ジャイロ型発電機の受動制御

高橋 智幸* 岩崎 淳* 保坂 寛*

Passive Control of Gyroscopic Power Generator

Tomoyuki Takahashi*, Jun Iwasaki* and Hiroshi Hosaka*

The gyroscopic power generator produces a high-speed rotation of magnets from low-frequency vibrations and supplies electric power to information and communication devices that use human vibrations in daily life. In this paper, in order to increase the stability and the output power of the generator, a simple equation that indicates the steady state approximate solution of phase difference is derived. From the derived solution, the phase difference of the precession angle is used as a margin factor of the stability. The control methods for the steady state and the transient state are then verified by the simulations. In an experiment to determine precession angle, a measurement method is developed in which the sensing coil is attached perpendicular to the generation coil and precession angle is obtained from the envelope of the coil voltage. In order to maintain the stability and high power generation for variable input vibrations, the impedance control method using the phase difference is developed and verified experimentally.

Key Words: Gyroscope, Power Generator, Vibration, Passive Control, Impedance Control

1. はじめに

情報通信デバイスの小型化により、人間およびあらゆる人工物、自然物にセンサを装着し、インターネット上で情報交換を行うユビキタス情報システムが実現しつつある。その課題の一つに、電源の確保がある。ユビキタスシステムでは多数のセンサや情報機器を用いるため、二次電池では充電の手間が膨大となり、一次電池では交換の手間と使用済み電池による環境問題が生じる。この解決策として、機器に発電機を内蔵し、携帯時や使用時に発電・充電を行う環境発電の研究が活発化している[1]。環境発電として有望なものは、振動、光、熱であり、これらはいずれも腕時計用に実用化されている[2]。このうち、振動による発電は、強制的な振動により大出力の緊急充電が可能、発電機を装着者の行動センサとして利用可能、かばんやポケットの中など使用場所の自由度が高いなどの利点がある。腕時計用の振動発電機では、手首の姿勢変化により偏心錘を回転させ、電磁誘導により数 μW の発電を行い、時計の消費電力 $1[\mu\text{W}]$ を賄っている[3]~[7]。その他、共振を用いて運動エネルギーを取り込み、静電誘導、圧電などにより電気エネルギーに変換する多数の振動発電機が試作されているが、携帯サイズの場合、出力はたかだか $1[\text{mW}]$ である。一方、一般の情報機器、例えば微弱無線では $10[\text{mW}]$ 、携帯電話では $1[\text{W}]$ 程度の電力が必要

であり、発電機の大幅な高出力化が必要となっている。

この解決のため、筆者らは、ジャイロ効果を用いて発電量を大幅に増大する発電機を開発している。回転体の自転と歳差運動を組み合わせ、入力振動の数十倍の自転運動を発生する機構が Archie L. Mishler により考案されている[8]。本機構は Dynabee という運動遊具に利用されてきたが、これに電磁誘導機構を組み込み、発電機として利用するものである。従来の発電機はいずれも内部のおもりの単振動を用いている。この場合、おもりから得られる仕事率は、質量 $\times$ 質点加速度 $\times$ 加振速度であり、人の振動では加速度、速度ともに小さいため発電量が小さい。一方ジャイロ型発電機では、自転するおもりの傾き振動を用いており、仕事率は、慣性能率 $\times$ 自転角速度 $\times$ 加振角速度の2乗で与えられる。自転が高速であれば、振動が微小でも仕事率は大きくなり、加振源からは、あたかもおもりの質量が増大したように感じる。

本機構については、Gulick らによる傾頭回転運動に対する定常運動解析[9]、筆者らによる振動発電機の試作と過渡応答解析の研究[10]~[12]が行われている。その結果、ジャイロ型発電機は $1[\text{W}]$ 程度と高出力が得られるが、安定性が低いことが明らかとなった。この解決策として、筆者らは発電機のコイルに外部から電流を流し、一時的に発電機をモータとして作用させる自己起動法を考案した[12]。しかしこの方法ではエネルギーを消費するため、発電機としての平均出力が低下する。そこで本研究では、受動素子のパラメータ制御のみで、エネルギーを消費することなく安定性を向上させる方法を提案する。以下ではまず、振動入力に対するロータの運動解析を行い、定常状態

