

〈一般研究課題〉 自動運転応用に向けた超高精度多軸真空
マイクロ加速度センサ

助成研究者 名城大学 畑 良幸



自動運転応用に向けた超高精度多軸真空 マイクロ加速度センサ

畑 良幸
(名城大学)

Ultra-Highly Accurate Multi-Axis Micro Accelerometer with Vacuum Sealing for Autonomous Vehicles

Yoshiyuki Hata
(Meijo University)

Abstract :

We have been studying a ultra-highly accurate micro accelerometer for autonomous vehicles. Our methods for achieving high accuracy include reducing mechanical noise by vacuum sealing, ensuring responsiveness by force-rebalance control, and reducing cross-axis sensitivity by a fully-decoupled sensor structure. This paper summarizes the results of operational verifications of a 2-axis amplitude-modulation-type accelerometer that integrates vacuum sealing, the fully-decoupled sensor structure, and the force-rebalance control. By applying conventional force-rebalance control sensor system, the operation of 2-axis force-rebalance control in the fully-decoupled sensor structure and the simultaneous 2-axis acceleration detection were demonstrated. For sensor responsiveness, it was verified that both the conventional and our proposed force-rebalance control sensor systems improve responsiveness under vacuum conditions. Furthermore, both the force-rebalance control sensor systems achieved relatively low Allan deviation.

1. はじめに

自動運転車の研究開発が盛んに行われている。自動運転車はカメラや衛星測位等によって自己位置推定が行われるが、視界が悪化している際や衛星からの電波にマルチパスが生じている際は、加速度センサと角速度センサからなるIMU (Inertial Measurement Unit)による慣性航法が必要とな

る。このため、高度かつ高精度な自己位置推定に向けて、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術を用いたマイクロ加速度センサ及び角速度センサの高精度化が必要となる。このうち我々は、マイクロ加速度センサの高精度化の研究を行っている。マイクロ加速度センサの高精度化によって、移動量等の自己位置推定精度が向上すると考えられる⁽¹⁾。

マイクロ加速度センサは振幅変調型加速度センサと周波数変調型加速度センサ(共振型加速度センサ)に大別される。このうち振幅変調型加速度センサは、加速度印加時のセンサ構造の変位から加速度を算出する。我々は振幅変調型加速度センサの高精度化の手法として、メカノイズの低減、FR (Force Rebalance)制御による応答性の確保、完全デカップリングセンサ構造による軸間クロストークの低減、を提案している⁽²⁾。メカノイズとは、空気分子がセンサ構造に衝突することによって発生するノイズであり、センサ構造の質量を増大させることや真空化(高Q値化)によって低減できる⁽³⁾⁽⁴⁾。この中でも近年MEMSデバイスを真空封止するWLP (Wafer Level Packaging)が報告されていることから⁽⁵⁾⁽⁶⁾、我々は真空封止によるメカノイズの低減を図っている。振幅変調型加速度センサを真空封止した際、加速度印加時の過渡応答としてセンサ構造の自由振動が収束しにくく応答性が低下する。この課題に対してはFR制御を適用し、センサ構造の自由振動を抑制することで応答性を確保する。完全デカップリング構造は、多軸加速度センサにおいて一方向の軸に加速度が印加された際、他方向のセンサ構造の変位を抑制できるため、軸間クロストークを低減できる。また、FR制御の軸独立性も確保できる。

これまで、真空封止と完全デカップリングセンサ構造をともなった2軸振幅変調型加速度センサを作製し、FR制御が無い状態での2軸同時加速度検知を実証した⁽⁷⁾。また、クロストークを10 mGまで低減した。本稿では、FR制御による2軸同時検知を実証するため、従来のFR制御センサシステムを⁽⁸⁾、真空封止と完全デカップリングセンサ構造をともなった2軸振幅変調型加速度センサに適用し、動作検証と性能評価を行った。また、これまで提案及び動作実証してきた独自のFR制御センサシステムにおける性能⁽⁹⁾と比較し、まとめた内容について報告する。

