

論文の内容の要旨

論文題目

交流磁場による微小浮上機構の駆動と姿勢拘束

氏名 三木 則尚

半導体製作プロセスを利用した MEMS (MicroElectroMechanical Systems) 技術の発展により、様々なアクチュエータやセンサが製作されてきた。これらの機構は主にシリコンやガラスなどの基板上に製作されている。今後は、配管内などの狭隘空間における作業をおこなうマイクロロボット、生体内で診断、治療をおこなうマイクロカテーテルなど、基板から離れて作業をおこなえる微小機構への期待が高まると考えられる。微小機構が基板から離れば、自由度が増加するため、姿勢制御が大きな問題となる。微小スケールにおいては、サイズの小ささおよび製作技術の限界から、全ての自由度を制御するのではなく、不用な自由度を拘束し、作業に必要な自由度だけを駆動するのが有効である。本研究においては、外部交流磁場による磁性体回転翼の駆動と、回転翼をもつ微小浮上機構の姿勢拘束を提案し、MEMS 技術により製作した微小浮上機構による実験から、外部磁場による駆動と姿勢拘束の有効性を検証する。

磁気を利用することの長所は、外部から磁場を与えられる点と、斥力、引力

の両方が利用できる点である。しかし MEMS 技術により永久磁石を製作するのは困難であるため、引力、斥力という 2 種類の力を利用することは考慮に入れない。着磁されていない磁性体について議論する。

磁性体に外部磁場が与えられると、磁性体内部に磁化 I が生成される。このとき生成された磁化によって外部磁場と反対の向きに反磁界 H_d が生成される。反磁界 H_d は次の式で表される。

$$H_d = N \frac{I}{\mu_0} \quad (1)$$

式中の N は反磁界係数とよばれ、磁性体の形状に依存する。 μ_0 は真空の透磁率である。またこのとき磁性体の静磁エネルギー U は、

$$U = \frac{1}{2\mu_0} N I^2 V_{\text{mag}} \quad (2)$$

で表される。すなわちエネルギーも形状に依存する。これを形状磁気異方性とよぶ。反磁界係数は、磁性体の長手方向では小さく、短手方向では大きい。反磁界が大きければ、磁性体を磁化しにくい。よって長手方向が磁化容易軸、短手方向が磁化困難軸となる。

磁化 I が磁化容易軸から θ ずれたときの静磁エネルギーは、

$$U = \frac{1}{2\mu_0} I^2 V_{\text{mag}} (N_a \cos^2 \theta + N_b \sin^2 \theta) \quad (3)$$

となる。 N_a , N_b はそれぞれ磁化容易軸、磁化困難軸方向の反磁界係数である。このとき次の式で表されるトルク T_a が発生する。

$$T_a = \frac{\partial U}{\partial \theta} = -\frac{1}{2\mu_0} I^2 V_{\text{mag}} (N_b - N_a) \sin 2\theta \quad (4)$$

T_a は磁気異方性トルクとよばれ、磁性体の磁化方向と磁化容易軸を一致させる方向にはたらく。

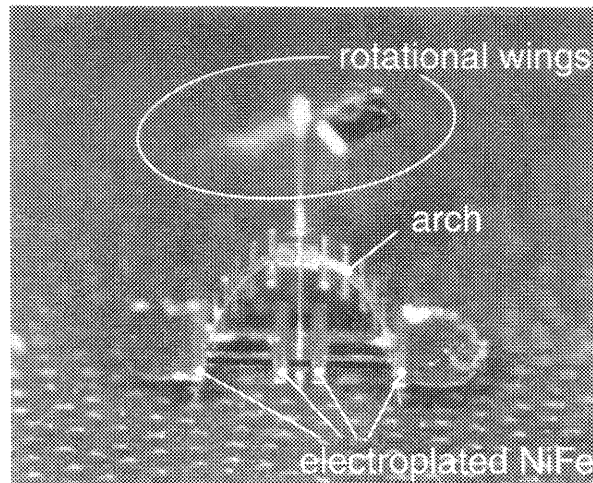


Figure 1 製作した微小浮上機構.