原稿受付 2010 年 12 月 20 日

*東京大学

*The University of Tokyo

■ 本論文は学術的に評価されました。

の安定性指標として位相差を導出する。次に、位相差を用いて受動的に電磁誘導回路のインピーダンスを制御し、回転を安定化する方法を提案し、シミュレーションにより有効性を確認する。最後に実験により、本手法により発電量を6倍に増大した例を示す。

2. ロータ運動の解析

2.1 ジャイロ型発電機の構造と運動方程式

ジャイロ型発電機の構造を Fig. 1 に示す。y 軸回りに自転するロータがあり、その軸は上下二つのトラックにより支えられている。トラックの間隔はロータ軸の直径よりわずかに大きく隙間があり、ロータ軸は片方のトラック面とだけ接触する。ロータが自転しているときにトラックに x 軸回りの振動を加えると、角運動量の法則によりロータに z 軸回りのトルクが発生し、歳差運動を始める。また、ロータ軸は上下別々のトラックと接し、摩擦力は自転速度を増加させる方向に働く。ロータに磁石を取り付け、トラックの周りに発電コイルを巻き、電磁誘導により発電する。

振動入力に対するロータの運動方程式と定常状態の近似解は文献[11]で導かれている。本節でその概要を説明する。Fig. 1 で空間に固定された直角座標系を E 座標系とし、トラックは初期状態で E_1 , E_2 面内にあり、 E_2 軸回りに $\theta = \theta_0 \sin(\omega_0 t)$ で揺動回転するものとする。 θ_0 は入力振幅、 ω_0 は角周波数である。トラックに固定した座標系を e_t 座標系、ロータの歳差運動とともに回転する座標系を e 座標系とし、歳差回転角 (e_{t1} 軸と e_1 軸のなす角) を α 、自転角 (e_1 軸回りのロータの回転角) を γ とする。 E 座標系から見たロータの角速度ベクトル $\vec{\omega}_r$ は、 E 座標系から見たトラックの角速度 $\dot{\theta}\vec{E}_2$ 、 e_t 座標系から見たロータの歳差角速度 $\dot{\alpha}\vec{e}_{t3}$ 、 e 座標系から見たロータの自転角速度 $\dot{\gamma}\vec{e}_1$ の和であり、 $\vec{E}_2$ および $\vec{e}_{t3}$ を e 座標系で表すことにより、次式を得る。

$$\begin{aligned}\vec{\omega}_r &= \dot{\theta}\vec{E}_2 + \dot{\alpha}\vec{e}_{t3} + \dot{\gamma}\vec{e}_1 \\ &= (\dot{\gamma} + \dot{\theta}\sin\alpha)\vec{e}_1 + (\dot{\theta}\cos\alpha)\vec{e}_2 + \dot{\alpha}\vec{e}_3\end{aligned}\quad (1)$$

トラックとロータ軸の半径比を ξ とし、トラックとロータ軸の間にすべりがなければ、次式が成り立つ。

Fig. 1 Structure of the gyroscopic power generator

$$\dot{\gamma} = \xi \dot{\alpha} \quad (2)$$

式 (2) を式 (1) に代入して、 ω_r を α のみで表し、またロータには自転速度に比例する粘性トルク $\sigma\dot{\gamma}\vec{e}_1$ が働くものとして、 e 座標系において角運動量とトルクの関係式 (オイラー方程式) を立てると、次式を得る。

$$\begin{aligned}&\ddot{\alpha}(\xi^2 I_1 + I_2) + \xi I_1 \ddot{\theta} \sin\alpha + (I_2 - I_1) \dot{\theta}^2 \sin\alpha \cos\alpha \\ &+ \xi^2 \sigma \dot{\alpha} = 0\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、 I_1 はロータの軸周りの慣性能率、 I_2 は半径回りの慣性能率、 σ は減衰係数である。