2. センサ構造とセンサシステム

2.1 完全デカップリングセンサ構造

図1(a)に提案する完全デカップリングセンサ構造の模式図を示す⁽⁷⁾⁽⁹⁾。完全デカップリングセンサ構造は、加速度印加時の慣性力によって変位するマス、マスの変位をフレームに伝達するストレートビーム及びフォールデッドビームからなる。フレームには差動容量検知のため軸対称に変位検出電極が接続されており、FR制御が無い場合はこの変位検出電極の差動静電容量変化から加速度を検知することができる。

図1(b)に例としてY軸方向に加速度が印加された際の変形模式図を示す。Y軸方向に加速度が印加された場合、Y軸フォールデッドビームが変形することによってY軸フレームが変位し、Y軸の変位検出電極が変位する。その際、Y軸ストレートビームも変形するためX軸フレームは変位せず、X軸の変位検出電極は変位しない。このように完全デカップリングセンサ構造は、加速度が入った軸のみの変位検出電極が変位するため、軸間のクロストークを低減することができる。

メカノイズ N_{MECH} の大きさは以下の式によって表すことができる。

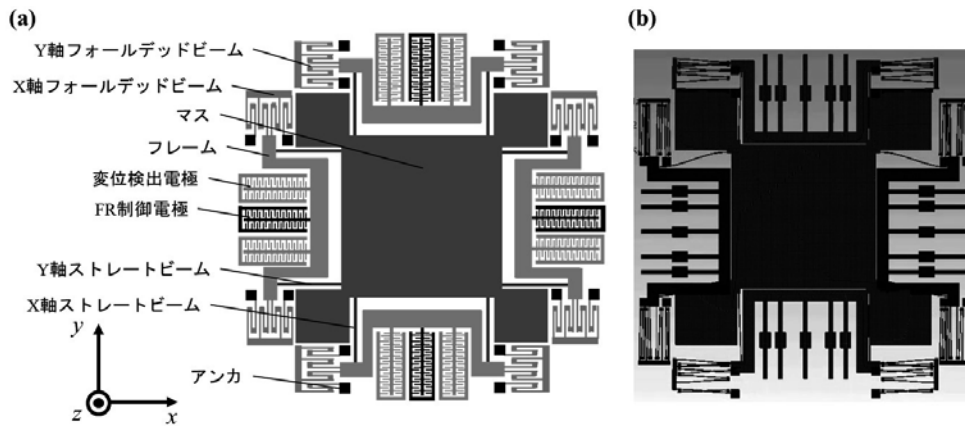


図1 (a) 完全デカップリングセンサ構造の模式図 (b) Y軸加速度に対する変形模式図

$$N_{MECH} = \sqrt{\frac{4k_B T \omega_n}{mQ}}$$

ここで k_B はボルツマン定数、 T は温度、 ω_n はセンサ構造の共振角周波数、 m はマスの質量、 Q は振動 Q 値を示す。このように、真空封止を行うことによって Q 値を高くし、メカノイズを低減することができる。

図2に完全デカップリングセンサ構造の作製フローを示す⁽²⁾。センサ構造は40 μm 厚のSiデバイス層をもつSOI (Silicon on Insulator)基板から作製される(図2(a))。最初にスパッタリング及びウェットエッチングによって、500 nm厚のAl電極が形成される(図2(b))。次に、DRIE (Deep Reactive Ion Etching)によってデバイス層にセンサ構造が形成される(図2(c))。最後にVapor HFエッチングによって、BOX (Buried Oxide)層が一部除去され、センサ構造はハンドル層からリリースされる(図2(d))。完全デカップリングセンサ構造の作製例を図3に示す。図3(a)のセンサ構造Aは変位検出電極の位置がフレームに対して内側に配置されている点が図3(b)のセンサ構造Bと異なるが、ともに20℃下で想定 Q 値を1000としたときのメカノイズが0.05 $\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度となるように設計した。

