

民生用 3軸角速度（モーション）センサの開発

Development of Three-Axis Gyroscope (Motion Sensor) for Consumer Applications

佐々木 剛
Takeshi Sasaki

藤井 剛
Tsuyoshi Fujii

吉内 茂裕
Shigehiro Yoshiuchi

森伸 克也
Katsuya Morinaka

中村 裕幸
Hiroyuki Nakamura

山崎 稔夫
Toshio Yamazaki

要 旨

近年、スマートフォンには3軸加速度センサ、電子コンパスに加えて、新たに3軸角速度センサも搭載され始めている。しかし、現在搭載されている3軸角速度センサは、モーション検出はできるものの、カメラの手振れ補正に対応できるノイズレベルには到達していない。そこで本稿では、手振れ補正に対応できる小型3軸角速度センサの開発について、①小型低背化：駆動振動方向の多軸化による小型1素子3軸検出素子の開発、およびフリップチップ（FC）実装を用いたスタック構造の開発、②低ノイズ化：広い検出範囲が必要なモーション検出と低ノイズが要望される手振れ補正対応の両方を実現する初段アンプ電流切り替え機能を搭載したセンサの開発、の2点について報告する。

Abstract

In recent years, three-axis gyroscopes (motion sensors) have started to be used in smartphones in addition to three-axis accelerometers and electronic compasses. Existing motion sensors in smartphones have sufficiently low noise levels for detection of human motion but do not reach the level required for Image Stabilization (IS) for cameras. Therefore, in this study, we report the development of a small motion sensor with noise levels that meet IS requirements through (1) Size reduction: Development of a sensor element that could detect angular velocity in all three axes using one resonator and the development of a package with stack structure using flip-chip mounting technology, (2) Reduction of noise: Development of a sensor with a function to select current consumption of the first stage of the detection circuits. This sensor has the low noise performance required by IS and a wide dynamic range for motion sensing.

1. はじめに

1.1 背景

角速度センサとは物体の回転角の速さを検出するセンサであり、主にカーナビゲーションシステムや車両制御システム（1軸検出）、カメラの手振れ補正機能（2軸検出）などの用途に使われてきた。

一方、近年新たにゲーム・スマートフォンへの搭載が進んでおり、「人間の動き」を検知するUI (User Interface) 用途で用いるために3軸（X, Y, Z）周りの角速度検出が要求されている。これは加速度センサによる直線方向の動き検出に加え、回転方向の速度を検出することで、より複雑な動作入力に対応することが可能になるためである[1]。

また、特にスマートフォン用途においては、電池スペースの拡大から搭載部品に対する小型低背化が求められている[2]。

しかし、従来の角速度検出素子は後述する音叉（おんさ）型振動子やこれまで提案されてきた素子構造[3]などのように、基本的に1つの検出素子で1軸周りの角速度しか検知できず、小型低背の3軸検出の角速度センサ開発の大きな障害となっていた。そこで、3軸周りすべて

の角速度を1つの検出素子のみで検知できる検出素子構造を新たに考案した。

また、ゲーム機のコントローラを動かす状態から想像できるように、この用途では、ナビゲーションシステムや手振れ補正などの用途に比べて、速い回転運動が加わるため広いダイナミックレンジ（ $\pm 2000^\circ/\text{s}$ ）への対応が要望されている。一般に広いダイナミックレンジと低ノイズは両立の難易度が高く、従来スマートフォンに搭載されている角速度センサでは、手振れ補正に対応できるノイズレベル $0.006^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ （注1）を実現できていない[4]。筆者らは、搭載されたカメラと組合せ、手振れ補正への対応が今後必要になると予想し、広いダイナミックレンジと低ノイズの両方に対応するセンサの開発に取り組んでいる。

本稿では、スマートフォン用途に向けて開発を進めている民生用3軸角速度（モーション）センサ開発における、小型低背化、低ノイズ化への取り組みについて報告する。

（注1） センサ出力でのノイズレベル(N)をセンサ出力感度(S)で除算することで感度換算し、単位周波数平方根あたりの密度に換算したもの。角速度センサのノイズレベルは、S/Nの逆数に相当するこの指標で評価する。

