静電容量検出型集積化 MEMS 慣性センサの固有振動数設計

正員 鄭 希元* 正員 出川 宗里* 正員 後藤 康*

Natural Frequency Design for an Integrated Capacitive MEMS Inertial Sensor

Heewon Jeong*, Member, Munenori Degawa*, Member, Yasushi Goto*, Member

(2011 年 2 月 17 日受付, 2011 年 5 月 20 日再受付)

A capacitive microelectromechanical systems (MEMS) inertial sensor that is able to measure an acceleration and angular rate (rotation) simultaneously has been developed. Integration is the only practical approach to realizing low-cost and small-size sensors, largely because both assembling and aligning tasks for individual sensors such as for accelerometers and gyroscopes are eliminated. In this paper the developed sensor shares mechanical parts such as seismic masses and suspensions as well as electrical parts such as a capacitive-voltage conversion circuits for measuring different inertial information such as acceleration and angular rate. We report the design scheme for the natural frequencies of the inertial sensor element with which the mechanical parts and detection circuits are shared for a specific application such as for a vehicle electronic stability control system. This design scheme can also be applied for a device that contains peripheral circuits on the sensor element as well.

キーワード : 集積化慣性センサ, 角速度センサ, 加速度センサ, メムス, 自動車横滑り防止システム

Keywords : Integrated inertial sensor, Angular rate sensor, Accelerometer, MEMS, Electronic stability control system

1. まえがき

物体の姿勢や運動を測定する加速度センサと角速度センサは, MEMS (Microelectromechanical systems) 技術の進歩と共に小型化, 低コスト化が可能となった。それに伴い, 個人情報端末や携帯電話を始めとする民生分野, ロボット分野, エアバックと安全走行制御などの自動車分野にいたる幅広い分野にわたって普及されるようになった。

また, アプリケーションの複雑化や多様化とともに加速度センサと角速度センサの集積化及び複合化要求も強く, 最近では加速度と角速度を同時に検出する多軸慣性センサ (IMU: Inertial measurement unit) が多くの分野で望まれている⁽¹⁾。

MEMS 型多軸慣性センサとしては, 加速度センサと角速度センサを一つのパッケージに実装することで多軸の慣性情報を出力する方法⁽²⁾, 一つのチップ上に加速度検知部と角速度検知部を夫々形成し, 信号処理回路を共有する方法⁽³⁾, そして, 一つの振動系から信号処理によって加速度と角速度を分離出力する方法が知られている⁽¹⁾⁽⁴⁾。ここで, 一つの振動系から信号処理によって多軸の慣性情報を検出する方法が最も小型化に有利と言える。しかし, 適用するアプリ

ケーションによっては設計や製造プロセスの複雑さ, 耐久・信頼性における課題が多く, 三つの方法が用途に応じで採用されている状況である。

振動系及び検出回路を共有しながら複数の慣性量を計測する集積化センサの場合, トレードオフとなる設計パラメータが多い。そのため, センサを設計する際には測定する各慣性量におけるスケールファクターを明確にし, 基準となる設計パラメータや, 使用環境, 製造及び信号処理上の制限を考慮する必要がある。

多軸の慣性情報を必要とする一つの応用例として, 自動車の横滑り防止システム (ESC: electronic stability control system) がある。このシステムは, 操舵角情報と自動車にかかる角速度 (回転), 加速度などの情報を比較することで車の横滑りを判定し, その結果から, 主に四輪それぞれの制動力を制御することで車両を適正な走行状態に保つシステ

Table 1. Typical inertial sensor key specifications for ESC⁽⁶⁾⁽⁷⁾

Parameter	Accelerometer	Gyroscope
Range	± 2 g	$\pm 75 \sim \pm 100$ deg/s
Non-linearity	$< 2\%$	$< \pm 0.5\%$
Frequency response	DC~400 Hz	-
Scale factor error	-	$\pm 3\%$
Total offset	-	± 3 deg/s
Operational temperature	-40 ~ 85°C	

* (株) 日立製作所 中央研究所
〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280
Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.
1-280, Higashi-koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8601, Japan

ムである⁽⁵⁾。ESC システムに使われる加速度センサと角速度センサの主な仕様を表 1 に示す。

本研究では, 表 1 の仕様を満足する静電容量検出型集積化 MEMS 慣性センサの振動系の設計と, その評価結果について報告する。なお, 本センサは 1 軸の加速度と 1 軸の角速度を同時に検出することができる。