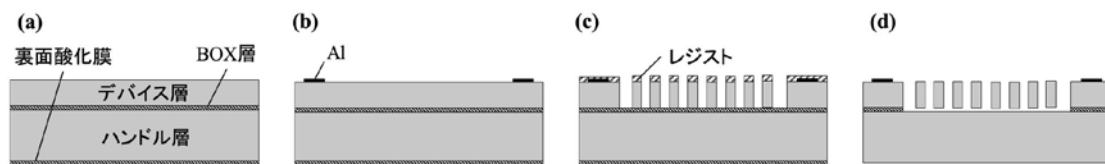


図2 完全デカップリングセンサ構造の作製フロー
(a) 基板準備 (b) Al電極形成 (c) センサ構造形成 (d) センサ構造のリリース

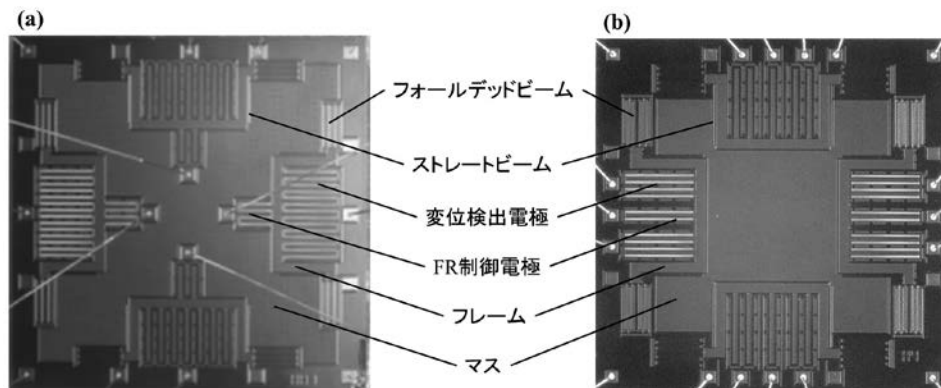


図3 完全デカップリングセンサ構造の作製例 (a) センサ構造A (b) センサ構造B

2.2 FR制御センサシステム

FR制御センサシステムの概念図を図4に示す。前述のとおり、FR制御を適用しない通常の振幅変調型加速度センサは、加速度が印加された際に慣性力によってセンサ構造が変位し、変位検出電極の差動容量が変化する。FR制御センサシステムにおいては、この差動容量変化がゼロになるように、フィードバック制御によってFR制御電極に制御電圧を与え、静電力を発生させる。すなわち、加速度印加による慣性力を静電力によって打ち消し、センサ構造の変位を抑制する。このとき、センサ出力は制御電圧となる。FR制御を用いることによって、真空化によって高Q値になっても自由振動を抑制することができ、応答性を向上させることができる。

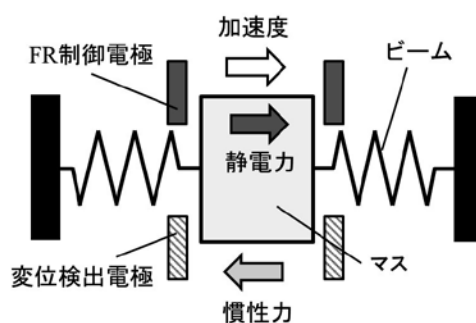


図4 FR制御センサシステムの概念図

多軸化可能なFR制御センサシステムを図5に示す。図5(a)に示す従来のFR制御センサシステムAでは⁽⁸⁾、X軸とY軸の変位検出電極に周波数の異なる参照信号を与え、マスに容量－電圧変換回路であるチャージアンプ回路を接続する。X軸/Y軸それぞれの変位検出電極の差動ペアに180°位相が異なる参照信号を与えることによって、差動容量検知となる。チャージアンプ回路からの差動電

