

学術論文

小形リニア振動アクチュエータの等価回路と低消費電力化

Equivalent circuit and low power of Linear Oscillatory Actuator for cellular phones

| | | | |
|-------|-------------|-------|-------------------|
| 脇若 弘之 | (信州大学) | 江澤 光晴 | (信州大学, (現) Canon) |
| 加藤 久幸 | (信州大学大学院) | 伊藤 治雄 | (帝国通信工業(株)) |
| 福田 直紀 | (帝国通信工業(株)) | 松廣 勝仁 | (帝国通信工業(株)) |

Hiroyuki WAKIWAKA Member
 Mitsuharu EZAWA
 Hisayuki KATO
 Haruo ITO
 Naoki FUKUDA
 Katsuhito MATSUHIRO

Little electric power, thin cellular phones are gaining remarkable popularity. Most recent cellular phones have a vibration function generated by a rotary vibration motor to notify the user of arrival of a message. We developed a little electric power, Linear Oscillatory Actuator (LOA). Its vibration acceleration is larger than that of rotary vibration motors. This paper describes: (1) the structure and operating principle of the LOA for cellular phones, (2) equivalent circuit (transmittance) of LOA (3) influence of a friction of spring on the LOA electric power for cellular phones, and (4) comparison between the LOA and rotary vibration motor.

Key Words: Cellular phone, resonance, equivalent circuit, friction, power, rotary vibration motor.

1 まえがき

近年、携帯電話は急速に普及し、付加サービスも増え高機能化されている。高機能化とともに、携帯電話を小形化、軽量化するためにLSIの高集積化、バッテリーの小形化などの工夫がされている[1]-[3]。また、カラー液晶パネルの導入で、携帯電話の低消費電力化が注目されている[4]。携帯電話には着信を知らせるバイブレーション機能が標準的に搭載されている。現在着信用バイブレータには、偏心した錘を回転させ振動する回転型振動モータが使用されている。しかし、回転型振動モータの振動加速度は錘の重心の回転半径に比例するため、薄形化は困難である。振動源の薄形

化により、携帯電話をさらに薄形化できると考えられる。そこで、低消費電力かつ薄形化可能なリニア振動アクチュエータ(Linear Oscillatory Actuator, 以下LOAと略す。)を携帯電話用バイブレータとして用いる事を検討した。

本論文では、低消費電力かつ薄形のLOAの開発にあたり、以下の点を検討している。

- (1) 携帯電話用LOAの構造および動作原理
- (2) LOAの等価回路(伝達関数)
- (3) ねじりコイルバネの摩擦が携帯電話用LOAの消費電力に与える影響
- (4) 回転型振動モータとの比較

連絡先: 脇若弘之, 〒380-8553, 長野市若里4-17-1, 信州大学工学部, email: wakiwak@gipwc.shinshu-u.ac.jp

2 携帯電話用 LOA の動作原理

Fig.1 に、携帯電話用 LOA の構造を示した。可動子は、ストローク方向に対して垂直に着磁された永久磁石と、永久磁石上部の可動子ヨーク、下部のセンタヨークで構成される。固定子は固定子ヨークとヨークに巻きつけたコイル、ねじりコイルバネ、バネを固定するプラスチックからなる。可動子はストローク方向に平行に移動できるように、2本のねじりコイルバネにより支持され、バネの共振を利用して振動する。

Fig.2 に、携帯電話用 LOA の推力特性を示した。LOA の推力 F_x は磁気力 F_m とバネの弾性力 F_s に分けられる。バネの弾性力によって推力特性が可動子変位に対して負の傾きを持つことによって、バネの共振を利用し振動することができる。磁気力はディテント力 F_d とコイル電流に比例する力 F_c に分けられる。LOA に作用する磁気力 F_m は次式となる。

$$F_m = F_c + F_d = K_f I + K_{ms} x \quad [N] \quad (1)$$

ここに、 K_f : 推力定数 [N/A]

I : コイル電流 [A]

K_{ms} : 磁気バネ定数 [N/m]

3 携帯電話用 LOA の伝達関数

本 LOA の可動子における運動方程式は次式で与えられる。

$$m a = K_f I + K_{ms} x - K_{ps} x - K_r v \quad [N](2)$$

ここに、 m : 可動子の質量 [kg]

a : 携帯電話の加速度 [m/s^2]