2. 加速度センサと角速度センサの原理

〈2・1〉 加速度センサのスケールファクター MEMS 型加速度センサとしては, ピエゾ抵抗型⁽⁸⁾や圧電型, 静電容量型がある。圧電型加速度センサはその原理上傾斜や重力など静的な加速度が測定できない問題があり⁽⁹⁾, ピエゾ抵抗型加速度センサは温度特性と消費電力に課題がある⁽¹⁰⁾。さらに, 駆動源としては使えないため常に加振させる必要がある角速度センサとの集積化には使えない。

本研究では, 傾斜など静的な加速度の測定, 角速度センサとの集積化及び処理回路との集積化にも有利である⁽¹¹⁾静電容量型を選択した。図 1 に静電容量型加速度センサの動作原理を示す。質量 m_y に加速度 a が印加されたとき発生する変位 y_a を静電容量の変化として検出する静電容量型加速度センサは, 質量となる可動部 m_y とばね k_y , ダンパ c_y , そして二つの差動容量 C_1 , C_2 として構成される。

図 1(a)に示す加速度検出振動系の挙動は静的平衡条件から(1)式の関係式を満足する。この(1)式を変位 y_a と加速度 a の関係式に書き直して整理すれば(2)式が得られ, 変位 y_a は印加された加速度 a に比例し, 加速度検出振動系の固有角振動数 ω_a の二乗に反比例することが分かる。

$$F = m_y a = k_y y_a \quad (1)$$

ここで, a は印加された加速度, y_a は変位である。

$$y_a = \frac{m_y}{k_y} a = \frac{1}{\omega_a^2} a \quad (2)$$

ここで, ω_a は加速度検出振動系の固有角振動数である。

加速度検出振動系のスケールファクター S_a を入力加速度 a における発生変位 y_a として定義すれば, (3)式に示すように感度 S_a は固有角振動数 ω_a の関数となる。

$$S_a = \frac{y_a}{a} = \frac{1}{\omega_a^2} \quad (3)$$

Fig. 1. Principle of capacitive detection accelerometer

図 1(b)には, 加速度 a の印加によって生じた変位 y_a を測定して出力する差動検出型容量-電圧変換 (Capacitive-Voltage Converter) 回路を示す。変位 y_a の発生によって容量が減るコンデンサ C_1 と増えるコンデンサ C_2 に搬送波を印加し, 差動検出することで印加された加速度 a に比例した出力電圧 V_o が得られる。

変位 y_a によって発生する静電容量の変化 ΔC と差動検出回路から得られるセンサ出力 V_o はそれぞれ(4)式と(5)式の関係となる。

$$\Delta C = C_1 - C_2 = \frac{2\epsilon A y_a}{g^2 - y_a^2} \quad (4)$$

ここで, g は静電容量を形成する電極の間隔, A は C_1 と C_2 の対向面積, ϵ は空気誘電率である。

$$V_o = \frac{\Delta C}{C_f} V_c \quad (5)$$

ここで, C_f は参照容量, V_c はキャリア電圧である。

〈2・2〉 角速度センサのスケールファクター 角速度センサの動作原理を図 2 に示す。静電引力により発生する駆動力 F_d によって励振素子 m_0 が駆動方向 (x 方向) に加振される。このとき検出ばね k_y によって励振素子 m_0 と連結されるコリオリ素子 m_y も励振素子 m_0 の動きに従って振動する。

この状態で z 軸周りの角速度 Ω が印加されると, 振動している励振素子 m_0 とコリオリ素子 m_y には駆動方向 (x 軸) と角速度が印加された軸 (z 軸) 夫々に直交する検出方向 (y 軸) にコリオリ力 F_c が発生する。これによりコリオリ素子 m_y は印加された角速度 Ω の大きさに比例して検出方向に変位する。その変位量 y_Ω を加速度センサと同様に静電容量の変化として検出し, 出力することで印加された角速度 Ω が検出できる。

角速度センサにおいても, 加速度センサ同様入力される角速度 Ω によって発生する y 方向の変位 y_Ω をスケールファクター S_Ω として定義することができる。図 2 に示す角速度センサは駆動系と検出系の二つの振動系として構成され, ニュートンの第 2 運動法則から誘導される運動方程式はそれぞれ(6)式と(7)式の形となる。

$$m_x \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = F_d \cos \omega_x t \quad (6)$$