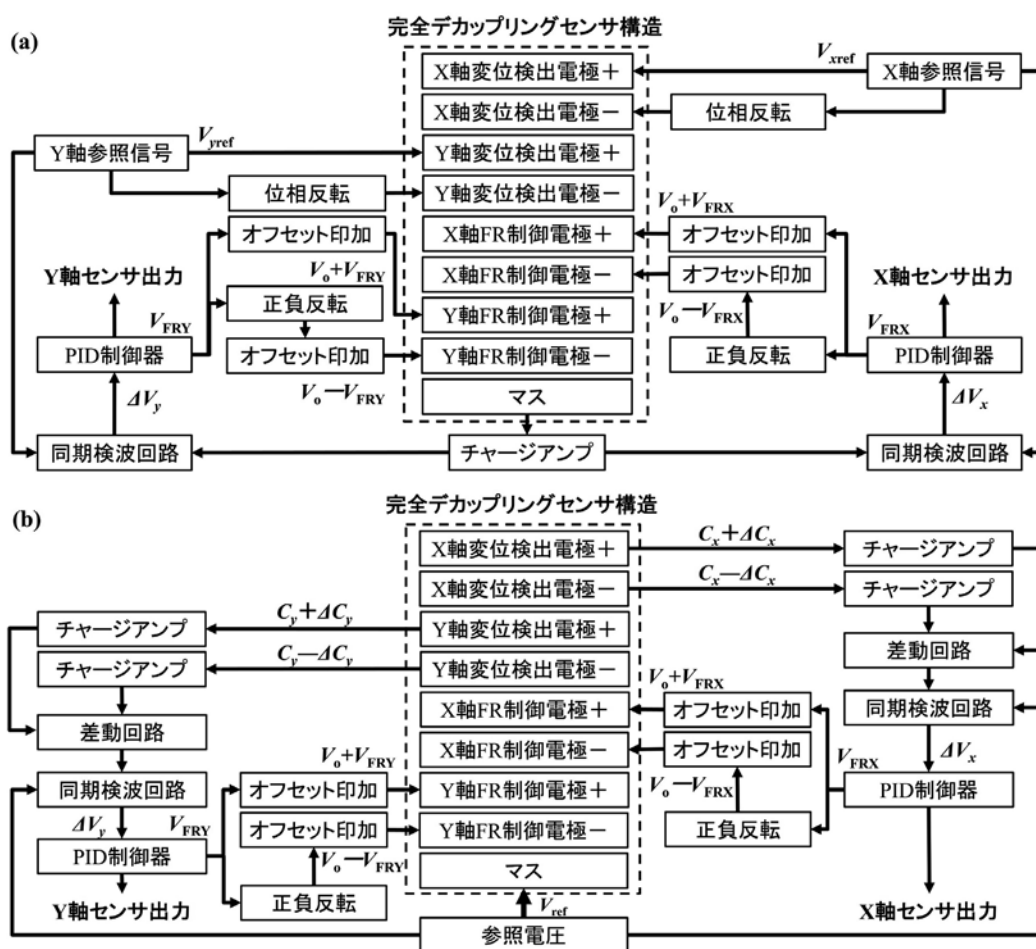


図5 (a) FR制御センサシステムA (b) FR制御センサシステムB

圧信号は、X軸/Y軸それぞれの参照信号と同期検波することによってX軸/Y軸の差動電圧変化を読みだす。PID制御器ではX軸/Y軸の差動電圧変化をゼロに保つように、X軸/Y軸のFR制御電極に制御電圧が印加される。図5(b)に示す我々が提案するFR制御センサシステムBでは⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、マスに単一の参照信号を与え、X軸/Y軸それぞれの変位検出電極にチャージアンプ回路を接続する。X軸/Y軸それぞれの差動電圧信号が、X軸/Y軸それぞれの同期検波回路に入力され、加速度印加時のX軸/Y軸の差動電圧変化をゼロに保つように、PID制御器によってX軸/Y軸のFR制御電極に制御電圧が印加される。変位検出電極とPID制御電極を一体化したセンサ及びシステムに比べ⁽⁸⁾、我々の完全デカップリングセンサ構造はこれらを分割しているため、いずれのFR制御センサシステムにおいても変位検出信号とPID制御信号の干渉を低減できると考えられる。

3. 実験

3.1 実験方法

同期検波やPID制御のため、これらが組み込まれたロックインアンプ(MFLI 500k, Zurich Instruments Ltd.)を用いてFR制御センサシステムを構築した。2軸同時FR制御の構築に関しては、ロックインアンプ1台で構成可能なFR制御センサシステムA(図5(a))を用いた。センサデバイスはセンサ構造B(図3(b))を用