式 (3) がロータの運動方程式であるが、非線形なため解析解は導出できない。そこで、定常状態ではロータの歳差運動とトラックの振動が同期し、またロータの自転速度 $\dot{\gamma}$ は一定と仮定して、定常状態における近似解を導出する。まず α と入力位相 $\omega_0 t$ の位相差 φ を次式で定義する。

$$\alpha = \varphi + \omega_0 t \quad (4)$$

式 (4) を式 (3) に代入し、入力振動の一周期 ($2\pi/\omega_0$) で積分平均し、さらに $\xi \gg 1$ を用いると、定常状態における φ の近似解 φ_0 が、次式のように求まる。

$$\cos\varphi_0 = \frac{2\xi\sigma}{I_1\omega_0\theta_0} \quad (5)$$

2.2 定常状態の安定性

式 (5) は定常状態を示すが、安定性まで保証するものではない。そこで本研究ではまず安定性を判定する。近似解 φ_0 の近傍の微小振動 ε を考える。

$$\alpha = \omega_0 t + \varphi_0 + \varepsilon \quad (6)$$

式 (6) を式 (3) に代入し、 ε について線形化すると次式を得る。

$$\begin{aligned}&\ddot{\varepsilon}(\xi^2 I_1 + I_2) + \dot{\varepsilon}\xi^2 \sigma \\ &+ \varepsilon \left[\xi I_1 \ddot{\theta} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \right. \\ &\quad \left. + (I_2 - I_1) \dot{\theta}^2 \{ \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) - \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) \} \right] \\ &+ \xi I_1 \ddot{\theta} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \xi^2 \sigma \omega_0 \\ &+ (I_2 - I_1) \dot{\theta}^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = 0\end{aligned}\quad (7)$$

ロータ回転は、定常回転、低周波で大振幅の過渡振動、高周波で微小振幅の定常振動から構成されることが先行研究ならびに次章で示されている。そこで過渡振動のみが安定性に寄与すると仮定し、またその周期は入力振動周期より十分長いことに着目して、式 (7) を入力振動の一周期 ($2\pi/\omega_0$) について積分平均し、 ε , $\dot{\varepsilon}$, $\ddot{\varepsilon}$ はその間一定とみなす。すると次式を得る。

$$\begin{aligned}&\ddot{\varepsilon}(\xi^2 I_1 + I_2) + \dot{\varepsilon}\xi^2 \sigma \\ &+ \varepsilon \left[\frac{1}{2} \xi I_1 \theta_0 \omega_0^2 \sin\varphi_0 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} (I_2 - I_1) \theta_0^2 \omega_0^2 \cos 2\varphi_0 \right] = 0\end{aligned}\quad (8)$$

第1項、第2項の係数は常に正である。もし第3項の係数が正であれば、系は安定な減衰振動系となる。第3項の係数を k と置き、変形すると次式を得る。

$$k = \frac{1}{2}(I_1 - I_2)\theta_0^2\omega_0^2\sin^2\varphi_0 + \frac{1}{2}\xi I_1\theta_0\omega_0^2\sin\varphi_0 - \frac{1}{4}(I_1 - I_2)\theta_0^2\omega_0^2 \quad (9)$$

これが正であるための条件は以下である.

$$\sin\varphi_0 > \frac{1}{2} \left\{ \frac{-\frac{I_1}{I_1 - I_2} \cdot \frac{\xi}{\theta_0}}{\sqrt{\left(-\frac{I_1}{I_1 - I_2} \cdot \frac{\xi}{\theta_0}\right)^2 + 2}} \right\} \quad (10)$$

式 (5) (10) が同時に成り立つことが, 安定な定常状態が存在する条件である. 実際の発電機のパラメータを用いて, 入力振幅の大きさを 0 [rad] から 0.524 [rad] の間で変化させると, 式 (10) の φ_0 の下限は 5.24×10^{-5} [rad] から 1.90×10^{-3} [rad] の間となり, はほぼ 0 [rad] とみなせる. また式 (5) の右辺はすべて正であるから, $\varphi_0 < \pi/2$ が必要である. したがって安定な定常状態の範囲は, 次式のように求まる.

$$0 < \varphi_0 < \pi/2 \quad (11)$$

次に, 安定性と発電量を最適化する条件を考える. 発電量 P は, 粘性減衰力がすべて電力になるとすれば次式で与えられる.

