

揺動運動中におけるジャイロ発電機の物理的対応力

岩切瞭史朗、煙岡英樹、山崎祐一郎

Ryoshiro IWAKIRI, Hideki TABAOKA, Yuichiro YAMASAKI

私立西大和学園高等学校

【キーワード】発電、実用化、過渡応答解析

1. はじめに

ジャイロ発電機は小型であり、場所の制約がなく、また、振動を利用する発電の中で発電効率が良いものとして近年注目されている。しかし、発電し続けるために入力する振動は、発電機内部の歳差運動の周期とほぼ一致している揺動運動でなければいけないため、発電の実用化が難しい。先行研究では $\theta = \theta_0 \sin(\omega t)$ で表される正弦波を振動として入力していたが、本研究では、サーボモータを用いて正弦波以外の揺動運動を入力振動としてジャイロ発電機を振動させた際の応答について調べ、日常の中でありふれている様々な振動を活用してジャイロ発電機で従来よりも効率の良い発電システムを構築することを目指す。

2. 目的

近年、著しい情報通信機器の小型化により、人間及び、あらゆる人工物、自然物に機器を装着し、情報交換を行うユビキタス情報システムが現実のものとなり、課題の一つとして、効率的なエネルギー源の確保が挙げられる。ユビキタスシステムでは、多数の情報機器を使用するため、解決策として、機器に発電機を内蔵し、移動中の振動を用いて発電する方法の研究が進められている。振動を利用する発電方法は、強制的な振動による大出力の緊急充電が可能であり、日常にありふれている振動を用いることができ使用場所の自由度が高く、近年注目されているEnergyHarvestingと呼ばれる環境発電の一つとして有力視されている。従来、歩行と共振させた際の単振動によって発電する方法も提案されてはいたものの、低出力さが欠点となっていた。そこで我々は、様々な研究が進められているジャイロ効果を利用した発電方法に注目した。[1]ジャイロ効果を利用したジャイロ発電に関しては、発電の効率化や小型化の研究が活発となっている一方、実用化の方法についての研究があまりされていないのが現状である。実用化の例として、HandEnergyとい携帯発電機が販売

されており、40分から1時間発電機を回し続けることにより、1000mAhの充電が可能となり、環境発電の中でも比較的高出力である。しかしながら、実用化という観点から考えた時、長時間人力で発電機を回し続けることは現実的ではない。そこで、ジャイロ発電機をいかにして日常に組み込むかが重要となる。ジャイロ発電機は、微小な振動でも与え続けることで振動することができる反面、回転させることができる規則的な振動が身近にあまり存在せず、安定回転が難しいことが実用化にあたって大きな課題となっている。[2]そこで本研究では、安定回転に導くのが難しいジャイロ発電機に先行研究[3][4]で発電可能だと示されている $\theta = \theta_0 \sin(\omega_0 t)$ で表される単振動以外の様々な種類の揺動運動を加えた際の過渡特性を解析し、安定のための初期条件やパラメータ変化のロータ運動への影響を明らかにする。さらに近似解析および実験により理論式の妥当性を確認する。

3. 方法

3-1 ジャイロ発電機の構造と運動方程式

ジャイロ発電機の構造を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。

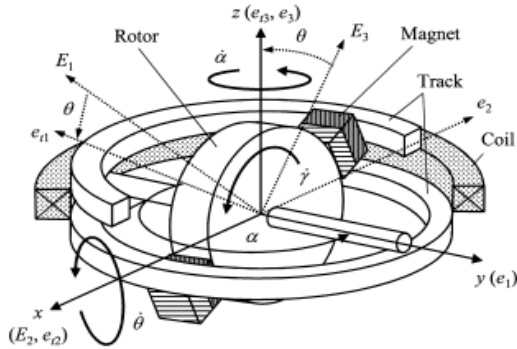
振動入力に対するロータの運動方程式は文献[2]で導かれている。

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 $\theta = \theta_0 \sin(\omega t)$ で揺動回転す