1.2 角速度センサの基本原理

まず、角速度検出素子の原理について、すでに量産している音叉型振動子を例に用いて説明する。第1図左のように、X方向に速さ v で駆動振動している質量 m の振動体に対して、回転検出軸であるZ軸周りに角速度 Ω が入力されると、振動方向に対して垂直方向であるY方向にコリオリの力 $F_c = 2mv\Omega$ が働く。この力によって、第1図右のような検出振動が励起される。このときの検出振動による音叉アームの歪（ひずみ）を電気信号として検出すれば角速度を検知することができる。

検出素子の材料にはシリコンウェハを用い、マイクロマシニング技術を使った高精度加工ならびにウェハプロセスでの大量生産を可能にしている。シリコン表面には圧電定数の大きい独自のc軸配向 $Pb(Zr,Ti)O_3$ 薄膜と電極を形成しており、小型でも高感度な素子を実現している。駆動用の電極に電圧を印加して逆圧電効果で駆動振動を誘起し、検出振動による歪を圧電効果で電荷として検出することで、角速度を検知している。

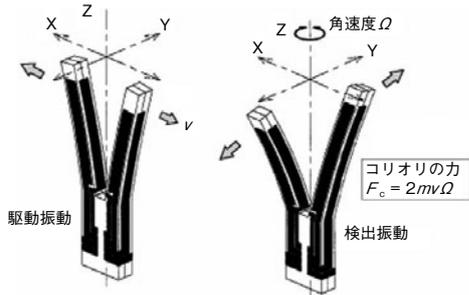
信号処理回路はASIC (Application Specific Integrated Circuit) を用いており、センサパッケージ内で素子およびパッケージと接続されている。基本的な回路の例を第2図に示し、以下に概略を説明する。

第2図のように、素子の共振を利用した自励発振による駆動回路、および素子から出力される検出信号を取り出す検出回路から構成されている。

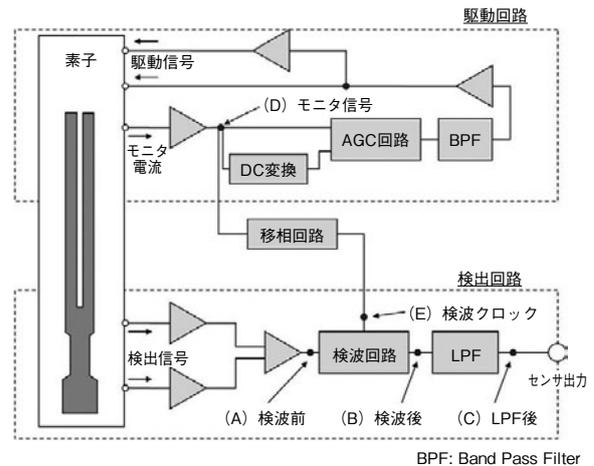
駆動回路では素子から出力される、機械振動振幅に比例した電流（通称：モニタ電流）に応じて、素子に与える駆動電圧を制御するAGC (Auto Gain Control) 回路を含む帰帰構成としている。これにより素子の振動振幅を一定に制御している。

一方、検出回路に対しては、入力された角速度に比例した振幅をもつ検出信号（感度信号）が入力され、この振幅量を取り出す機能をもつ。

理想素子であれば、角速度が無入力の状態では、検出



第1図 角速度検出原理説明図
Fig. 1 Principle of gyro sensor



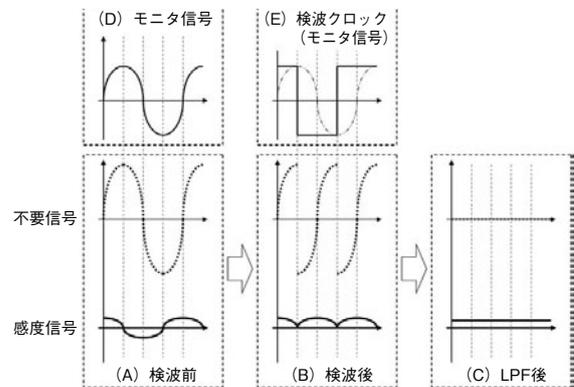
第2図 基本回路構成 (1軸角速度センサ)
Fig. 2 Block diagram of 1 axis gyro