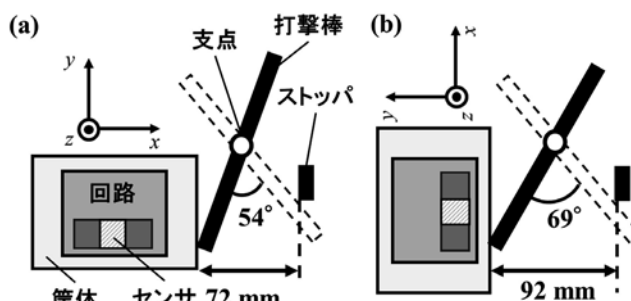


図6 応答性の評価方法 (a)X軸 (b)Y軸

いた。参照電圧は300 mV_{pk}とし、X軸とY軸の周波数はそれぞれ199 kHzと151 kHzとした。同期検波のローパスフィルタのカットオフ周波数は200 Hzとした。FR制御電極のオフセット電圧は5 Vとした。センサ座標系におけるZ軸まわりに30°ずつ静的に回転させることによって、X軸とY軸に加速度を同時に印加し、センサ出力を測定した。また、ノイズ特性を評価するためセンサを水平に置き、加速度0 G状態におけるセンサ出力を測定することによってアラン分散を導出した。さらに、打撃棒を指定の高さから離すことによって各軸方向に衝撃を与え、センサ出力を加速度換算した値が10 mG以下に収束するまでの時間を求めた(図6)。FR制御を適用しないオープンループ時の応答性と比較評価した。

3.2 実験結果

図7(a)に回転角度に対するセンサ出力の測定結果を示す。X軸とY軸2同時に出力電圧であるFR制御電圧を得ることができたことから、完全デカップリングセンサ構造におけるFR制御動作を確認することができた。図7(b)(c)に回転角度を加速度に換算したときの各軸のセンサ出力を示す。X軸とY軸の感度はそれぞれ4.4 V/Gと4.8V/Gであった。X軸とY軸の非直線性はそれぞれ1.2%と1.4%であった。X軸に1 Gの加速度が加わった際のY軸センサ出力と、Y軸に1 Gの加速度が加わった際のX軸センサ出力として軸間クロストークを評価した結果、18~20 mGであった。

図8にアラン分散の測定結果を示す。メカノイズと電気ノイズ含むノイズ特性を1 s時のアラン分散値から読み取った。X軸とY軸の1秒時のアラン分散はそれぞれ31 μGと27 μGであった。

図9に応答性評価の比較結果を示す。X軸においてはオープンループ時の340 msに対して(図

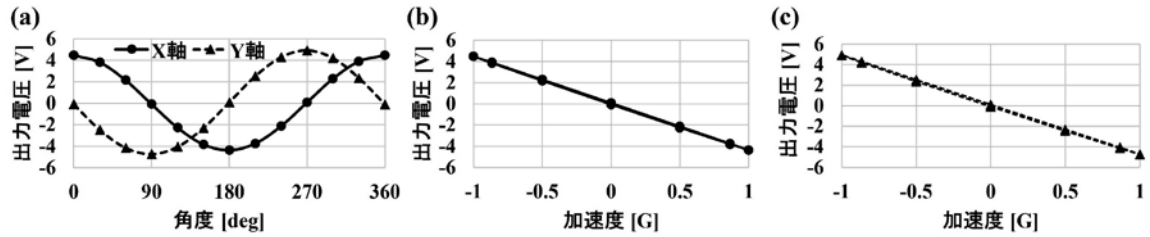


図7 センサ出力

(a)回転角度に対する出力 (b) 印加加速度に対するX軸出力 (c)印加加速度に対するY軸出力

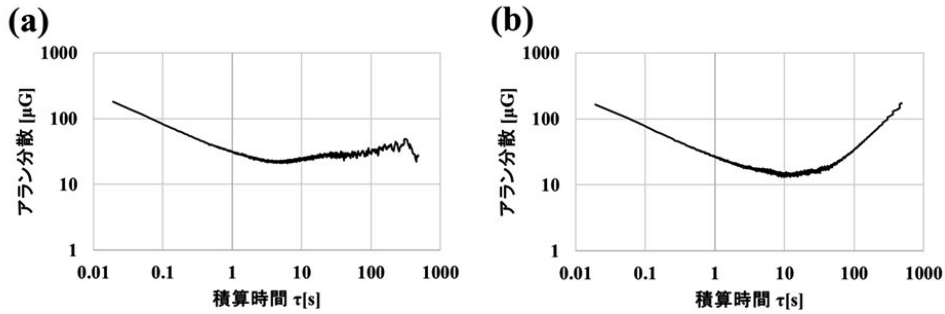


図8 アラン分散の測定結果 (a)X軸 (b)Y軸

9(a))、FR制御時は 5 msとなった(図9(b))。Y軸においてはオープンループ時の640 msに対して(図9(c))、FR制御時は 93 msとなった(図9(d))。完全デカップリングセンサ構造にFR制御センサシステムを適用することによって応答性を向上できることを実証した。

