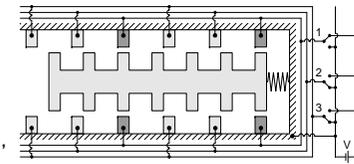


# MemsONE回路解析のロータリーステッパーマーター設計への適用

東京工芸大学 曾根 順治  
 (株)数理システム 望月 俊輔  
 東京大学 藤田 博之

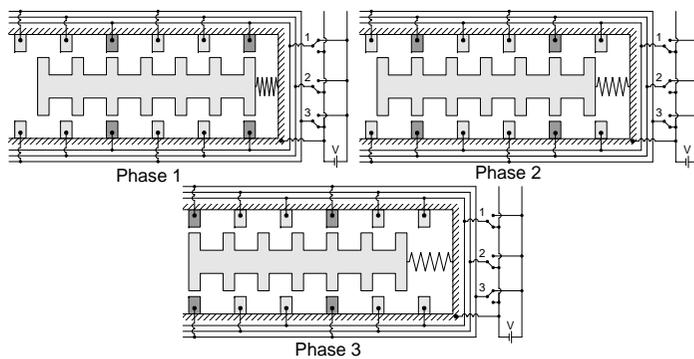
## 1. 背景

- 現在  
MEMS用の3相ステッピングモータを検討している
- 東京大学 藤田研究室では、MEMS技術を活用したマイクロ3相ステッピングモータを開発しており、弊研修室は、設計支援を進めている



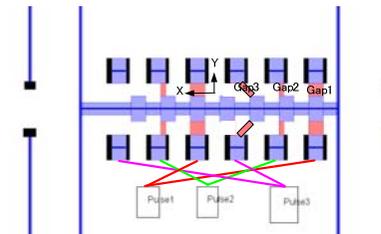
3相ステッピングモータ

## 動作原理

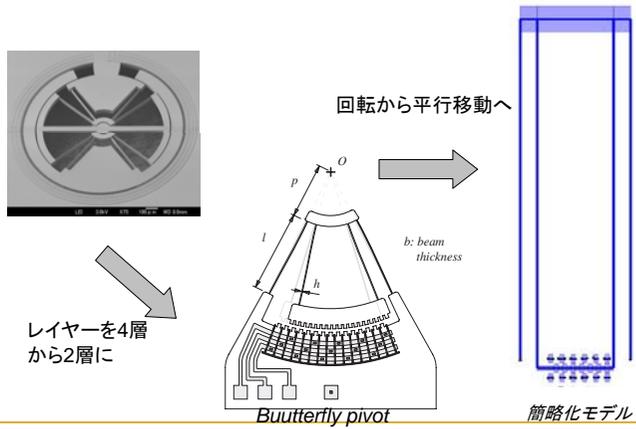


## 研究内容

- MemsONE™の回路シミュレータを活用して、3相ステッピングモータの特性を解析する。
- さらに、構造の最適化を推進する。



## 回路解析のための簡略化



2009/11/27

第2回東京「MemsONE」技術交流会

5

## ▶ MemsONE™ を使用した解析方法の確立

回路シミュレーションのための簡略化: 静的特性

1) Butterfly pivotの変形式

$$\delta_p = l_p d\theta = \frac{Fl_p^2}{k_{\theta,3}} \quad 1) \quad \begin{array}{l} \text{ばね長さ: } l_p = 0.0004\text{m, 幅: } 3\ \mu\text{m,} \\ \text{高さ: } 37\ \mu\text{m} \end{array}$$

2) 簡略化モデルの変形式

$$\delta = \frac{Fl^3}{192EI} \quad 2) \quad \begin{array}{l} \text{ばね長さ: } l = 0.0004\text{m, 幅: } 3\ \mu\text{m,} \\ \text{高さ: } 37\ \mu\text{m} \end{array}$$

両端固定ばねモデルの変形式

3) Butterfly pivot から簡易モデルへの剛性変換

E: 1) と 2) の等価条件から

$$E = \frac{K_{\theta,3} l^3}{192I_p^2}$$

$$\Rightarrow E = 3.38 \times 10^4 \text{ MPa} \quad \delta_p = \delta \text{ から}$$

$$k = \frac{k_{\theta,3}}{l_p^2} \quad 3)$$

2009/11/27

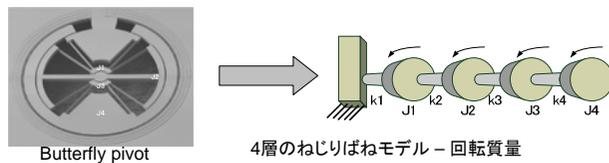
第2回東京「MemsONE」技術交流会

6

## ▶ MemsONE™ を使用した解析方法の確立

回路シミュレーションのための簡略化: 動的特性

(1) 4層 butterfly pivot model の共振特性



伝達関数

$$\begin{aligned} & \left[ \begin{array}{cccc} \frac{J_2 s^2}{k} + 1 & & & \\ & \frac{J_2 s^2}{k} & & \\ & & \frac{J_4 s^2}{k} + 1 & \\ & & & \frac{J_4 s^2}{k} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ & \left[ \begin{array}{cccc} \frac{J_2 s^2}{k} + 1 & & & \\ & \frac{J_2 s^2}{k} & & \\ & & \frac{J_4 s^2}{k} + 1 & \\ & & & \frac{J_4 s^2}{k} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