$$P = \sigma \dot{\gamma}^2 = \sigma \xi^2 \omega_0^2 \quad (12)$$

したがって発電量は σ が大きいほど大きくなる. しかし σ が大きすぎると式 (5) の右辺が 1 より大きくなり, 式 (5) を満たす φ_0 が存在しなくなる. したがって, 発電量が大きくかつ安定な系とするには, 式 (5) の右辺が 1, すなわち φ_0 が 0 となればよい. 式 (5) に含まれるパラメータのうち ξ , I_1 , I_2 は機構によって決定し, θ_0 , ω_0 は入力振動によって決定するため, 動作中に変化させることができない. 一方 σ はコイル巻数や負荷インピーダンスなど受動素子のインピーダンスにより変化させることができる. したがって, 動作中の φ_0 を測定し, φ_0 がなるべく小さくなるように σ を動的に変化させればよい. この方法によれば, エネルギー消費がないことに加え, φ_0 のみ測定すれば制御が行える. I_1 , θ_0 , σ などの機構および入力パラメータが不要なため, 正確な制御が容易である. φ_0 の測定方法は 3 章で述べる.

2.3 定常状態の制御可能性

式 (3) を数值的に解き, σ と θ_0 がゆっくり変化した場合のロータの運動特性を求めた. 機構および振動条件は 3 章の実験装置の値 $I_1 = 4.6 \times 10^{-5}$ [kgm²], $I_2 = 3.5 \times 10^{-5}$ [kgm²], $\xi = 32.9$, $\omega_0 = 4\pi$ [rad/s] とした.

Fig. 2 に, 入力振幅 θ_0 をゆっくり増減させた場合の φ の変化を示す. σ を一定 ($\sigma = 2.5 \times 10^{-6}$ [kgm²/s]) とし, θ_0 を点線のように変化させたところ, φ は実線のように変化した. θ_0 の増減に対応して φ が滑らかに変化し, θ_0 と φ が一対一の関係にあることが分かる. また θ_0 が小さく $\varphi < 0$ となると, φ は急激に減少している. これは, 安定回転が得られず, 失速したことを示す. なおここで与えた σ は, 実験装置における減衰と同程度の値である. **Fig. 3** に, σ をゆっくり増減させた場合の φ の変化を示す. θ_0 を一定 ($\theta_0 = \pi/9$ [rad]) とし, σ

Fig. 2 Change in φ when σ is constant and θ_0 changes slowly

Fig. 3 Change in φ when θ_0 is constant and σ changes slowly

を点線のように変化させたところ φ は実線のように変化した. Fig. 2 と同様に, σ と φ は一対一の関係にあり, $\varphi < 0$ では φ が急激に減少し失速している.

以上により, $\varphi > 0$ の範囲で σ と θ_0 がゆっくり変化する場合には, σ の変化により φ を任意の値に設定できること, および, $\varphi = 0$ が安定限界であることを確認できた. すなわち, 入力振動が変化しても, $\varphi = 0$ となるように σ を変化させれば, 系を安定かつ発電量最大に保つことができる.

2.4 過渡状態の制御可能性

入力振動が急変する場合には, 定常状態が安定であってもそこに至る過渡状態で不安定になる場合がある. 式 (3) を数值的に解き, 安定な場合と不安定な場合が存在することを確認した.

まず, φ , $\dot{\varphi}$ の初期値が定常解に近い場合, つまり定常状態にある発電機への入力振動をわずかに変え, 別の定常状態に移行する場合の過渡特性を計算した. $\theta_0 = 0.44$ [rad] の定常状態 $\varphi = 0.75$ [rad], $\dot{\varphi} = 0$ [rad/s] を初期値とし, $\theta_0 = \pi/9$ [rad] に入力振幅を階段状に変化させた場合の φ の時間変化を **Fig. 4** に, 位相平面上での φ , $\dot{\varphi}$ の関係を **Fig. 5** に示す. $\sigma = 2.8 \times 10^{-6}$ [kgm²/s] である. このときは φ , $\dot{\varphi}$ ともに一定値に収束し, 新たな定常回転に落ち着くことが分かる. 式 (5) による φ_0 の近似解は 0.42 [rad] であり, Fig. 4, Fig. 5 の収束値はこれと一致している. なお, 位相平面における細かい波は, 振動に同期した微小振動成分である.