式 (4) で表される磁気異方性トルクにより自由度を拘束する方法を考える。拘束対象である微小機構上に、形状磁気異方性をもった磁性体を成膜する。外部磁場を与えると、磁性体中に外部磁場とほぼ一致する方向の磁化が生成される。微小機構のもつ磁性体の磁化容易軸と、外部磁場方向がずれていた場合、磁性体に磁気異方成トルクが発生し、磁化容易軸と外部磁場方向を一致させる方向にはたらく。すなわち磁気異方性トルクが復元力としてはたらく。磁気異方性トルクは永久磁石でない軟磁性体にもはたらくため、MEMS 技術への適応性が高い。

製作した微小浮上機構の写真を Figure 1 に示す。微小浮上機構は磁性体回転翼と回転軸を支えるアーチ、長方形型磁性体薄膜をもつボディからなる。ディスクがボディの下で回転軸に取り付けてあり、回転翼の生成する推力を微小浮上機構全体に伝達する。交流磁場により磁性体回転翼を駆動すると同時に、微小浮上機構の自由度を拘束する。磁場方向を x 軸方向とし、磁場に垂直な平面内で、水平方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とする。Figure 2(a) に示すように、磁化容易軸が x 軸方向を向いているときが、最も安定な状態である。Figure 2(b), (c) に示すように、磁気異方性トルクによって微小浮上機構の y 軸、 z 軸まわりの回転

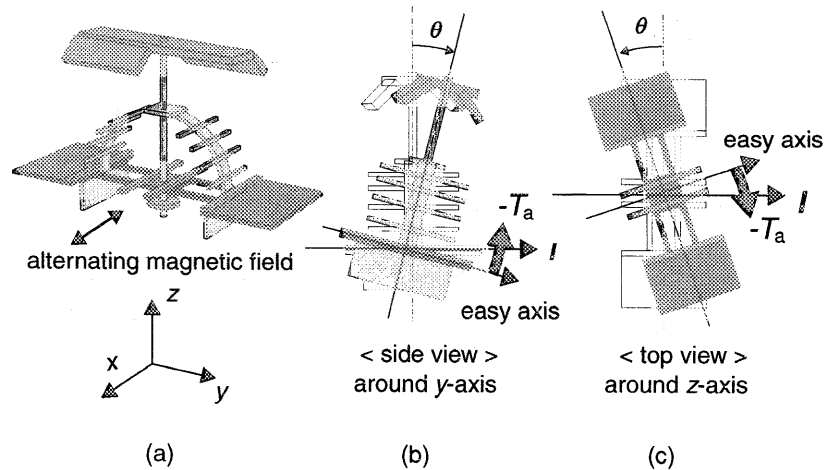


Figure 2 微小浮上機構の自由度拘束の原理.

を抑制する. すなわち外部交流磁場により, 2 自由度の拘束が可能である.

磁性体回転翼の回転原理を述べる. 磁性体回転翼は単相 2 極の同期モータの一種と考えられる. 外部交流磁場と同じ周波数の初期回転を与えると, 外部磁場に同期し回転する. この初期回転の有無により, 外部交流磁場による回転と拘束の選択が可能となる. 回転翼に上方から気流を与えることによって, 上向きに推力を生成する, 正しい向きの初期回転を容易に与えられる.

回転翼が生成できる推力, および回転によって生じた空気抵抗によるトルクは, 翼素理論を用いて導出することができる. 翼素理論は微小幅の翼素に発生する推力と空気抵抗によるトルクを導出し, それらを翼長方向に積分することによって, 翼全体による推力と空気抵抗によるトルクを求める方法である. このとき推力 T , 空気抵抗によるトルク T_f は,

$$T = \frac{2}{3} \pi^2 \rho b c f^2 R^3 (C_l + \phi C_d) \quad (5)$$

$$T_f = \frac{1}{2} \pi^2 \rho b c f^2 R^4 (C_d - \phi C_l) \quad (6)$$

と表される. ρ は空気の密度, b は翼の枚数 ($b=2$), c は翼弦長, f は回転周波数, R は翼長, C_l , C_d は揚力係数, 抗力係数, ϕ は誘導角度である.

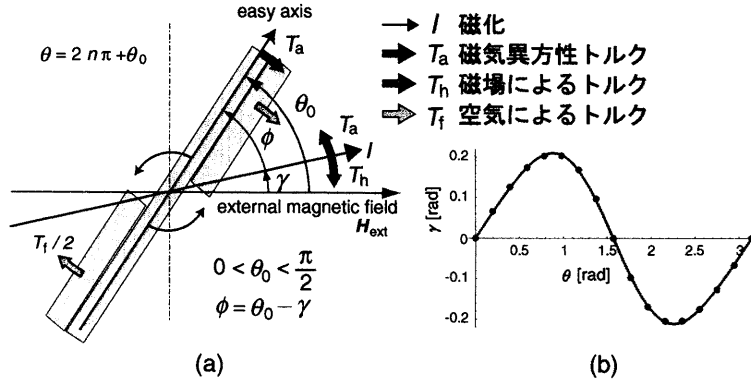


Figure 3 (a) 磁性体回転翼に発生するトルク. (b) 磁化と外部磁場のずれ.