ここで, $m_x = m_0 + m_y$, c_x は x 方向の減衰係数, k_x は x 方向ば

Fig. 2. Principle of angular rate sensor (gyroscope)

ね定数, F_d は駆動力, ω_x は駆動方向 (x 方向) の固有角振動数である。

$$m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = F_c \quad (7)$$

ここで, c_y は y 方向の減衰係数, k_y は y 方向のばね定数, F_c はコリオリ力である。

コリオリ力 F_c はコリオリ素子の質量 m_y とコリオリ素子の振動速度 $\dot{x}$, そして印加される角速度 Ω との関係式として (8) 式のように定義される。

$$F_c = -2m_y \Omega \dot{x} \quad (8)$$

高感度化を目的に駆動振幅 x を大きくするため, 駆動角振動数 ω_d を駆動系の固有角振動数 ω_x に一致させている場合が多く, 駆動振幅 x は (9) 式のように整理できる。

$$x = \frac{F_d}{k_x} Q_x \cos(\omega_d t) \quad (9)$$

ここで, Q_x は駆動系の機械品質係数である。

さらに, コリオリ力 F_c によって発生する検出方向の振幅 y_Ω は (10) 式の関係となる。

$$y_\Omega = \frac{F_c}{k_y} \frac{1}{\left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega_d}{\omega_y} \right)^2 \right]^2 + \left[\frac{1}{Q_y} \frac{\omega_d}{\omega_y} \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (10)$$

ここで, ω_y は検出系の固有角振動数, Q_y は検出系の機械品質係数である。

角速度センサのスケールファクター S_Ω は (8) 式と (9) 式を (10) 式に代入し, 入力角速度 Ω と検出変位 y_Ω の関係式に整理することで (11) 式となる。

$$S_\Omega = \left| \frac{y_\Omega}{\Omega} \right| = \frac{1}{k_x k_y} \frac{2m_y \omega_d F_d Q_x}{\left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega_d}{\omega_y} \right)^2 \right]^2 + \left[\frac{1}{Q_y} \frac{\omega_d}{\omega_y} \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (11)$$

変位 y_Ω によって発生する静電容量の変化 ΔC と差動検出によって得られるセンサ出力 V_0 は加速度センサ同様に (4) 式と (5) 式との関係から得られる。

3. 集積化 MEMS 慣性センサの固有振動数設計

〈3・1〉 音叉型角速度センサ 信号処理によって加速度の影響を相殺することで, より高精度な角速度が検出できる音叉型角速度センサが知られている⁽¹²⁾。このセンサは二つの錘とこれらを連結するばねとして構成され, 2 自由度の振動系となる。図 3 は本研究で開発した音叉型慣性センサの構造図である。

音叉を構成する二つの錘は駆動回路によって逆相モードに加振される。この状態で角速度が印加されると二つの錘は (8) 式, (10) 式の関係から駆動方向と直交する検出方向に互いに逆位相で振動する。この二つの錘の変位による静電

Fig. 3. MEMS vibratory tuning-fork gyroscope with decoupled driving and sensing oscillation modes

Fig. 4. Block diagram of signal processing integrated circuits

容量の変化を差動検出することで加速度による同相変位成分は相殺され, 角速度による逆相変位成分のみが出力される。

音叉型角速度センサを用いれば信号処理によって印加された加速度成分を出力することもできる。図 4 は, 角速度と同時に加速度も検出できる信号処理回路のブロック図である。音叉を構成する二つのコリオリ素子の変位は夫々検出容量 CA1 と CA2, CB1 と CB2 を差動検出することで測定することができる。

角速度入力による二つのコリオリ素子の変位は互いに逆相であり, 加速度入力の場合には同相となるため, CA と CB の信号の差分をとることで印加された角速度に比例した信号が得られ, 加算すれば加速度に比例した信号が検出できる。

〈3・2〉 音叉型慣性センサの固有振動数設計 振動系と検出回路を共有しながら加速度と角速度を同時に検出するためには, 表 1 に記載する加速度及び角速度の測定レンジ (最大検出範囲) に対して夫々同じ大きさの出力信号が得られることが望ましい。即ち, 測定レンジに相応する加速度及び角速度の入力に対して (4) 式と (5) 式によって求められる容量変化 ΔC が夫々等しければ, それに相当する信号出力 V_0 (加速度), V_0 (角速度) も同じ大きさとなる。結果