Fig. 4 Change in φ when the rotor is stable Fig. 5 Phase plane of φ when the rotor is stable Fig. 6 Change in φ when the rotor is transiently unstable

次に φ , $\dot{\varphi}$ の初期値が定常解から大きくずれる場合、つまり入力振幅が大きく変化する場合の定常状態から別の定常状態への移行を計算した。 $\theta_0 = 0.59$ [rad] から $\theta_0 = \pi/9$ [rad] に変化させる場合を想定し、初期値 $\varphi(0) = 1.0$ [rad], $\dot{\varphi}(0) = 0$ [rad/s] として、Fig. 4, Fig. 5 と同様の計算を行った。Fig. 6 は φ の時間変化であり、振動せず単調に減少している。Fig. 7 は位相平面図であり、 φ , $\dot{\varphi}$ は渦巻きを描くことなく、第3象限で無限遠に延びている。これらは $\dot{\alpha} = 0$ すなわちロータが失速したことを示す。以上により、入力振動が急変する場合には、定常状態が安定であっても過渡的に不安定となり得ることが分かった。

次に、過渡的な不安定を回避する方法を提案する。式 (3) から過渡状態の安定条件を見出すことは難しいため、定常状態の

Fig. 7 Phase plane of φ when the rotor is transiently unstable Fig. 8 Change in φ when σ decreases at the point denoted by the circle Fig. 9 Phase plane of φ when σ decreases at the point denoted by the circle

安定化法を流用する。定常状態では、 $\varphi = 0$ が安定限界であり、また、 σ が小さいほど安定性が向上する。そこで、過渡状態においても、 φ が 0 に近づいたところで $\sigma = 0$ とする安定化制御を試みる。

初期条件として、過渡的に不安定となる条件 $\varphi(0) = 1.0$ [rad], $\dot{\varphi}(0) = 0$ [rad/s] を与え、 $\varphi = 0$ となったときに σ を 2.8×10^{-6} [kgm²/s] から 2.3×10^{-6} [kgm²/s] に減少させた。他のパラメータは Fig. 6, Fig. 7 と同じである。Fig. 8 に φ の時間変化を、Fig. 9 に φ と $\dot{\varphi}$ の位相平面図を示す。丸で示した位置で σ を減少させることで、安定を回復できた。ただし、 $\varphi = 0$ で σ を減少させれば必ず安定となる訳ではない。例えば、定常状態からさらに大きくずれた初期条件 $\varphi(0) = 0$,

$\dot{\varphi}(0) < -1.3 [\text{rad/s}]$ では、 $\sigma = 0$ としても安定化しないことがシミュレーションで確認された。この場合には、外部からエネルギーを与えて σ を負とする自己起動 [13] が必要となる。

3. 検証実験

計算結果の妥当性を検証するため、インピーダンス制御の実験を行った。Fig. 10 に実験装置の概念図、Fig. 11 に発電機の外観を示す。回転機構には Dynabee を使い、ロータにネオジム磁石を内蔵し、外殻に発電コイルを巻いている。発電機をサーボモータとモータコントローラにより正弦波状に揺動加振する。加振方向は Fig. 10 の Input の向きである。そして、発電コイルから外部抵抗に加わる電圧をオシロスコープで測定し、発電量 P を抵抗値と電圧値から計算する。発生電圧が交流であり、時間変化するため、オフラインで電圧値を積分して平均電力を求めた。サーボモータからは、加振角度 θ が 0 (水平) の瞬間にパルスが出され、これにより発電機が水平となる時間を検出する。実用化時には、発電機に加速度計を取り付け、入力振動を測定することを想定している。ロータの位相差 φ を測定するため、発電コイルに対して垂直にセンシングコイルを巻いている。センシングコイルは、ロータの歳差角 α により誘導電圧が変化する。二つのコイルの波形の実測値を Fig. 12 に示す。自転速度が一定の場合、発電コイルの電圧は一定であるが、