磁性体回転翼に発生するトルクは Figure 3(a) に示すように、磁気異方性トルク、磁場によるトルク、空気抵抗によるトルクがある。磁気異方性トルクは、式 (4) において、 θ を ϕ におきかえたものである。磁化容易軸は翼長方向、磁化困難軸は翼弦方向である。磁場によるトルクは、

$$T_h = V_{mag} \mathbf{I} \times \mathbf{H}_{ext} = V_{mag} I H_{ext} \sin \gamma \quad (7)$$

で表される。空気抵抗によるトルクは式 (6) で表される。

磁化 I は $T_a = T_h$ の関係を満たしながら変化する。簡単のため、 $I = \chi H_{in}$ とする。ここで H_{in} は磁性体内部を貫く磁場であり、次式で表される。

$$H_{in} = H_{ext} \cos \gamma - H_d \quad (8)$$

式 (1)、式 (8) から磁化 I は、

$$I = \frac{\chi H_{ext} \cos \gamma}{1 + (N_a \cos^2 \phi + N_b \sin^2 \phi) \frac{\chi}{\mu_0}} \quad (9)$$

と表される。これと $T_a = T_h$ の関係から、磁化の磁場とのずれ角 γ は回転角度 θ のみの関数として導出できる。解析的に求めることはできないが、いくつかの θ の値に対する γ の値を求め、近似すると Figure 3(b) に示すように、

$$\gamma = 0.206 \sin 2\theta - 0.0212 \sin 4\theta \quad (10)$$

と表される。

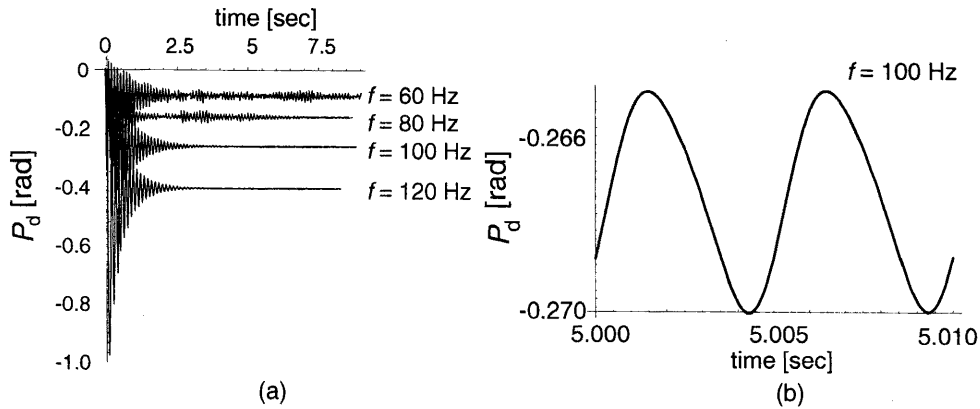


Figure 4 回転のシミュレーション結果.

磁性体回転翼の運動方程式は次式で表される.

$$I_M \theta'' = -T_a - T_f \quad (11)$$

I_M は磁性体回転翼の慣性モーメントである. 計算結果を,

$$P_d = \theta - 2\pi ft \quad (12)$$

で定義される P_d で評価する. P_d は翼の回転の位相と外部磁場の位相のずれを表す. 翼の回転が外部磁場と同期しているとき, P_d は収束する. シミュレーション結果を Figure 4 に示す. Figure 4(a) から回転翼が外部磁場に同期していること, 周波数が大きくなると回転と磁場の位相のずれが大きくなること

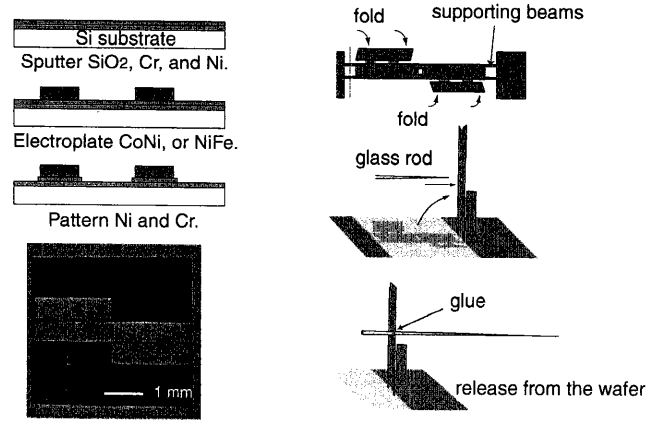
わかる. Figure 4(b) は収束後の P_d の変化であるが, 振動が非常に小さい. これにより回転翼がほぼ等角速度運動をしていることがわかる.