2009/11/27

第2回東京「MemsONE」技術交流会

7

## ▶ MemsONE™ を使用した解析方法の確立

J2 と J4 を省く

伝達関数行列

$$\left[ \begin{array}{cc} \frac{J_2 s^2}{k} + 1 & \frac{J_2 s^2}{k} \\ \frac{J_4 s^2}{k} + 1 & \frac{J_4 s^2}{k} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

固有値

$$\text{第一項} \quad \sqrt{J_4^2 + 8 J_2 J_4 + 8 J_2^2 + 16 J_1 J_2 s^2 + (-J_4 - 2 J_2) s^2 - 2k} = 0$$

解は:

$$s = -\sqrt{2} \sqrt{\frac{k}{J_4^2 + 8 J_2 J_4 + 8 J_2^2 + 16 J_1 J_2 - J_4 - 2 J_2}}, \quad s = \sqrt{2} \sqrt{\frac{k}{J_4^2 + 8 J_2 J_4 + 8 J_2^2 + 16 J_1 J_2 - J_4 - 2 J_2}}$$

最小の共振周波数  $\omega$ , (ここで,  $J_4 = J_2$  とする)

$$J_4 = Ml^2$$

$$\omega_b = \sqrt{\frac{2k_{\theta}}{Ml^2}} \quad 4)$$

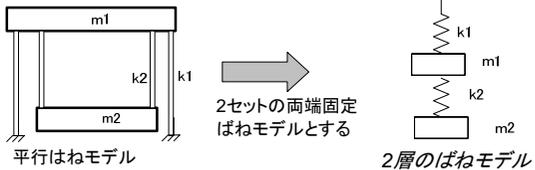
2009/11/27

第2回東京「MemsONE」技術交流会

8

▶ MemsONE™ を使用した解析方法の確立

(2) 平行ばねモデルの共振特性



2層ばねモデルの固有値  $k_1 = k_2 = k, m_2 \gg m_1$

$$\omega^2 = \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) - \sqrt{\left( \frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right)^2 - 4 \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}} \right\} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m_1 m_2}} \quad 5)$$

式4)と5)を等しいとして、動特性を合わせる:

$$k = \frac{4\sqrt{m_1} k_{\theta,3}}{\sqrt{m_2} l^2} \quad 6)$$

$l_{p=1}$  の場合  $\Rightarrow$  式3)と6)の違いは  $R=0.495$

2009/11/27

第2回東京「MemsONE」技術交流会

9

▶ MemsONE™ を使用した解析方法の確立

動特性と静特性のばねの変換は異なる

しかし、クリティカルな条件は動特性

動特性を基準に解き、

静特性を満たすには、 $\frac{1}{R}$  倍の力が必要

最終的には必要な電圧を求める

$$F = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC(x)}{dx} \quad \text{より、} \quad \frac{1}{\sqrt{R}} \quad \text{の電圧が必要:}$$

必要な電圧は 1.42倍することが必要

2009/11/27

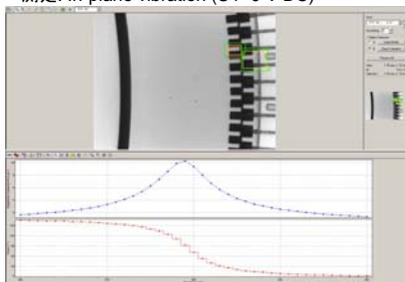
第2回東京「MemsONE」技術交流会

10

▶ MemsONE™ を使用した解析方法の確立

実際のモデルと簡易モデル(2層)の共振周波数

測定: In-plane vibration ( $U_1=0$  V DC)