Fig. 10 Schematic diagram of the measurement system

Fig. 11 Appearance of the gyroscopic power generator

センシングコイルはロータ軸と平行なときに電圧最大、垂直なときに電圧 0 となる。このため、センシングコイルの振幅最大の点からサーボモータパルスまでの時間から歳差角 α が求まる (Fig. 13)。本方法により、歳差 1 回転ごとに φ が計測される。今回の実験においてインピーダンスは、発電コイルをあらかじめ 10 巻きずつに分割しておき、ショートするコイル数を変化させることで変化した。インピーダンスは、FET など発電コイルと負荷の間を細かくオンオフすることでも変化する。

φ の目標値は $\varphi_s = 0.524 [\text{rad}]$ とした。理想的には理論上の安定限界である $\varphi = 0$ とすべきであるが、 φ の測定が 1 周期に 1 回であること、 φ に測定誤差があること、過渡状態の安定限界が厳密には $\varphi = 0$ でないこと、インピーダンスを連続的に変化させられないことなどから、余裕を持たせた。

まず、 θ_0 を大きくしたときに、 φ に応じて接続コイル数を変化させた。入力振動数は $\omega_0 = 2 [\text{Hz}]$ とした。初期状態では、 N が 10 巻、 θ_0 は $0.262 [\text{rad}]$ 、 φ は $0.785 [\text{rad}]$ で、 P は $0.028 [\text{W}]$ であった。このとき $\varphi > \varphi_s$ なので安定余裕が大きいと判断し、 N を 30 巻に増やした。すると、 $\varphi = 0.524 [\text{rad}]$ 、 $P = 0.096 [\text{W}]$ となった。 $\varphi = \varphi_s$ なので、 P は最大値であると言える。次に θ_0 を $0.279 [\text{rad}]$ に増加すると、 $\varphi = 0.698 [\text{rad}]$ となった。再び $\varphi > \varphi_s$ となったので、安定余裕が大きいと判断し、 N を 50 巻とした。すると、 $\varphi = 0.559 [\text{rad}]$ 、 $P = 0.181 [\text{W}]$ となった。以上をまとめたものを Table 1 に示す。 P はインピーダンスを一定とした場合に比べて、6 倍に増大している。

Fig. 12 Voltage wave patterns of the sensing coil and the generation coil

Fig. 13 Relationship among the sensing coil voltage, the vibration pulse, and φ

Table 1 Parameters when the amplitude of the input vibration θ_0 is increased

θ_0 [rad]	0.262	0.262	0.279	0.279
N	10	30	30	50
φ [rad]	0.785	0.524	0.698	0.559
P [W]	0.028	0.096	0.096	0.181

Table 2 Parameters when the amplitude of the input vibration θ_0 is decreased

θ_0 [rad]	0.279	0.262	0.262	0.244	0.244
N	50	50	30	30	10
φ [rad]	0.559	0.349	0.524	0.349	0.750

次に、 θ_0 を小さくしたときに、 φ に応じて N を減らすことで安定状態を維持する実験を行った。初期状態では、 $N=50$ 巻、 $\theta_0 = 0.279$ [rad]、 $\varphi = 0.559$ [rad] であった。 $\varphi > \varphi_s$ なので発電機は安定状態にある。次に θ_0 を 0.262 [rad] に減少すると、 φ は過渡的に 0.349 [rad] となり、 $\varphi < \varphi_s$ となったため、過渡的に不安定であると判断した。この過渡状態において N を 30 巻に減らすと、 φ は定常状態で 0.524 [rad] となった。これは安定状態が回復したことを示す。次に、 θ_0 を 0.244 [rad] に減少すると、 φ は再び過渡的に 0.349 [rad] となり、 $\varphi < \varphi_s$ となったため、過渡的に不安定であると判断した。この過渡状態において N を 10 巻に減らすと、 φ は定常状態で 0.750 [rad] となり、安定状態が回復した。以上をまとめたものを **Table 2** に示す。なお N を変化させない場合、 $\theta_0 = 0.262$ [rad] で定常に達することなく失速した。

