

研究速報
研究速報

リモートパワリングによるマイクロアクチュエータの駆動

Driving Microactuators using Remote Inductive Powering

竹内昌治*
Shoji TAKEUCHI

1. はじめに

近年のマイクロマシン技術の発達によって、静電型、圧電型、熱型、電磁型など、様々なマイクロアクチュエータが実現され、応用されている。しかし実際、これらの多くは、動作時に大電源を必要とし、わずか数ミリのデバイスの駆動に数十センチの電源を用いるのが現状である。マイクロマシン技術で製作した微小デバイスとしての特長をいかすためにも、駆動装置全体を含めたデバイスの小型化が望まれている。そこで本稿では、マイクロアクチュエータに無線でエネルギーを供給するために、電磁誘導を利用したパワリングについて検討した。誘導結合によるデバイスとの通信はRFIDや医療分野への応用が多いが^{1,3)}、マイクロアクチュエータを駆動した例は少ない。さらに本稿では、選択的に駆動する方法についても提案する。アレイ状に並んだ複数のアクチュエータを駆動するとき、個々のアクチュエータに配線するのは極めて困難である。ここで提案する方法は、一つの送信機で、複数のアクチュエータに選択的に電力を供給する方法である。

2. 理論

Figure 1に本稿で用いる電磁誘導型パワリングシステムの基本原理を示した。受信側では、アクチュエータがLC共振回路に接続されている。この回路の共振周波数 f_r は、次式で表せる。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}, \dots \text{Eq. (1)}$$

ここで、 L_r は、受信回路に使用するコイルのインダクタンス、 C_r はコンデンサの容量である。ダイオードは受信波形を整流し、DC電圧をアクチュエータに供給するために用いる。

*東京大学生産技術研究所マイクロメカトロニクス国際研究センター

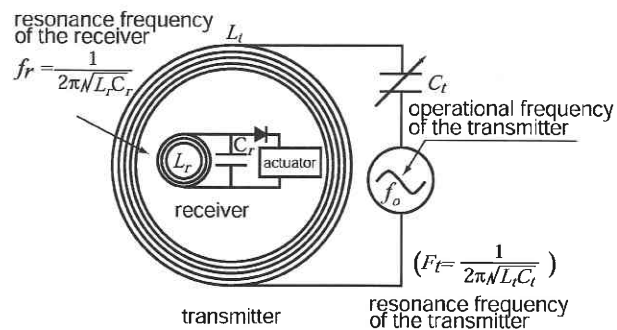


Figure 1. リモートパワリングの基本原理

本稿では、受信コイルとして平面コイルを用いた。平面コイルもマイクロアクチュエータと同様、マイクロマシン技術によって、製作できるため、アクチュエータが一体化した受信機を実現できる。ここで製作する平面コイルの自己インダクタンスは次の式で表せる⁴⁾(Eq. (4 i)).

$$L_r = \frac{\mu D^3}{4\pi p^2} (1-\alpha^2)(1-\alpha) \left[\ln\left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha}\right) + 0.2235\frac{1-\alpha}{1+\alpha} + 0.726 \right], \dots \text{Eq. (2)}$$

ここで、 μ は空気の透磁率(4×10^{-7} H/m)、 D はコイルの外径、 p はピッチ、 α は内径/外径を表した変数である。平面コイルの寄生容量 C_p は、受信側の総容量 C_r に含まれている。この C_p は、次の式で与えられる⁴⁾。

$$C_p = \frac{2\epsilon_1 h D}{p-b} \left(1 + \alpha - \frac{4p}{D(1-\alpha)} \right) + \frac{\epsilon_{sb} b D^2}{4tp} (1-\alpha^2) + \frac{\epsilon_{sb} A}{t}, \dots \text{Eq. (3)}$$

ここで、 ϵ_1 は、コイルの巻き間の誘電率(空気中の場合は 8.84×10^{-12} F/m)、 ϵ_{sb} はコイルと基板間にある絶縁層の誘電率である。 A はパッドの面積、 t は基板上部の絶縁層の厚さである。 h 、 b はそれぞれ、コイルの巻きの厚さと幅を示している。この式の初項は巻き間の寄生容量、次項は