279 Hz の共振点が計測 (Scanning Vibrometer)

簡易モデルのMemsONE  
による共振周波数

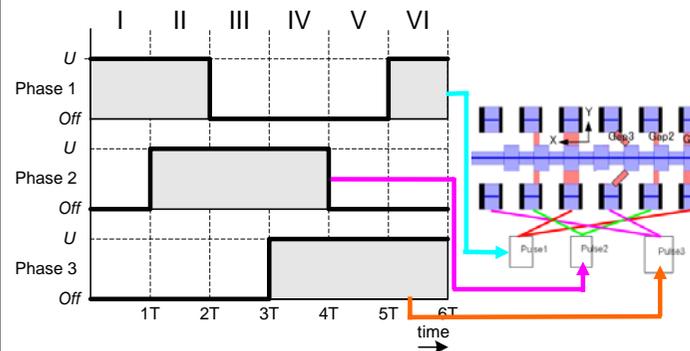
$\omega : 308\text{Hz}$

2009/11/27

第2回東京「MemsONE」技術交流会

11

回路解析方法



2009/11/27

第2回東京「MemsONE」技術交流会

12

## 3相の電圧入力方法

- ネットリストを活用

```
* DC 1[V]
.SUBCKT Pulse2 1
VIN 1 0 PWL(0 0 0.199NS 0 0.2NS 5 0.8NS 1 0.801NS 0 1.2NS 0)
.ENDS Pulse2
```

x1 n74 Pulse2

```
* DC 1[V]
.SUBCKT Pulse1 1
VIN 1 0 PWL(0 5 0.4NS 5 0.401NS 0 0.99NS 0 1NS 5 1.2NS 5)
.ENDS Pulse1
```

x0 n80 Pulse1

2009/11/27

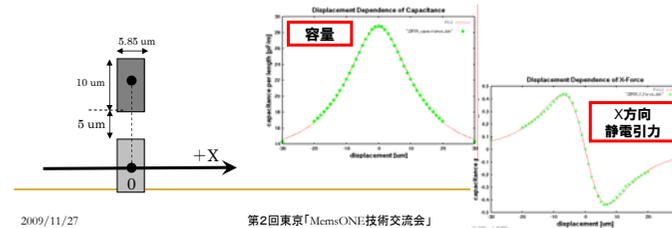
第2回東京「MemsONE」技術交流会

15

## Gapモデルの改善

X方向静電引力の重なり距離依存性を考慮したGapモデルの追加

- 容量の変位依存性を混合 Gauss-Lorentz 関数で表現
- 容量式の係数は入力ファイルにて指定  
(係数は別途、2次元静電場解析によって決定)
- 解析エンジンでは、指定された容量式から静電引力を計算



2009/11/27

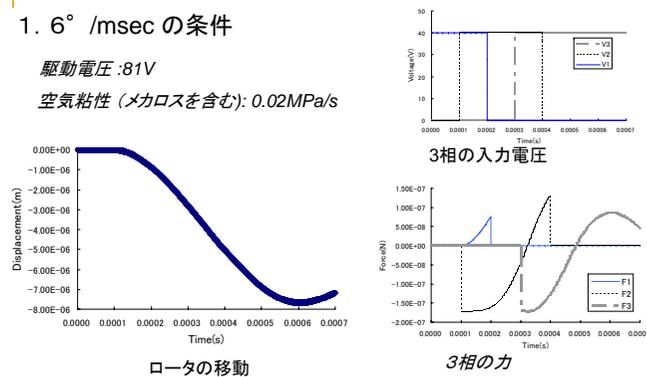
第2回東京「MemsONE」技術交流会

## ▶ MemsONE™による解析結果

1.  $6^\circ$  /msec の条件

駆動電圧 : 81V

空気粘性 (メカロスを含む): 0.02MPa/s



ロータの移動は、終端でほぼ目標値に収束  
81Vの駆動電圧は、実験電圧: 75Vにほぼ近い結果となった

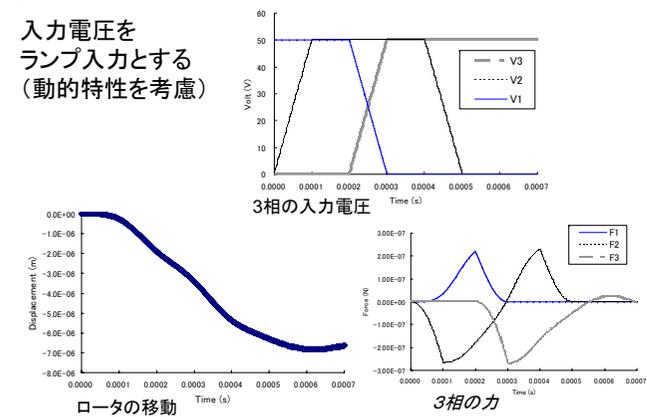
2009/11/27

第2回東京「MemsONE」技術交流会

15

## ▶ MemsONE™による解析結果

入力電圧を  
ランプ入力とする  
(動的特性を考慮)



2009/11/27

第2回東京「MemsONE」技術交流会

16

## まとめ

- 回路解析を行うために、解析モデルを簡略した.
- 静的特性と動的特性を変換する等価モデルを検討して、動特性を保ちながら、駆動電圧を求める関係を検討した.
- MemsONE™のリリース版、回路解析機能を用いて、3相ステップングモータを解析できた.
- 電圧入力方法を改善して、駆動電圧を低くすることができることを検討した.