回路への入力はないが、実際には感度信号とは別の不要な信号（不要信号）が素子から出力される。

これは、例えば第1図左のように、X軸方向へと駆動させようと駆動電圧を印加したとしても、素子の加工精度によって、X軸方向以外（この場合Y軸方向）にもアームが振れてしまうことによるもので、このY軸方向振動振幅に比例した信号が検出電極から出力される。

この不要信号は素子の撓（たわ）み量が最大するとき、つまり素子の振動速度がゼロのときに信号振幅が最大になるため、感度信号と90°位相が異なることになる。この不要信号成分を除去し、感度成分だけを取り出すため、検出回路には同期検波を用い、センサ出力に影響が出にくい構成としている。

第3図に、同期検波の原理を示す。各波形はそれぞれ第2図の (A), (B), (C), (D), (E) の波形を示したものである。前述の感度信号と不要信号のように90°位相



第3図 同期検波の原理
Fig. 3 Principle of synchronized detection

がずれた波形が検波回路に入力されると (A)、感度信号と同位相の検波クロック (E) と掛け合わせることで、それぞれ (B) のような波形が得られる。ここで検波クロック (E) は、感度信号および不要信号と同期したモニタ信号 (D) から作られる。

(B) の波形がLPF (Low Pass Filter) を通過することで (C) の波形が得られる。以上のように、同期検波は検波クロックと同位相の感度成分の振幅量を抽出し、90°位相のずれた不要信号成分を除去することができる検波方法である。

以上のように、AGC制御された自励発振により一定振幅で素子を振動させ、角速度入力時に発生するコリオリ力による歪量を電気信号として抽出し、同期検波を用いて角速度成分のみを取り出すことで、精度良く角速度を検出している。

2. 小型・低背化への取り組み

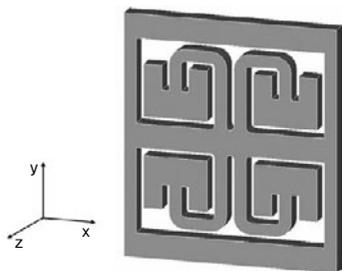
角速度センサの小型低背化に関して、特に重要な素子とパッケージへの取り組みについて説明する。

2.1 小型・低背3軸検出素子の開発

従来の角速度センサでは、前章に記載した1軸周りの角速度しか検出できない音叉型素子を用いていた。そのため、X、Y、Zの3軸周りの角速度を検出するためには、3つの検出素子を用意し、少なくとも1つの素子を長手方向に立てて実装しなければならず、デバイスの小型低背化が実現できない課題があった。

この課題を解決するためには、1つの低背検出素子で3軸分の角速度を検出することが必要となる。そこで、従来の音叉型素子をベースに、4本のJ字型振動アームとそれぞれのアームの先端に錘（おもり）を接続した、新たな検出素子を考案した (第4図)。

新規検出素子の特徴は以下の2点である。



第4図 検出素子図
Fig. 4 Sensing element

〔1〕駆動振動方向の多軸化

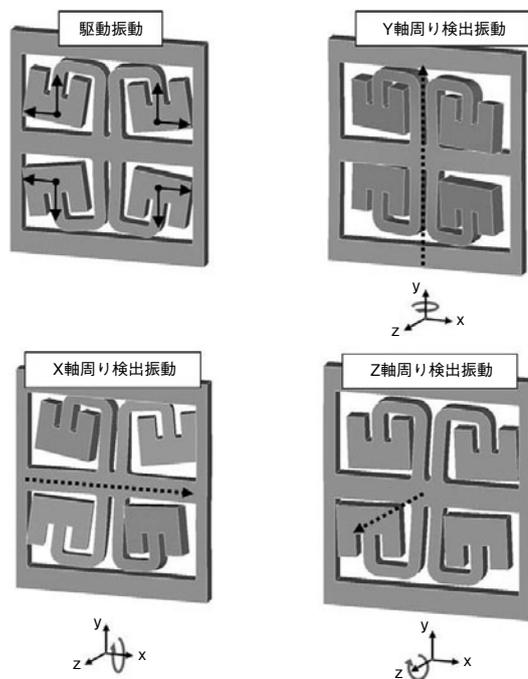
音叉型素子のように直線状の振動アームだと、駆動振動の方向が1軸方向のみとなり、コリオリの力の原理からその直交方向の2軸周りの角速度までしか検出できない。1素子で3軸周りの角速度を検出するためには、平面内で同時に2軸方向に錘を振動させる必要がある。そこで、これを実現させるために新規に考案したのがJ字状に屈曲した振動アームである。第5図左上のように振動アームを屈曲させることによって、X軸方向とY軸方向双方への駆動振動を可能にさせた。