K_{ps} : バネ定数 [N/m]

x : 可動子の変位 [m]

K_r : 摩擦定数 [N/(m/s)]

v : 可動子の速度 [m/s]

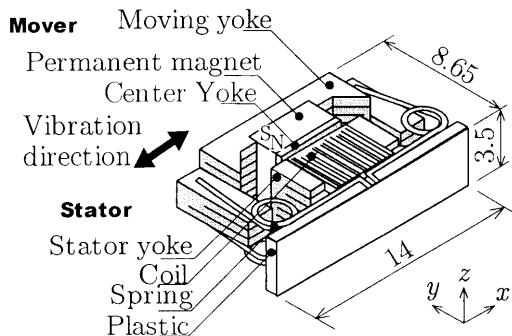


Fig. 1 Structure of the LOA for cellular phones (unit: mm).

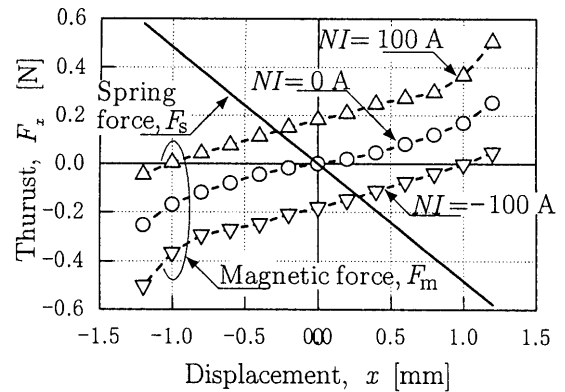


Fig. 2 Thrust characteristics of the LOA for cellular phones.

右辺第一項目は、コイル電流によって発生する推力で、コイル電流に比例する。第二項目はディテント力で、永久磁石による磁束によって発生する。第三項目は、可動子を支えるバネによる弾性力で、可動子の変位に比例する。第四項目は、可動子と固定子の間に発生する摩擦力で、可動子の速度に比例する [5]。LOA の回路方程式は次式で与えられる。

$$E = I R + L \frac{dI}{dt} + K_e v \quad [V] \quad (3)$$

ここに、 E : 印加電圧 [V]

R : コイルの抵抗 [Ω]

L : コイルのインダクタンス [H]

t : 時間 [s]

K_e : 逆起電力定数 [V/(m/s)]

右辺第一項目は、コイルの抵抗による電圧降下である。第二項目は、コイル電流の変化によってコイルに発生する誘起電圧である。第三項目は、可動子の移動によって発生する逆起電力で、可動子の速度に比例する。

Fig.3 に、本 LOA のブロック線図を示した。式 (2)、式 (3) から、印加電圧 E に対する可動子の振動加速度 a の伝達関数は次式で与えられる。本 LOA の加速度伝達関数は 3 次遅れ 2 次進みで表された。

$$\frac{a}{E} = \frac{m K_f}{M R} s^2 \{ m T_e s^3 + (m + T_e K_r) s^2 + (T_e K_s + K_e K_f / R + K_r) s + K_s \}^{-1} \quad (4)$$

ここに、 M : 携帯電話の質量 [kg]

s : ラプラス演算子

T_e : コイルの電氣的時定数 ($= L/R$) [s]

K_s : 合成バネ定数 ($= K_{ms} - K_{ps}$) [N/m]

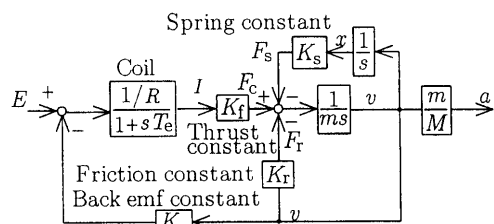


Fig. 3 Block diagram of the LOA for cellular phones.

式(4)のラプラス演算子に $j\omega$ を代入することによって、伝達関数の周波数特性が求まる [6]. 共振周波数における印加電圧 E に対する携帯電話の振動加速度 a は伝達関数より次式のように近似できる.

$$\frac{a}{E} = \frac{m}{M} \frac{\omega_p}{K_e + RK_r/K_f} \quad [(m/s^2)/V] \quad (5)$$

LOA の共振周波数は人が感じやすいといわれる約 100 Hz にしなければならない. また, LOA の質量は大きくできない. よって式(5)から, 逆起電力及び摩擦力を小さく, 推力を大きくする事によって, LOA の共振周波数における振動加速度 a を大きくする事ができ, 低消費電力化が可能となる. 本論文では, 摩擦力を小さくする事により, 低消費電力化する.