以上の実験により、 φ を測定してコイル巻数を変化させることで、最大発電量と安定状態を維持できることが確認できた。

4. 結 論

携帯情報機器のエネルギー源確保のため、低周波振動から高出力の電力を得るジャイロ型発電機の安定化手法を考案した。シミュレーションと実験により手法の妥当性を確認し、また受動素子のパラメータ調整のみで制御が可能なことを示した。主な結論を以下に示す。

- (1) ロータの定常回転時の安定条件を明らかにした。また入力振動の変化が遅い場合についてシミュレーションを行い、入

力振動と歳差回転の位相差が 0 となるように粘性減衰係数を設定することで、最大発電量と安定状態を維持できることを示した。

- (2) 入力振動の変化が大きい場合についてシミュレーションを行い、過渡状態においても位相差を 0 とする減衰係数の制御が有効なことを示した。
- (3) センシングコイルによりロータ歳差角を測定する方法を考案した。これを用いて、位相差の計測値に応じてコイル巻数を変えることで最大発電量と安定状態を維持できることを示した。

なお本研究は科研費 (22360067) の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- [1] S. Roundy, P.K. Wright and J.M. Rabaey: Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks: with Special Focus on Vibrations. Springer, 2003.
- [2] 板生清: “進展する微小エネルギー技術”, 光アライアンス, vol.7, no.7, pp.1-5, 1996.
- [3] 猿渡朋澄, 池田仁志, 野尻和雄: “発電機付腕時計”, 日本時計学会誌, no.120, pp.17-27, 1987.
- [4] 長尾昭一, 安川尚昭, 吉野雅士: “ウォッチ用自動発電機構の開発”, 日本時計学会誌, no.120, pp.40-48, 1987.
- [5] 長尾昭一: “ウォッチ用自動巻発電機構の改良”, 日本時計学会誌, no.144, pp.22-30, 1993.
- [6] 原辰男: “小型 AGS (自動巻発電ウォッチ) の開発”, 日本時計学会誌, no.157, pp.33-42, 1996.
- [7] 北原丈二: “薄型 AGS (自動巻発電ウォッチ) の開発”, 日本時計学会誌, no.158, pp.22-31, 1996.
- [8] F.H. Mishler: Gyroscopic device, United States Patent 3726146, 1973.
- [9] D.W. Gulick and O.M. O'Reilly: “On the Dynamics of the Dynabee,” Journal of Applied Mechanics-transactions of the ASME, vol.67, no.2, pp.321-325, 2000.
- [10] M. Kasahara, H. Yoshida, H. Hosaka and K. Sasaki: “Study on gyroscopic power generator — prototype and its fundamental characteristics,” JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2009), pp.295-296, 2009.
- [11] 石井智裕, 後藤裕治, 小川達也, 保坂寛: “ジャイロ型振動発電機の研究”, 精密工学会誌, vol.74, no.7, pp.764-768, 2008.
- [12] 吉川寛, 岩崎淳, 岸本幹史, 保坂寛, 佐々木健: “ジャイロ型振動発電機の過渡応答解析”, 精密工学会誌, vol.76, no.2, pp.238-242, 2010.
- [13] Y. Kamiya, H. Hosaka and M. Kasahara: “1st Report of a Study on Gyroscopic Power Generator — Prototype and its Fundamental Characteristics —,” TENCON2010, 2010.

高橋 智幸 (Tomoyuki Takahashi)

2010 年東京大学工学部精密工学科卒業。同年東京大学大学院新領域創成科学研究科博士前期課程入学。現在に至る。ジャイロ型発電機に関する研究に従事。精密工学会学生会員。(日本ロボット学会学生会員)

保坂 寛 (Hiroshi Hosaka)

1981 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。日本電信電話 (株)、東京大学大学院工学系研究科助教授を経て現在に至る。情報機器、移動体センシング、機械振動学の教育・研究に従事。精密工学会、日本機械学会、日本時計学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

岩崎 淳 (Jun Iwasaki)

2008 年東京大学工学部システム創成学科卒業。同年東京大学大学院新領域創成科学研究科入学。ジャイロ型発電機に関する研究に従事。2010 年東京大学大学院新領域創成科学研究科博士前期課程修了。現在三井住友海上火災保険 (株) に勤務。