〔2〕3軸分の検出電極設計

第5図左上に示す駆動振動を与え、X、Y、Z軸周りの角速度が印加されると、同じく第5図に記載の各軸周りの検出振動が励起される。

角速度を検出するためには、素子上に検出電極を設ける必要があるが、各検出振動で最も歪が発生する箇所に電極を配置することで、1つの素子で効率よく3軸検出できるようにしている。また、逆に該当する軸以外の感度信号など不要な成分を検出しないように電極をシンメトリに配置している。

このような技術を用いることで、小型・低背でありながら、高感度の3軸検出素子を実現した。



第5図 駆動振動と検出振動
Fig. 5 Driving vibration and sensing vibration

2.2 小型・低背パッケージの開発

開発した3軸検出素子を用いた従来構造のモーシオンセンサの断面図を、第6図に示す。

セラミックパッケージのキャビティ底面にASICをFC実装し、そのASIC裏面に下蓋（ふた）付素子（下蓋は素子とASIC間に所定のギャップを形成するために必要）を接着実装している。素子とセラミックパッケージ間はワイヤボンディングにより配線し、極薄のCAPで封止する構造とした。この構造で□3.6 mm、高さ0.9 mm Maxを実現し、業界最小サイズとして市場に参入した。

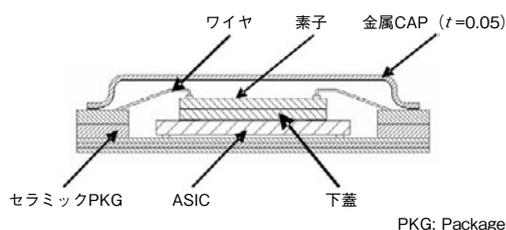
次に、筆者らは他社に先駆けて、さらなる小型化（□3 mm）に挑戦した。従来構造を踏襲して実現しようとした場合、ASIC、素子をそれぞれ従来比-47%、-52%にサイズダウンする必要があり、ASIC、素子共に、機能・性能面とサイズのバランスから、実現困難な状況であった。

これまで前述のような形状の検出素子単品では、実装機による吸着での破損などの課題があり、検出素子単品でのFC実装が不可能であった。ところが昨今の実装技術の進化により検出素子単品でのFC実装が可能となった。このため、従来の実装形態とは異なる構造に構想を広げ、デッドスペースの最小化を実現する新規構造として、部品間接続にFC実装を用いたスタック構造を考案した（第7図参照）。

ポイントは以下の2点である。

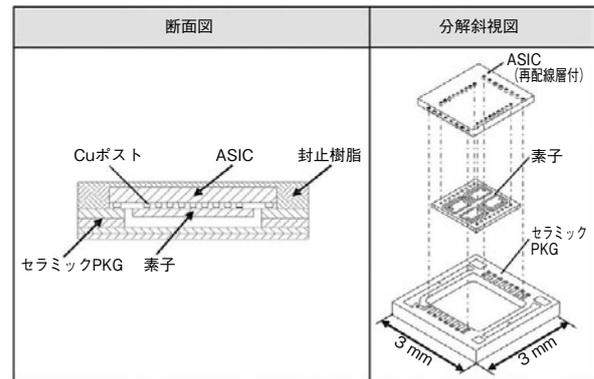
まず、①ワイヤボンドレスによる低背化のためASIC上面に形成される再配線層（ポリイミド層とCuの配線層を積層したもの）を導入した。再配線層は従来構造ではセラミックパッケージが担っていたASICと素子間の接続配線機能を担っている。