巻きと基板間，最終項はパッドと基板間の寄生容量を表している。本稿では，絶縁のため，基板上にスピンコートしたポリイミド（PIXL 110 SX, $\epsilon_{so} = 3.4$ ）を用いた。厚さは， $2.3 \mu\text{m}$ であり，これによって，寄生容量の軽減を図った。

送信側の LC 回路はファンクションジェネレータに接続されている。発生器の動作周波数 f_0 は LC 回路の共振周波数 F_L に設定されている。この共振周波数は，Eq. (1) と同様に，送信回路の容量 C_i とインダクタンス L_i によって決定される。

$$F_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C_i}} \dots\dots\dots \text{Eq. (4)}$$

回路が共振周波数で動作しているとき，送信側のコイルに流れる電流値は最大になる。この共振周波数 F_L が受信側の共振周波数 f_r と一致したとき，誘導結合がピークに達し，効率よくエネルギーが伝送されることで，アクチュエータを無線で駆動できる。この原理を応用して，たとえば異なる共振周波数に設定された受信機が複数ある場合，送信機の共振周波数を受信機の各共振周波数に設定すれば，各受信機に選択的にエネルギーを供給できる。

本稿では，送信コイルとして直径 1 mm の銅線を直径 8 cm, 14 巻き，インダクタンス $25 \mu\text{H}$ のコイルを用いた。実験では， C_i を変化させることで F_L を制御した。

エネルギー供給の選択性を高めるためには，受信側の Q 値を大きく設定する必要がある。平面コイルの Q 値は次の式で与えられる⁴⁾ (Eq. (10b))。

$$Q = \frac{\mu f_0 D h b (1 - \alpha)}{2 \rho p} \left[\ln \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right) + 0.2235 \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} + 0.726 \right] \dots\dots\dots \text{Eq. (5)}$$

ここで， f_0 は動作周波数， ρ はコイルに用いる材料の抵抗率を表す。コイルは DC スパッタした銅をパターンニングして製作するが，この銅の抵抗率は $2 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ であった。この式から h, b, p ，を変化させることによって Q 値を高めることができることがわかる。

3. 実験及び考察

受信側のコイルとして，Figure 2 のような Type A, B, C の 3 種類の平面コイルについて検討した。Type A にはコアがなく，Type B, C には NiFe コアを製作した。Type B は NiFe のスパッタによって得られた厚さ $10 \mu\text{m}$ 薄膜上をポリイミドで絶縁し，コイルをパターンニングした。また，このコイルの中心部に，さらに NiFe を $10 \mu\text{m}$ メッキしたものを Type C とした。コイル部分は，銅をスパッタし，

硝酸ベースのウェットエッチング ($\text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{H}_2\text{O} = 2:1:1$) によってパターンニングした。このとき，スパッタによって得られた銅薄膜の厚さは約 $6 \mu\text{m}$ であり，これは，スパッタ時にアルゴン圧約 0.2 Pa, 100 W, 30 分間行うことで得られた。

本研究で製作したコイルの各パラメータを Table 1 に示す。コイルの Q 値はネットワークアナライザ（ADVANTEST, R 3754 B）を用いて共振法により求めた (Figure 3 (b) 参照)。その結果を Figure 3 (c) 及び (d) に示す。コイルのインダクタンスは Eq. (1) によって計算した。このとき，寄生容量 C_p は 100 pF とした。その結果，コアなしコイルのインダクタンスは 3 種類のコイルのうち最低であったが (Figure 3(c))，Q 値は他の 2 つに比べ最高の値を示した (Figure 3(d))。この理由は，高周波において，NiFe コアに渦電流が発生し，エネルギーが熱として消費されてしまったことが考えられる。この結果から，上記 3 種類のコイルの中では，Type A が本研究の無線駆動における受信コイルとして適当であるといえる。本研究では，動作周波数として，4～7 MHz を採用した，グラフから，このときの Type A の Q 値は 2 to 3.5 であり，インダクタンスは $3.5 \sim 4 \mu\text{H}$ であることがわかる。