的に、振動系のブラウンノイズや回路系のジョンソンノイズなどに起因する全体ノイズと入力信号の比として規定される SNR (signal to noise ratio) を両方とも最大にすることができる。

加速度と角速度入力による変位量は(2)式と(10)式によって夫々求められる。さらに、振動系を共有しているため加速度センサと角速度センサの振動系の固有角振動数 ω_y は必然的に同じになる。従って、加速度と角速度検出が共に最大の SNR を得るためには、角速度と加速度の最大検出範囲における振動系の変位量が等しくなればよい。(2)式と(10)式に、数式を簡単にするため $\omega_d = \omega_y$, $\omega_x = \omega_d$ を代入して整理すれば(12)式が得られる。

$$\frac{\Omega_m}{a_m} = \frac{1}{\omega_d} \frac{\left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega_d}{\omega_y} \right)^2 \right]^2 + \left[\frac{1}{Q_y} \frac{\omega_d}{\omega_y} \right]^2 \right\}^{1/2}}{2X} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 a_m は最大検出加速度範囲、 Ω_m は最大角速度検出範囲、 X は角速度センサの最大駆動振幅である。

角速度センサの駆動角振動数 ω_d と検出系の固有角振動数 ω_y はセンサのスケールファクター及び、応答性、バイアス安定性に影響を及ぼす重要なパラメータである⁽¹²⁾⁽¹³⁾。そのため、アプリケーションから要求される仕様に合わせて設計する必要があるが、どのケースにおいても、最大の SNR を得るためには(12)式を満足する必要がある。本研究では最大のスケールファクターを得るため、駆動角振動数 ω_d と検出系の固有角振動数 ω_y を一致させた方式を選択した。従って、(12)式は(13)式の形に単純化できる。

$$\frac{\Omega_m}{a_m} = \frac{1}{2Q_y X} \cdot \frac{1}{\omega_d} \quad \dots\dots\dots(13)$$

センサの応答周波数 f_B は(14)式⁽¹⁴⁾に示すように振動系の機械品質係数 Q_y と検出系の固有角振動数 ω_y の関係式として定義することができる。従って、最大の SNR を満足する振動系の固有角振動数 ω_y は(13)式を(14)式に代入して整理することで(15)式の形として得られる。

$$f_B = \frac{1}{T_s} = \frac{\zeta_y f_y}{\log 20} \approx \frac{f_y}{6Q_y} \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 f_B は応答周波数、 f_y は検出系の固有振動数、 ζ_y は振動系の減衰定数、 T_s は静定時間である。

$$f_y = \sqrt{\frac{3f_B a_m}{2\pi\Omega_m}} \cdot \frac{1}{X} \quad \dots\dots\dots(15)$$

具体的な設計例として、表 1 に示す ESC システム向け慣性センサを想定した場合、最大検出角速度範囲が $\pm 100 \text{ deg/s}$ 、最大検出加速度範囲が $\pm 2g$ であるため、測定レンジ比 Ω_m/a_m は 0.089 となる。図 5 は、最大駆動振幅 X における検出系の固有振動数 f_y を示したグラフであり、10Hz と 20Hz の応答周波数 f_B における最大駆動振幅 X と検出系固有振動数 f_y の関係を示す。

Fig. 5. Relations with the maximum driving amplitude X and the natural frequency f_y with respect to the response frequencies f_B

Table 2. Key specifications of the developed inertial sensor

Parameter	Design	Measured
Drive mode frequency (f_d)	3.3 kHz	3.480kHz
Sense mode frequency (f_s)	3.3kHz	3.503kHz
Quality factor (Q_x)	400	366
Quality factor (Q_y)	30	25
Driving amplitude (X)	10 μm	10 μm @5V 300Pa
Frequency response (f_B)	20Hz	-

Table 3. Key dimensions of the sensor element described in Fig. 3

Parts	Dimensions
Driving suspension	Width: 4 μm , Length: 420 μm
Link suspension	Width: 4 μm , Length: 530 μm
Detection suspension	Width: 4 μm , Length: 450 μm
Mass of driving element	32 μg
Mass of detection element	28 μg