4 バネの摩擦が消費電力に与える影響

4.1 摩擦定数と共振値の関係

本携帯電話用 LOA はねじりコイルバネで可動子を支持し, そのバネの共振を利用して振動する. しかし, ねじりコイルバネのねじり部分では摩擦が発生しやすく, LOA の共振における振幅値を下げてしまう [7]. ねじりコイルバネにおける摩擦を低減するために, ねじり部分にすき間をあけ, テフロンコート(フッ化エチレン樹脂スプレーによる)を施した.

Fig.4 に, コイルに正弦波の電圧 $1.12 V_{0-p}$ を印加したときの摩擦が LOA の振幅に与える影響を示した. 共振周波数の計算値は, 実測値と誤差 3 Hz 以内で一致した. LOA の摩擦力は速度に比例する [5]. よって, 摩擦定数 K_r を大きくすると, 共振における振幅は小さくなった. テフロンコートを施した LOA は, 共振における振幅値が 1.19 mm で, 伝達関数における摩擦定数を $0.030 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})$ としたとき, 振幅値の計算値と実測値が 2 % 以内の誤差で一致した. 無加工の LOA は, 共振における振幅値が 0.615 mm で, 伝達関数における摩擦定数を $0.175 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})$ としたとき, 振幅値の計算値と実測値が 2 % 以内の誤差で一致

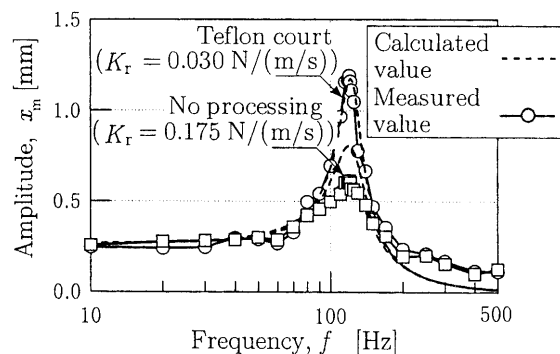


Fig. 4 Influence of friction on amplitude of LOA (Sin wave : $1.12 V_{0-p}$).

Table 1 Influence of friction of torsion spring on electric power (Amplitude : $x_m = 1.2 \text{ mm}$).

| Items | No processing | Teflon court |
|--------------------------------------|---------------|----------------|
| Friction constant K_r [N/(m/s)] | 0.175 | 0.030 (- 83 %) |
| Coil voltage* [V] | 1.48 | 0.79 (47 %) |
| Coil current* [mA] | 89.4 | 24.1 (- 73 %) |
| Power [mW] | 132 | 19.0 (86 %) |

() Difference with No processing

* RMS value

した. したがって, テフロンコートを施すことによって, 摩擦定数を 83 % 小さくすることができ, 振幅は 93 % 増加した.

4.2 摩擦定数と消費電力の関係

本 LOA の可動子と固定子が接触しないように振動したとき最大振幅 1.2 mm で振動することができる. Table 1 にねじりコイルバネの摩擦が消費電力に与える影響をまとめた. 振幅 $x_m = 1.2 \text{ mm}$ で振動するために, 無加工の LOA は 132 mW 必要であった. ねじりコイルバネにテフロンコートを施し, 摩擦定数を 83 % 小さくした LOA の消費電力は 19.0 mW となり, 86 % 小さくすることができた.

4.3 回転型振動モータとの比較

Fig.5 に, 携帯電話用 LOA と回転型振動モータの特性値の比較を示した. 携帯電話を模したアクリル

ケース (77 g) に LOA および回転型振動モータを搭載して特性を測定した。回転型振動モータの諸特性を 1 に正規化し、LOA と比較した。薄さ、体積、質量、消費電力は逆数をとっているので、多角形の面積が大きいほど良い特性といえる。Table 2 に、携帯電話用 LOA と回転型振動モータの比較をまとめた。携帯電話用 LOA は、回転型振動モータの場合より低消費電力で大きな加速度を発生させるため、体積が 19 % 大きくなってしまった。しかし、厚さが 3.5 mm と薄く回転型振動モータより 35 % 薄形である。本 LOA の固定子のバネ取り付け部に、プラスチックを使用しているので軽量化することができ、回転型振動モータより 30 % 軽い 1.4 g であった。本 LOA は人の感じやすい約 123 Hz で共振現象を示した。携帯電話への搭載を模擬した測定の結果、本 LOA の振動加速度は 8 m/s^2 と回転型振動モータの 2 倍で振動を感じるための十分な振動加速度を得た。また、このときの消費電力は 19.4 mW と回転型振動モータより 59 % 低消費電力であった。よって、加速度/入力比は $412 \text{ (m/s}^2\text{)}/\text{W}$ と非常に大きく、回転型振動モータの 4.8 倍であった。