パワリングの実験には，Type A のコイルと，外付けのダイオードとコンデンサを用いた並列共振回路を使用した (Figure 4 (a))。この受信回路の共振周波数は，4.8 MHz に設定した。Figure 4 (b) は， F_L を 4.8 MHz に設定したときに，受信回路から得られた出力電圧をプロットしたもので

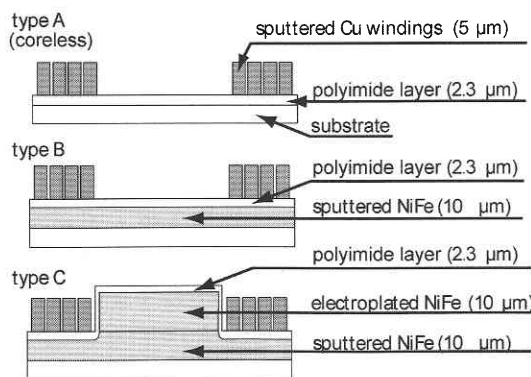


Figure 2. 実験に使用した 3 種類の平面コイルの断面図

Table 1. Parameters of the planar coil

number of windings	20
outer dimensions*	8 mm × 8 mm square
inner dimensions*	4.5 mm × 4.5mm square
pitch of windings	80 μm
width of windings	60 μm
thickness of windings	6 μm

* see Figure 3 (a)

研究速報

ある。実験の結果、負荷抵抗が100 kΩ以上で、静電アクチュエータが駆動可能な約45 Vの電圧が得られていることがわかる。Figure 4 (c)は、送信機の周波数 f_o が、 F_t と一致したときに、この実験における最大出力電圧が得られていることを示している。

次に、マイクロアクチュエータのワイヤレス駆動を確認するために、Type Aのコイルの内部に、楕形静電アクチュエータを組み込んだデバイスを試作した。製作方法をFigure 5に示す。また、Figure 6に、製作したデバイスの写真を示す。基板にはSOI (silicon on insulator) ウェハを

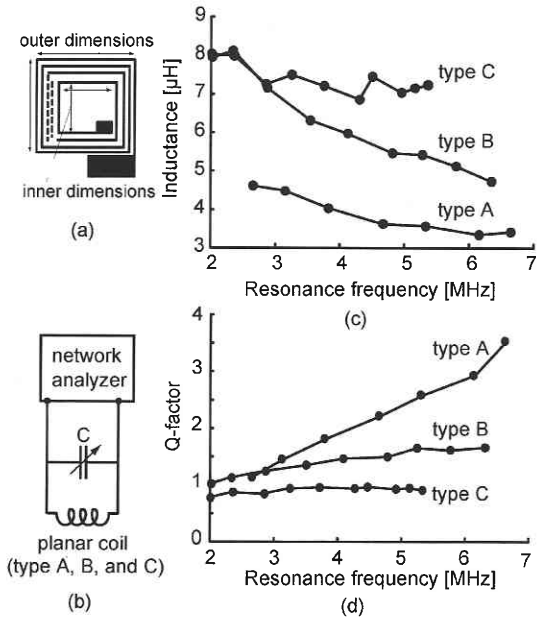


Figure 3. (a) 平面コイルの外径と内径. (b) 共振法によるQ値の測定回路. (c) インダクタンスの測定結果. (d) Q値の測定結果.