要旨書式

るものとする。 θ_0 は入力振幅、 ω は角周波数である。トラックに固定した座標系を e_1 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_{11} 軸と e_1 軸のなす角) を α 、自转角 (e_1 軸回りのロータの回転角) を γ とする。このとき、 α と入力位相 ωt の位相差 ϕ を次式で定義すると、 ϕ に関する方程式(1)を得る。

$$\ddot{\phi} (\xi^2 I_1 + I_2) + \xi I_1 \ddot{\theta} \sin(\phi + \omega_0 t) + \xi^2 \sigma (\dot{\phi} + \omega_0) + \xi^2 \sigma (\dot{\phi} + \omega_0) + (I_2 - I_1) \dot{\theta}^2 \sin(\phi + \omega_0 t) \cos(\phi + \omega_0 t) = 0 \quad (1)$$



3-2 運動方程式の変形

本研究においては、上記の通り、 $\theta = \theta_0 \sin(\omega_0 t)$ で表される単振動以外の様々な種類の揺動運動を加えた際の過渡特性を解析することを目的としている。そこで、まず等加速度運動となる揺動運動における過渡特性を考えることとした。

加速度を a としたとき、角加速度は、 $\omega_{(t)} = \omega_0 + at$ と表せる。これを式(1)に代入すると、 ϕ に関する方程式(2)が得られる。ただし、 $\phi = \alpha - \omega(t)t$ とした。

$$\times \sin(\phi + \omega_0 t + at^2) \times (\phi + \omega_0 t + at^2) + 2a(\xi^2 I_1 + I_2)]$$

—(2)

これは解析的には解けないため、数値的に解く必要がある。また、 $a \rightarrow 0$ にて上式の極限を取った時、式(1)と一致しており、式(2)は成立

していることが確認できるため、式(2)は等加速度運動中のロータの運動方程式である。

3-3 過渡状態の安定性

本研究では数値的に解くことで揺動運動中の過渡特性を明らかにする。機構のパラメータは市販の Dynabee ($\xi = 32.9$, $I_1 = 95.2 \text{mgm}^2$, $I_2 = 64 \text{mgm}^2$) の値を用いた。さらに初期条件を種々変化させ、安定条件に及ぼす影響を検討した。ジャイロ型発電機の運動は ϕ に関しての微分方程式(2)に従うが、この解は初期条件及びその他定数によって、振動解または発散解を持つ。これが a の値によって推移すると考えた。その推移点がジャイロ型発電機が安定回転するかと回転が停止するかの境界であり、安定回転となる振動解を持つ最大の a を求める。

3-4 実験手法

以上の内容を踏まえて、初期条件を種々変化させた際の角加速度 a の限界値とジャイロ発電機の安定回転における必要条件について、google colabory を用いたシミュレーションを通して考察した。具体的には、Python を用いて google colabory 上で、式(2)に様々な初期条件を代入して各条件下での角加速度の限界値から安定回転に至るための必要条件について調べた。微分方程式の計算にはルンゲクッタ法(4次)を用い、機構のパラメータは市販の Dynabee の値 ($\xi = 32.9$, $I_1 = 95.2 \text{mgm}^2$, $I_2 = 64 \text{mgm}^2$) を用いた。

代入するパラメータの条件は以下に記す。

ω_0	$2\pi, 4\pi, 6\pi, 8\pi$
Φ_0	$0, \pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2$
σ	$0, 1.5, 3, 4.5, 6$
θ_0	$\pi/12, \pi/6, \pi/4, \pi/3, 5\pi/12$

($n=500$)

以上の条件の全組み合わせ500個のサンプルにおける角加速度 a の限界値とパラメータ ω_0 、 Φ_0 、 σ 、 θ_0 のそれぞれと比較してジャイロ発電機の回転

要旨書式

を継続させる最大のaがパラメータにどのように規定されるかを調べる。

シミュレーションを行った後に、aと ω_0 、aと θ_0 、aと σ 、aと ϕ_0 の関係を調べるためにそれぞれグラフを作成した。比較するパラメータの値を変化させる際は、比較するパラメータ以外のパラメータ4つを固定し、また、その4つのパラメータの組はランダムに選ぶこととし、4つのパラメータの組に依らない関係性を求めた。