角速度検出に必要な最大駆動振幅 X を 10 μm に設定し、応答周波数 f_B を 20Hz とする ESC システム向け慣性センサを実現する場合、図 5 の結果から検出系の固有振動数 f_y は 3300Hz に設計する必要がある。ここで、最大駆動振幅 X は駆動に使用できる駆動電圧や、梁の線形性、電極の構造によるプールの構造などによって決まる。開発した音叉型慣性センサの設計仕様と試作品の評価結果及び、図 3 に示す重要部の寸法を夫々表 2 と表 3 にまとめた。

4. 音叉型慣性センサの評価

試作した MEMS エレメントを真空雰囲気中でスイープ加振させながら、LDV (laser Doppler vibrometer) を用いてその変位を測定することで固有振動数の評価を行った。評価結果を図 6 に示す。音叉構造となっているため、駆動方向には二つの錘が併進振動する同相モードとセンサの駆動モードである逆相モードが存在し、それぞれ約 2.6kHz と約 3.5kHz に観測された。

低い駆動電圧で大きな駆動振幅を得るためには振動系の駆動方向の機械品質係数 Q_x を高くする必要がある。その反

Fig. 6. Driving and sensing mode frequencies of MEMS element

Fig. 7. Quality factors under low pressure

Fig. 8. Maximum driving amplitude X as a function of driving voltage under 300Pa

面, 検出方向の機械品質係数 Q_y は(14)式の応答周波数によって制限されるため, 低く抑える必要がある。図 3 に示す音叉型慣性センサでは, 駆動方向にはスライドダンピングが主な減衰になるように設計し, 検出方向にはスクイーズダンピングが主な減衰になるように設計することで, Q_x と Q_y を調整した。

図 7 は減圧雰囲気下において駆動方向と検出方向の機械品質係数 Q_x と Q_y を評価した結果である。300Pa の減圧雰囲気

Fig. 9. Evaluation circuit boards for an inertial sensor

Fig. 10. Angular rate sensor input-output characteristics

Fig. 11. Acceleration sensor input-output characteristics

気下で Q_x と Q_y はそれぞれ 366 と 25 であり, 概ね目標とした機械品質係数が確認できた。

図 8 は駆動電圧を変えながら最大駆動振幅 X を測定した結果を示したグラフである。設計目標値である $10\mu\text{m}$ の駆動振幅は 300Pa の減圧雰囲気下で 5V の駆動電圧を印加することで得られた。

試作した MEMS エレメントは図 9 に示す C/V 変換部と初段のアンプおよびフィルタとして構成される C/V 変換基板に実装され, 同期検波回路と駆動制御回路, 信号処理回路を含む評価ボードを用いることでセンサとしての性能を評価した。図 9 に示す評価系を回転速度が制御できるターンテーブルに乗せ, 角速度と加速度の入力に対するセンサの出力特性を評価した結果をそれぞれ図 10 と図 11 に示す。

角速度センサと加速度センサのスケールファクターは夫々 $20\text{mV}/(\text{deg/s})$ と $1.1\text{V}/\text{g}$ であり, 出力の非線形性は両方

ともに $\pm 0.5\%$ FS (Full Scale) 以下であることが確認できた。加速度センサとしての入出力特性の評価には, ターンテーブルにセンサをセットし, 回転させることでプラスとマイナス方向の加速度を印加している。そのため, 図 11 のグラフには 2 本の線が重なった表記となった。非線形性のグラフに若干のヒステリシスが観測されているのは, ターンテーブルの角度誤差や角度を加速度に換算する際の換算誤差, センサ出力の再現性に起因するものと考えられる。しかし, 自動車の走行制御応用としては十分低い値であるため深い考察は行っていない。

5. まとめ

本論文では, 振動系と検出系及び検出回路を共有しながら加速度と角速度を同時に計測できる集積化 MEMS 慣性センサの設計手法を紹介した。具体的な設計例として 1 軸の角速度と 1 軸の加速度が同時に計測できる音叉型静電容量式慣性センサを開発し, 最大の SNR を得るための振動系の設計を行った。

最大の SNR を得るための基本的な発想としては, 計測する加速度及び角速度の最大入力範囲における変位量を等しくすることであり, この条件を満たすように振動系の固有振動数及び機械品質係数を設計することである。