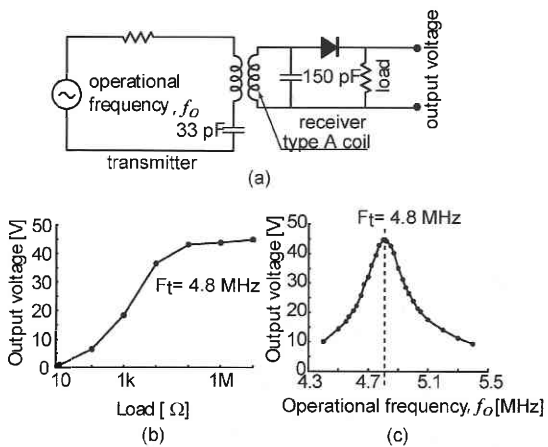


Figure 4. (a) パワーリングの実験回路. (b) 負荷抵抗に対する出力電圧. (c) 送信機の周波数に対する出力電圧

用いた (SOI: 5 μm , SiO₂: 3.0 μm , Base substrate: 550 μm). 楕形静電アクチュエータとしては、楕数17, ギャップ4 μm で設計した。各楕の幅は13 μm , 厚さ5.5 μm , 長さ120 μm であり、対極と60 μm 交差するように設計した。また、板バネの幅は2 μm で長さは700 μm とした。製作には、まずRIE (reactive ion etching) によって、シリコンをエッチングし、アクチュエータを形成する。その後、ポリイミドをスピンドコートし、2.38 % TMAH 溶液でパターンニングする。最後に、銅をスパッタしパターンニングした後に、犠牲層をBHF (HF:NH₄F=1:6) で除去し、構造をリリースした。

アクチュエータの駆動の実験のため、Figure 7の右下に示すような外付け回路を、試作したデバイスに接続し、受信機として用いた。この受信機を、送信側のコイル内部に置き、パワーリングを行った。駆動の様子は、マイクロスコブで観察し、変位を計測した。実験に使用した回路をFigure 8 (a) に図示する。負荷抵抗として1 MΩ, コンデンサには4700 pFを用いた。また整流素子には、チップダイオード (Toshiba, 1 SS 250) を用いた。

実験には、2つのファンクションジェネレータ (Hewlett Packard, HP 33120 A) を用いた。これらをFG1とFG2と

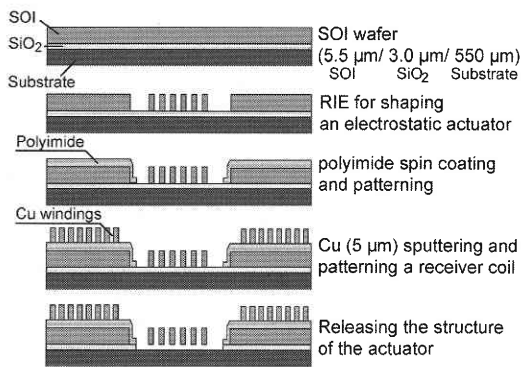


Figure 5 製作プロセス

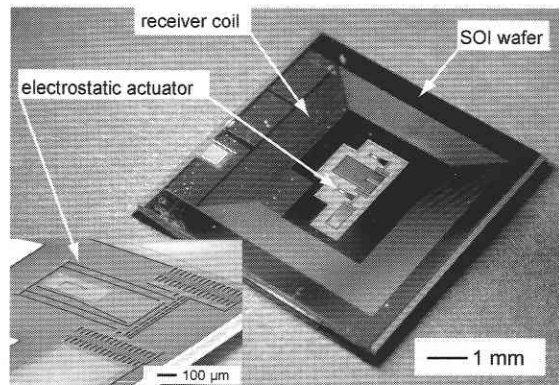


Figure 6 平面コイルと楕形静電アクチュエータを一体化させた受信機

する。FG 1は送信機の周波数を決定し、受信側の共振周波数に合わせて周波数を変化させる。その範囲は、4〜7 MHzである。FG 2は、アナログ・スイッチに接続され、送信のON/OFFを制御する。このスイッチング周波数は受信側のアクチュエータの駆動周波数と同期しているため、FG 2によって、楕円形静電アクチュエータのON/OFFのタイミングを制御することができる。ここでは、この周波数を0〜1 kHzの間で変化させた。