4. 結果

入力振幅 θ_0 、角周波数 ω_0 、位相差 Φ_0 、減衰定数 σ を変化させた際の過渡応答を求めた。

4-1 安定性に及ぼす θ_0 の影響

θ_0 の値を変化させた場合の角加速度aの限界値について、図2に示す。図2より、 θ_0 が増加していくにつれてaの最大値は一次関数的に増加した。

4-2 安定性に及ぼす ϕ_0 の影響

ϕ_0 の値を変化させた場合の角加速度aの限界値について、図3に示す。図3より、aは、 $\phi_0=\pi/6$ 付近で最大値をとり、そこから単調減少する。

4-3 安定性に及ぼす ω_0 の影響

ω_0 の値を変化させた場合の角加速度aの限界値について、図4に示す。図4より、 ω_0 が増加していくにつれてaの最大値は増加した。また、相対加速度(a/ ω_0)を調べた場合でも、 ω_0 の値が大きくなるにつれて、aの最大値が増加した。

4-4 安定性に及ぼす σ の影響

σ の値を変化させた場合の角加速度aの限界値について、図5に示す。図5より、 σ が増加していくにつれてaの最大値は一次関数的に減少した。

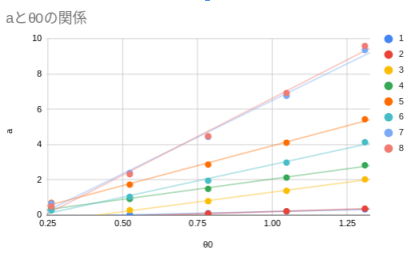
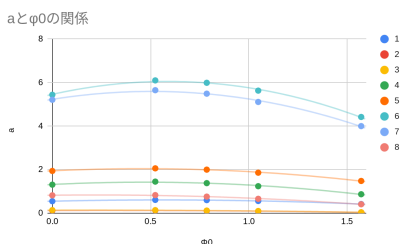


図2



番号	Φ_0	ω_0	σ
1	$\pi/2$	2π	3
2	$\pi/3$	2π	4.5
3	$\pi/4$	4π	6
4	$\pi/6$	4π	0
5	0	6π	1.5
6	$\pi/2$	6π	3
7	$\pi/3$	8π	4.5
8	$\pi/4$	8π	6

番号	θ_0	ω_0	σ
1	$5\pi/12$	2π	1.5
2	$\pi/4$	2π	4.5
3	$\pi/12$	4π	3
4	$\pi/3$	4π	6
5	$\pi/6$	6π	0
6	$5\pi/12$	6π	1.5
7	$\pi/4$	8π	1.5
8	$\pi/12$	8π	4.5

図3

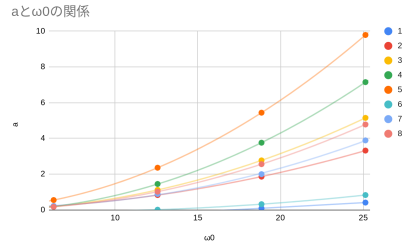


図4

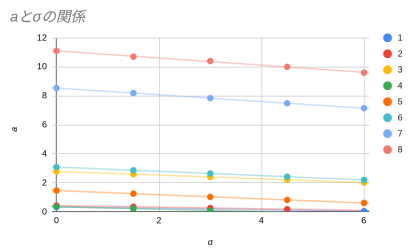


図5

番号	θ_0	σ	Φ_0
1	$\pi/12$	4.5	$\pi/2$
2	$\pi/6$	0	$\pi/3$
3	$\pi/4$	3	$\pi/4$
4	$\pi/3$	6	$\pi/6$
5	$5\pi/12$	1.5	0
6	$\pi/12$	4.5	$\pi/6$
7	$\pi/6$	0	$\pi/4$
8	$\pi/4$	3	$\pi/3$