3.3 考察

FR制御センサシステムBにおいても同様の実験を行った(ただし、参照電圧の周波数はX軸Y軸ともに450 kHz)⁽⁹⁾。FR制御センサシステムBは単一のロックインアンプによる2軸同時FR制御がで

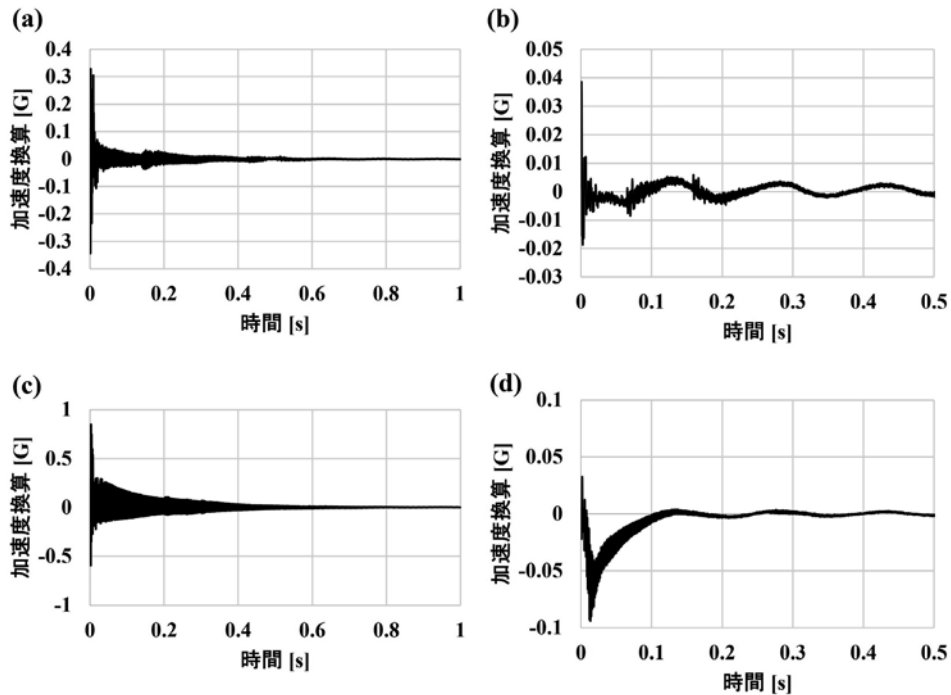


図9 応答性の評価結果

(a) オープンループ時のX軸出力の過渡波形 (b) FR制御時のX軸出力の過渡波形
(c) オープンループ時のY軸出力の過渡波形 (d) FR制御時のY軸出力の過渡波形

表1 FR制御センサシステムの性能比較

	FR制御センサシステムA			FR制御センサシステムB		
	X軸	Y軸	両軸の平均値	X軸	Y軸	両軸の平均値
感度	4.4 V/G	4.8 V/G	4.6 V/G	4.5 V/G	5.1 V/G	4.8 V/G
非直線性	1.2%	1.4%	1.3%	1.5%	1.0%	1.3%
1秒時のアラン分散値	31 μ G	27 μ G	29 μ G	27 μ G	25 μ G	26 μ G
応答性	5 ms	93 ms	49 ms	48 ms	85 ms	67 ms

きないため、1軸ごとにFR制御センサシステムを構築した。表1にFR制御センサシステムAとBにおけるX軸とY軸の性能(感度、非直線性、1秒時のアラン分散値、応答性)をまとめる。FR制御センサシステムAのX軸の応答性以外では、FR制御センサシステムAとBにおいて同等の性能となった。1秒時のアラン分散値は30 μ G程度と低いノイズ特性となった。この値からホワイトノイズのPSD (Power Spectral Density)は30 μ G/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 程度と近似的に求めることができる。メカノイズの設計値0.05 μ G/ $\sqrt{\text{Hz}}$ に対して大きい値となった要因は、電気ノイズが支配的であるためと考えられる。将来的にはチャージアンプ回路やFR制御センサシステムのIC化によって改善できると考えられる。また、現段階ではFR制御センサシステムAとBは同等の性能であるが、IC化したときはFR制御センサシステムBのほうが単一の参照電圧を用いていることから参照電圧同士の干渉を低減でき、アラン分散や軸間クロストークを低減できると考えられる。応答性に関してはアナログPID制御回路を構築することによって更なる応答性の改善が期待できる。

