待できる。

しかし、それらは大量生産故の性能向上の限界があり、さらなる光ファイバー並みの高精度を要求される应用に関しては、別グループの製造メーカーによる供給が期待できる。

4.2 性能・価格

現在ゲーム機用では\$5以下の3軸加速度計、3軸ジャイロが出始めており、今後あらゆるモバイル端末機に使用されていくと想定する。一方制御用としては、ESCの法令化で加速度計・ジャイロ一体型、あるいは6軸IMUとして別の価格帯で販売されるものと思われる。今後、高性能版としては、アラン分散で0.2 deg/hクラスのMEMSジャイロも出現する見込みであり、車載運用の高信頼性も後押しし、今後はあらゆる移動体に搭載され航空機並みの制御が可能になることも考えられる。新幹線の中で文字が書ける日もそれほど遠くないかもしれない。

参考文献

- 1) 多摩川精機株式会社：ジャイロ活用技術入門，工業調査会，(2000)。
- 2) 藤原健，富田博史，張替正敏：小型航空機に適した航法システムの開発と飛行評価～MEMS GPS/INS航法システム“Micro-GAIA”～，第43回飛行機シンポジウム講演集，(2005) 631-637。