また、②再配線層のトップ面にCuのポストを形成することで、検出素子とASICの電気的な接続をするとともに、従来素子下蓋により実現していた「素子の振動動作に必要なギャップ」を形成する構成としている。このポスト面上に素子をFC実装したものを、セラミックパッケージ上面にFC実装する構成として大幅なダウンサイ



第6図 従来構造モーシオンセンサ断面図

Fig. 6 Cross-sectional view of conventional structure of motion sensor



第7図 FC実装を用いたスタック構造

Fig. 7 Stack structure with flip-chip technology

ズを達成し□3 mm、高さ0.85 mm Maxサイズを実現した。

3. 手振れ補正対応

3.1 広ダイナミックレンジと低ノイズ

スマートフォン向け角速度センサはUI用途で用いることから広いダイナミックレンジが求められている。一方、筆者らは今後の用途として内蔵するカメラに対する手振れ補正機能を想定し、UI用途での低ノイズ化（ $0.02^\circ/s/\sqrt{\text{Hz}}$ ）に加え、DSC（Digital Still Camera）の手振れ補正用角速度センサと同等の低ノイズ化への対応が必要になると考えた。

手振れ補正用途では、UI用途と異なり検出する動作が非常に小さいため、ダイナミックレンジは狭くてもよい。しかし「静止させようとする人の手のブレ」を正確に検出する必要がある。このため非常に低いノイズレベルが求められ、筆者らは過去の開発の知見からノイズレベル $0.006^\circ/s/\sqrt{\text{Hz}}$ を目標として開発に取り組んだ。

3.2 低ノイズ化への取り組み

ノイズ特性は、各ノイズ要素の電力和によりTotalの性能が得られるため、1つでも突出して性能の悪い要素があると、他の項目をいくら改善してもTotalでの改善の効果がでてこない。したがって、各項目をバランスよく低減することが必要になる。

角速度センサのノイズレベルを決める要素としては、検出系初段回路のノイズ成分、および不要信号成分と検波クロックに重畳されるジッタノイズの乗算によるノイズ成分が挙げられる。後者については、不要信号を相殺する機能を設けることで、実質的にノイズへの影響を低減でき、現行品同様、前者が支配要因であることがわかっている。

センサTotalでのノイズ低減のため、上記検出系初段回路のノイズに着目し、以下の3項目について検討を行った。

- レベルダイヤ（Gain配分）
- 初段回路規模
- 初段回路電流

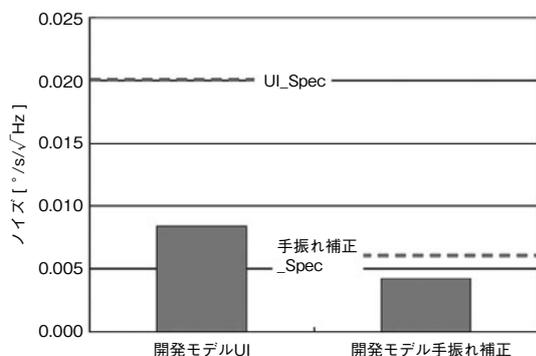
まず検出系全体のレベルダイヤの見直しを行った。初段アンプなど前段側でのGainを上げ、後段側のGainを下げるように配分することでTotalのノイズ低減を図った[5]。ただし、単純に前段のGainを上げると、ダイナミックレンジが不足して、不要信号などにより回路が飽和するため、初段回路出力部の構成を工夫しこれを回避している。

次に、駆動系の出力段回路の集積化に取り組むとともに、一部機能回路を削減し、その減少分面積を利用して検出系初段アンプの回路規模を増加させた。

手振れ補正用途では、この減少した回路分の電流を検出系初段回路に配分するとともに、ASIC全体の回路規模の制約から、検出系初段回路電流を若干増加させ（検出系初段回路のノイズに対する最適電流値に近づけることで）、手振れ補正用途のノイズ目標を達成する構成とした。