また、本実験では、送信機の共振周波数を4.07 MHz、4.73 MHz、6.9 MHzの3種類に設定し、それぞれの場合につい

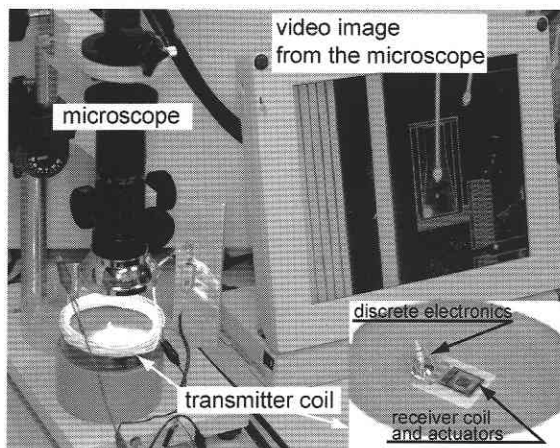


Figure 7. リモートパワリングの実験に使用した装置

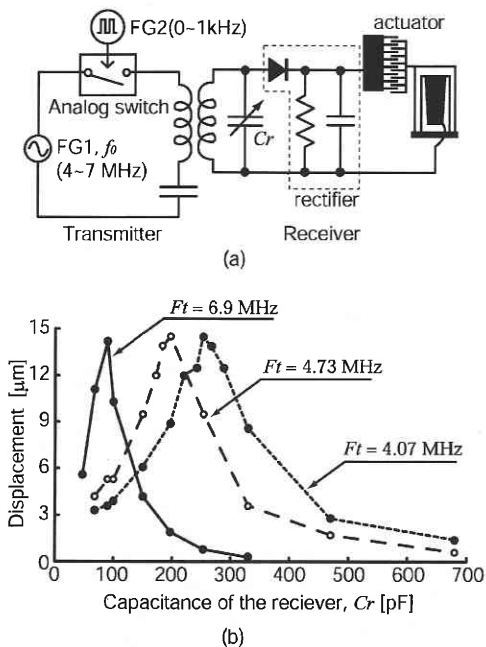


Figure 8 (a) リモートパワリングによるアクチュエータの駆動実験に使用した回路図。(b) 受信側のコンデンサの容量を変化させたときのアクチュエータの変位

てパワリングしたときのアクチュエータの変位を計測した。このとき受信側のコンデンサの容量 C_r を47 pFから680 pFまで順に変化させ、様々な共振周波数を持つ受信機で実験した。結果をFigure 8(b)に示す。送信機の周波数 F_t が、4.07 MHzのときを見してみると、アクチュエータの変位は、受信側の C_r が250 pFのとき最大で、約15 μm であった。一方、同じ受信回路で、 F_t が6.9 MHzの場合は、アクチュエータの変位はほぼゼロであった。また、 F_t が6.9 MHzのとき最大変位は、 C_r を90 pFに設定したときに得られた。この受信機で F_t を4.07 MHzにすると、変位は約3 μm と低下した。これらの実験の結果、受信側のコンデンサの容量を変化させ、共振周波数の異なる受信機をアレイ状に並べた場合、送信機の周波数を変化させることで、複数の受信機に選択的にエネルギーを伝送できることがわかる。すなわち、個々の受信機にアクチュエータやセンサを接続すれば、それぞれに配線する必要なく、一つの送信機で選択的に駆動できるといえる。

4. おわりに

本研究では、マイクロアクチュエータへの無線電力供給について検討した。受信側に平面コイルを用い、アクチュエータと一体化した受信機を製作した。負荷抵抗が100 kΩ以上のとき、出力電圧を45 V程度得ることができた。また、受信側の共振周波数を異なる値に設定した場合、送信機の周波数を変化させることによって、選択的にエネルギーを供給できることを示した。この方法を応用すれば、複数のマイクロアクチュエータやセンサを複雑な配線なしに、一つの送信機で選択的に駆動させることができる。

(2002年4月11日受理)

参考文献

- 1) T. Eggers, C. Marscher, U. Marschner, B. Clasbrummel, R. Laur, J. Binder, "Advanced Hybrid Integrated Low-Power Telemetric Pressure Monitoring System for Biomedical Applications," The 13th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2000), pp. 329-334, 2000.
- 2) T. Harpster, S. Hauvespre, M. Dokmeci, B. Stark, A. Vosoughi, and K. Najafi, "A Passive Humidity Monitoring System for In-Situ Remote Wireless Testing of Micropackages," The 13th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2000), pp. 335-340, 2000.
- 3) J. A. Von Arx and K. Najafi, "On-Chip Coils with Integrated Cores for Remote Inductive Powering of Integrated Microsystems," Transducers '97, pp. 999-1002, 1997.
- 4) C. R. Neagu, H. V. Jansen, A. Smith, J. G. E. Gardeniers, and M. C. Elwenspoek, "Characterization of a planar microcoil for implantable microsystems," Sensors and Actuators A-physical, vol. 62, pp. 599-611, 1997.