Table 2 Comparison between the LOA for cellular phones and the rotary motor.

| Items [unit] | LOA | Rotary motor |
|--|--------------|--------------|
| Thickness [mm] | 3.5 (-35 %) | 5.4 |
| Volume [mm ³] | 424 (+19 %) | 355 |
| Mass [g] | 1.4 (-30 %) | 2.0 |
| Coil voltage [V] | 0.79* | 1.3 |
| Coil current [mA] | 24.5* | 36 |
| Frequency [Hz] | 123 (+60 %) | 77 |
| Acceleration [m/s ²] | 8.0 (+100 %) | 4.0 |
| Power [mW] | 19.4 (-59 %) | 46.7 |
| Acceleration / Power [(m/s ²)/W] | 412 | 85.7 |

* RMS value

() Difference with Rotary motor

5 あとがき

本論文で明らかにしたことを以下にまとめた。

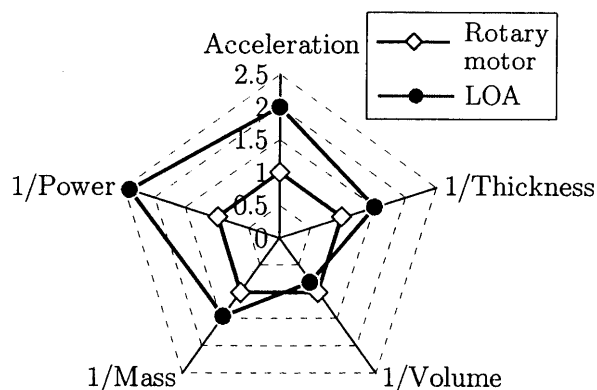


Fig. 5 Comparison of characteristics between the LOA and the rotary motor (Set on acrylic case : 77 g).

1. 携帯電話用 LOA の構造およびバネの共振を利用した動作原理を示した。
2. 伝達関数より、逆起電力及び摩擦力を小さく、推力を大きくすることで、LOA の共振周波数における振動加速度 a を大きくすることができ、低消費電力化が可能となる。
3. ねじりコイルバネのねじり部分で摩擦が発生すると電力損失になる。そのため、ねじりコイルバネのねじり部分にすき間をあけ、テフロンコートを施した。無加工の LOA と比べ摩擦定数を 83 % 小さな $0.030 \text{ N}/(\text{m/s})$ とすることができ、消費電力を 86 % 小さな 19.0 mW にすることができた。
4. 8.0 m/s^2 の振動加速度を得るための消費電力は携帯電話用 LOA で 19.4 mW となった。回転型振動モータよりも 35 % 薄い 3.5 mm の薄さで 2 倍の振動加速度を得つつ、58.5 % 低消費電力化した。

(2000 年 9 月 11 日受付)

参考文献

- [1] 三宅常之, 福田昭: 日経エレクトロニクス, No.617 (1994), pp.72-96.
- [2] 浜田基彦, 福岡恒憲, 田野倉保雄: 日経メカニカル, No.452 (1995), pp.22-36.
- [3] 木村知史: 日経メカニカル, No.491 (1996), pp.28-47.
- [4] 菊池隆裕: ケータイの液晶パネル, カラー時代に突入, 日経エレクトロニクス, 日経 BP 社, No.754 (1999), pp.47-52.
- [5] 磯親: 力学, 東京数学者, (1991), pp.102-104.
- [6] 樋口龍雄: 自動制御理論, 東北出版株式会社, (1989), pp.62-77.
- [7] 脇若弘之, 矢島久志, 江澤光晴, 伊藤治雄, 福田直紀, 春山勝彦: 携帯電話用薄形リニア振動アクチュエータの低消費電力化, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-99-45, (1999), pp.21-26.