一方でUI用途を考えた場合、初段回路規模拡大などの効果により、Total電流として従来比20%減でも、必要なダイナミックレンジ2000°/sを維持しつつ目標ノイズである0.02°/s/√Hzを実現できる見通しが立った。そこで初段アンプの電流を切り替える工夫をすることで、ノイズ仕様が緩和可能なUIモードでは消費電流を低減できる構成とした。

第8図に、今回開発したセンサのUI用途設定、手振れ補正用途設定でのノイズの測定結果を示す。それぞれ目論見（もくろみ）どおりのノイズレベルを達成した。



第8図 出力ノイズ

Fig. 8 Output noise

4. まとめ

モーション検出が可能な高ダイナミックレンジと、手振れ補正対応可能な低ノイズの両方に対応できる、□3mm小型低背3軸角速度センサを実現した。

小型低背化に関しては、特に新規検出素子構造を考案し、独自のc軸配向Pb(Zr,Ti)O₃薄膜を用いることで、高感度でかつ小型低背の1素子3軸検出素子を実現するとともに、FC実装を用いたスタック構造パッケージの開発により、3軸角速度センサとして業界最小サイズ^(注2) 3.0×3.0×0.85 mm Maxを実現した。

また、広ダイナミックレンジが必要なモーション検出(UI用途)、低ノイズレベルが必要な手振れ補正対応両方への対応については、低ノイズ化に適した回路設計と新規電流切り替え機能の追加を行い、モーション検出(UI)モードでダイナミックレンジ2000°/sとノイズレベル0.02°/s/√Hz、手振れ補正モードでダイナミックレンジ500°/s、ノイズレベル0.006°/s/√Hzをそれぞれ実現した。

今後は、特にスマートフォン市場において、低消費電流化への要求が高まると予想されるため、さらに手振れ補正モードにおける低消費電流化を進め、現状のUIモード以下の消費電流で手振れ補正用途に対応できるセンサの開発を進める予定である。

なお、今回開発した角速度センサ設計技術は、加速度センサや歪センサなど、あるいはそれらを組み合わせた複合センサへの応用展開が可能な技術である。

参考文献

- [1] <http://plusd.itmedia.co.jp/lifestyle/articles/0905/21/news091.html>, 参照 Mar. 5, 2012.
- [2] <http://www.yomiuri.co.jp/atmoney/kouza/kabuka2/03/20110907-OYT8T00427.htm>, 参照 Mar. 5, 2012.
- [3] M. F. Zaman et al., "High performance matched-mode tuning fork gyroscope," IEEE MEMS, pp.66-69, 2006.
- [4] Luciano Prandi et al., "A low-power 3-axis digital-output MEMS gyroscope with single drive and multiplexed angular rate readout," 2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) Digest of Technical Papers, pp.104-106, 2011.
- [5] Benhzad Razavi, "第7章 雑音," アナログCMOS集積回路の設計, 黒田忠広 監訳, pp.245-296, 丸善(株), 2003.

(注2) 2011年11月時点当社調べ。

執筆者紹介



佐々木 剛 Takeshi Sasaki
デバイス社 電子部品・電子材料事業グループ
Electronic Components and Materials Business
Group, Industrial Devices Company



藤井 剛 Tsuyoshi Fujii
デバイス社 電子部品・電子材料事業グループ
Electronic Components and Materials Business
Group, Industrial Devices Company



吉内 茂裕 Shigehiro Yoshiuchi
デバイス社 電子部品・電子材料事業グループ
Electronic Components and Materials Business
Group, Industrial Devices Company



森仲 克也 Katsuya Morinaka
デバイス社 電子部品・電子材料事業グループ
Electronic Components and Materials Business
Group, Industrial Devices Company



中村 裕幸 Hiroyuki Nakamura
デバイス社 電子部品・電子材料事業グループ
Electronic Components and Materials Business
Group, Industrial Devices Company



山崎 稔夫 Toshio Yamazaki
デバイス社 電子部品・電子材料事業グループ
Electronic Components and Materials Business
Group, Industrial Devices Company