4. まとめ

振幅変調型加速度センサの高精度化に向けて、真空化によるメカノイズの低減、FR制御による応答性の確保、完全デカップリングセンサ構造による軸間クロストークの低減を図っている。本稿では、真空封止と完全デカップリングセンサ構造をともなった2軸振幅変調型加速度センサにFR制御センサシステムを統合させたときの動作検証結果をまとめた。FR制御センサシステムAを適用させ、完全デカップリング構造における2軸同時FR制御センサシステムの動作と2軸同時加速度検知を実証することができた。また、FR制御センサシステムによって真空下においても応答性を改善できることを示した。アラン分散によるノイズ特性評価においては、FR制御センサシステムAとBともに比較的低いアラン分散値を得ることができた。今後、回路及び制御系のIC化による電気ノイズの低減、アナログ回路を用いたPID制御器の構築によって更なる応答性の向上が期待できる。

謝辞

本研究におけるセンサデバイスは一部、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業の支援を受け、豊田工業大学、東北大学、京都大学にて作製した。また、DRIE加工に関し、東北大学・田中秀治研究室よりご助言を頂いた。ここに謝意を表します。また、本研究を遂行するにあたり、川野遥暉さんの当研究室における研究活動に感謝いたします。

参考文献

- (1) A. Takanose, K. Kondo, Y. Hoda, J. Meguro, and K. Takeda, “GNSS/IMU Performance Improvement Based on Acceleration Error Estimating Using Height Variation”, The 15th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC’ 22).
- (2) 武田悠吾, 川野遥暉, 畑良幸, “高精度化に向けたForce Rebalance制御とデカップリング構造をともなった高Q値2軸加速度センサの構想提案と検証デバイスの作製”, 令和5年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, pp.43-47 (2023).
- (3) D. Yamane, T. Konishi, T. Matsushima, K. Machida, H. Toshiyoshi, and K. Masu, “Design of Sub-1g Microelectromechanical Systems Accelerometers”, Applied Physics Letters, Vol.104, 074102 (2014).
- (4) Y. Kamada, A. Isobe, T. Oshima, Y. Furubayashi, N. Sakuma, C. Takubo, Y. Tainaka, K. Watanabe, K. Mori, N. Mori, H. Kazama, A. Matsumoto, and T. Sekiguchi, “A Low-Cost, 30 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$ Noise Floor MEMS Accelerometers for Large Sensor Network”, 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp.936-939 (2018).
- (5) Y. Suzuki, V. Dupuit, T. Kojima, H. Suzuki, and S. Tanaka, “Silicon Migration Seal for Wafer-Level Vacuum Encapsulation”, 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp.994-997 (2020).
- (6) T. Akashi, H. Funabashi, H. Takagi, Y. Omura, Y. Hata, “Wafer-Level Hermetic Vacuum Packaging by Bonding with a Copper-Tin Thin Film Sealing Ring”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 28, 044002 (2018).
- (7) 川野遥暉, 武田悠吾, 畑良幸, “高精度化に向けた真空封止とデカップリング構造をともなった振幅変調型加速度センサの動作検証”, 令和6年電気学会全国大会, 3-114, pp.162-163 (2024).
- (8) T. Köse, Y. Terzioğlu, K. Azgin, and T. Akin, “A Single Mass Two-Axis Capacitive MEMS Accelerometer with Force Rebalance”, 2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)(2015).
- (9) 川野遥暉, 武田悠吾, 石井颯太, 畑良幸, “真空封止とデカップリング構造をともなったForce Rebalance制御式2軸加速度センサ”, 第41回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 26A2-D-4 (2024).
- (10) 畑良幸, 佐原裕樹, 鈴木一輝, 原田翔太, “加速度センサ装置”, 特許第7681855号, 2025.5.15.