番号	θ_0	Φ_0	ω_0
1	$\pi/4$	0	2π
2	$\pi/3$	$\pi/6$	2π
3	$5\pi/12$	$\pi/4$	4π
4	$\pi/12$	$\pi/3$	4π
5	$\pi/6$	$\pi/2$	6π
6	$\pi/4$	0	6π
7	$\pi/3$	$\pi/6$	8π
8	$5\pi/12$	$\pi/4$	8π

5. 考察

結果より、ジャイロ発電機をより安定して回転させるためには、以下の表のような条件の下、動かすべきだと考えた。よって、 θ_0 ができるだけ大きく、 ϕ_0 を $\pi/6$ に近づけ、 σ ができるだけ小さく、 ω_0 ができるだけ大きければジャイロ発電機は安定回転しやすいと考えられ、 $\theta=\theta_0\sin(\omega_0t)$ で表される揺動運動以外の入力振動においてもジャイロ発電機発電可能だと考えられる。

	角加速度a	最適条件
θ_0	単調増加	$\theta_0=5\pi/12$
ϕ_0	上に凸	$\phi_0=\pi/6$
ω_0	単調増加	$\omega_0=8\pi$
σ	単調減少	$\sigma=0$

まとめ

1 展望

回は等加速度運動をする揺動運動のみの場を考えたが、その他の場合の揺動運動についてもシミュレーションしたいと考えている。関数化

要旨書式

まで至らなかったためできなかったが、矩形波やクイックリターンと呼ばれる運動に関しても安定回転に至るための条件を調べることで、よりジャイロ発電機を利用できる幅が広がるのではないかと期待できる。また、今回のシミュレーションにおいては、 ϕ_0 を例に取ると、 $\pi/6$ が最大となると考察しているが、なぜ $\pi/6$ が最大なのか理論式で示したいと考えている。さらに、シミュレーションだけでなく、検証実験を行っていきたいと考えている。検証実験の詳細については以下に記す。その他の展望としては、波や地面の振動と言った身近にある振動を、本実験等で求めた安定回転のための必要条件を満たすよう変換して、発電させる例を作りたいと考えている。それにより、すでに実現されたジャイロ式波力発電のような、振動を用いた効果的な発電方法の実用化に至ると期待できる。

6-2 検証実験について

上記の通り、今後シミュレーションだけでなく検証実験に繋げていきたいと考えている。検証実験の具体的な方法は以下に記す。

<必要な道具>

スナップボール(パワーボール)、銅線、永久磁石、マイコン(Arduino Uno)、サーボモータ(KRS-2552R2HV ICS)、モータドライバ、DualUSBアダプターHS、KO Driver、ICS 3.6 Manager Software、ICS変換基盤KSBシールド2、HV電源スイッチハーネス、HV変換DCジャック、オシロスコープ、電源装置、木材、ネジ

<手順>

パワーボールのロータ内部に永久磁石を埋め込み、外側を銅線で巻いて発電機を作成する。そして、オシロスコープで波形を確認し、発電機が作用していることを確かめる。

その次に木材等を用いてジャイロ発電機をサーボモータに固定する仕組みを作る。そしてIDEでサーボモータを動かすためのプログラムを組む。そして、Arduino等をはんだごてを使って回路を組み、サーボモータに接続する。そして、ジャイロ発電機が安定回転しているかどうか確認する。

謝辞

本研究にあたり、全面的にご協力いただいた潮留様・TAの皆様方、アドバイス頂いた東京大学大学院保坂教授に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) Gulick, D.W.・O'Reilly, O.M.(2000)「On the Dynamics of the Dynabee」『Journal of Applied Mechanics』第67巻、第2号、321-325
- 2)石井智裕・後藤裕治・小川達也・保坂寛(2008)「ジャイロ発電の研究」『精密工学誌』第74巻、第7号、764-768
- 3)吉川寛・岩崎淳・岸本幹史・保坂寛・佐々木健(2010)「ジャイロ型振動型発電機の過渡応答解析」『精密工学誌』第76巻、第2号、238-242
- 4)高橋智幸・岩崎淳・保坂寛(2011)「ジャイロ型発電機の受動制御」『日本ロボット学会誌』第29巻、第8号、661-666