謝 辞

本論文で紹介したセンサ評価基板の設計及び試作と評価の全般に関して, 元日立製作所の園部久雄氏にご協力いただきました。ここに謝意を表します。

文 献

- (1) K. Okada, T. Kakutani, Y. Matsu, Y. Watanabe, T. Mitsui, T. Mineta, and S. Sugiyama : "5-Axis Motion Sensor using SOI Wafer and the Design Method", *IEEJ Trans. SM*, Vol.126, No.6, pp.261-268 (2006-6) (in Japanese) 岡田和廣・角谷哲哉・松 良幸・渡部善幸・三井俊明・峯田 貴・杉山 進:「SOI ウエハを用いた 5 軸モーションセンサとその設計手法」, 電学論 E, Vol.126, No.6, pp.261-268 (2006-6)
- (2) R. Willing and M. Morbe : "New Generation of Inertial Sensor Cluster for ESP- and Future Vehicle Stabilizing Systems in Automotive Applications", 2003 SAE International, Paper 2003-01-0199
- (3) D. Cardarelli : "An integrated MEMS inertial measurement unit", IEEE Position Location and Navigation Symposium 2002, pp.314-319 (2002)
- (4) M. Nagao, et al. : "A Silicon Micromachined Gyroscope and Accelerometer for Vehicle Stability Control System", 2004 SAE International, Paper 2004-01-1113
- (5) Y. Shibahata, et al. : "Improvement of Vehicle Maneuverability by Direct Yaw Moment Control", *Vehicle system Dynamics*, Vol.22, No.5&6, pp.465-481 (1993)
- (6) N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi : "Micromachined Inertial Sensors", *Proceedings of the IEEE*, Vol.86, No.8, pp.1640-1659 (1998)

- (7) C. Akar, et al. : "Environmentally Robust MEMS Vibratory Gyroscopes for Automotive Applications", *IEEE Sensors Journal*, Vol.9, No.12, pp.1895-1906 (2009)
- (8) L. M. Roylance and J. B. Angell : "A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.ED-26, No.12, pp.1911-1917 (1979)
- (9) Y. Nemirovsky, et al. : "Design of a novel thin-film piezoelectric accelerometer", *Sensors and Actuators A*, Vol.56, pp.239-249 (1996)
- (10) K. Kunz, et al. : "Highly sensitive triaxial silicon accelerometer with integrated PZT thin film detectors", *Sensors and Actuators A*, Vol.92, pp.156-160 (2001)
- (11) H. Tokusaki, Y. Hirai, K. Sugano, T. Tsuchiya, and O. Tabata : "Component Modeling of 2DOF Comb Transducer for Equivalent Circuit Using Built-in Displacement Detection", *IEEJ Trans. SM*, Vol.130, No.9, pp.443-449 (2010-9) (in Japanese) 徳崎裕幸・平井義和・菅野公二・土屋智由・田畑 修:「自己変位検出機能を有する面内 2 自由度静電櫛歯トランスデューサの等価回路」, 電学論 E, Vol.130, No.9, pp.443-449 (2010-9)
- (12) J. Bernstein, et al. : "A Micromachined Comb-Drive Tuning Fork Rate Gyroscope", *IEEE Micro Electro Mechanical Systems 1993, MEMS'93*, pp.143-148 (1993)
- (13) M. F. Zaman, et al. : "A Mode-Matched Silicon-Yaw Tuning-Fork Gyroscope With Subdegree-Per-Hour Allan Deviation Bias Instability", *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.17, No.6, pp.1526-1536 (2008)
- (14) 足立修一:「MATLAB による制御工学」, pp.147-151 (2001)

鄭 希 元

(正員) 1971 年 10 月 8 日生。1994 年 3 月韓海洋大学修士課程卒業。2004 年 9 月東京工業大学博士課程卒業, 博士 (工学)。2004 年 10 月 (株) 日立製作所入社, 中央研究所計測システム研究部所属, 現在 MEMS センサの研究開発・主にマイクロ振動体構造設計に従事。日本機械学会, 精密工学会各会員。

出 川 宗 里

(正員) 1981 年 5 月 22 日生。2006 年 3 月早稲田大学理工学部修士課程修了。2006 年 (株) 日立製作所入社, 中央研究所計測システム研究部所属, 現在 MEMS センサの研究開発に従事・主に計測技術の開発に従事。精密工学会会員。

後 藤 康

(正員) 1965 年 5 月 2 日生。1990 年 3 月長岡技術科学大学修士課程修了。1990 年 4 月 (株) 日立製作所入社, 中央研究所にて ULSI 製造技術の研究開発に従事。現在, 同中央研究所にて MEMS・センサの研究開発に従事。応用物理学会会員。