Figure 5 に微小機構の製作プロセスを述べる. まず磁性体回転翼の製作プロセスについて述べる. シリコン基板上に酸化シリコン, クロム, ニッケルをスパッタする. 酸化シリコンは犠牲層, クロムは密着層, ニッケルはメッキの下地層である. コバルトニッケル合金や, 鉄ニッケル合金などの磁性材料を電気メッキした後, ニッケル, クロムをパターニングする. その後フッ酸によって犠牲層である酸化シリコンをエッチングし, 構造をリリースする. 支持梁により構造を支え, 基板へのスティッキングを防いでいる. リリース前の写真を示す. 翼の部分をマイクロマニピュレータで折り曲げ, 迎角を生成した後, 一方の支持

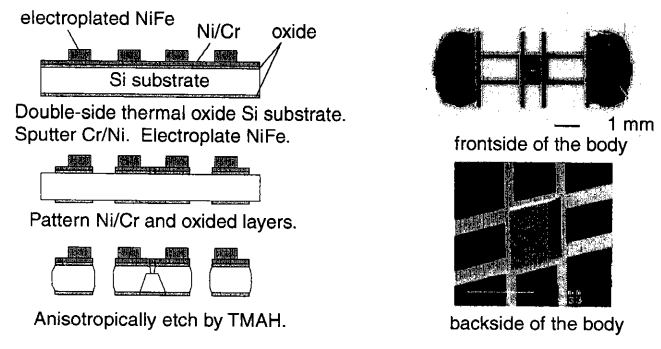
梁を切り取り，構造を垂直に起こす．回転軸となる微小ガラス管を挿入し，接着する．もう一方の支持梁を切断することで，磁性体回転翼が基板からリリースされる．次にボディ部分の製作プロセスについて述べる．両面熱酸化したシリコン基板上にクロムとニッケルをスパッタする．ニッケル上に鉄ニッケル合金を電気メッキにより成膜し，形状磁気異方性をもつ長方形型磁性体薄膜を製作する．ニッケル，クロム，酸化膜をパターニングし，表面はニッケル，裏面は酸化膜をマスクに TMAH によりシリコンを異方性エッチングする．写真はボディ部分の表面と裏面である．裏面のくぼみ部分でディスクが回転し，推力を伝達する．最後に微小浮上機構の組み立てについて述べる．電気メッキにより成膜された鉄ニッケル合金を折り曲げることにより，アーチを製作し，ボディにはめ込む．このときアーチは自身の応力によって特別な接着なしにボディに固定される．回転軸となる微小ガラス管を，回転翼，アーチ，ボディ，ディスクの順に挿入し，回転翼とボディに接着する．

y 軸周りのふれ角を高速度カメラによって測定した．Figure 6(a)は時間に対するふれ角の変化を示す．測定結果によると， y 軸周りのふれ角は外部磁場の周波数，すなわち回転翼の回転周波数と同期している．よって y 軸周りのふれ角の原因は，回転翼の軸のぶれであることがわかる．Figure 6(b)，Figure 6(c) はそれぞれ，ふれ角の平均角度と振動の振幅である．結果からわかるように，平均角度は ± 2.5 度以内，振動の振幅は 3 度以内という非常に小さな値を示し，磁気異方性トルクにより自由度が拘束されているといえる．

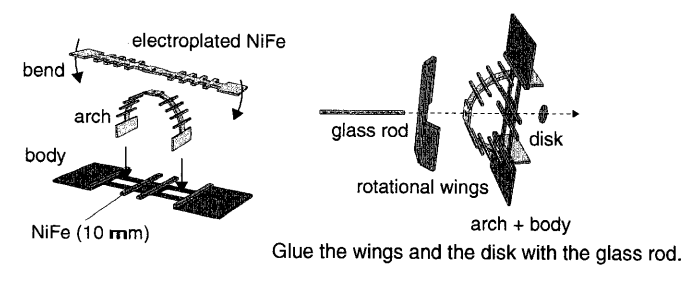
z 軸周りのふれ角を高速度カメラによって測定した．Figure 7(a)は時間に対する変化を示す． z 軸周りのふれ角は外部磁場には同期していない．これは z 軸周りのふれ角の原因が，ディスクとボディ間の摩擦によるためである．ディスクとボディ間の摩擦は，両者の間にはたらく垂直抗力に比例すると考えられる．垂直抗力は，回転翼の生成する推力から，回転翼，回転軸，ディスクの重量を差し引いたものであるため，摩擦係数を μ とすれば摩擦力 F は次式で表される．



(a)



(b)



(c)

Figure 5 (a) 磁性体回転翼, (b) ボディ, (c) 微小浮上機構の製作プロセス.

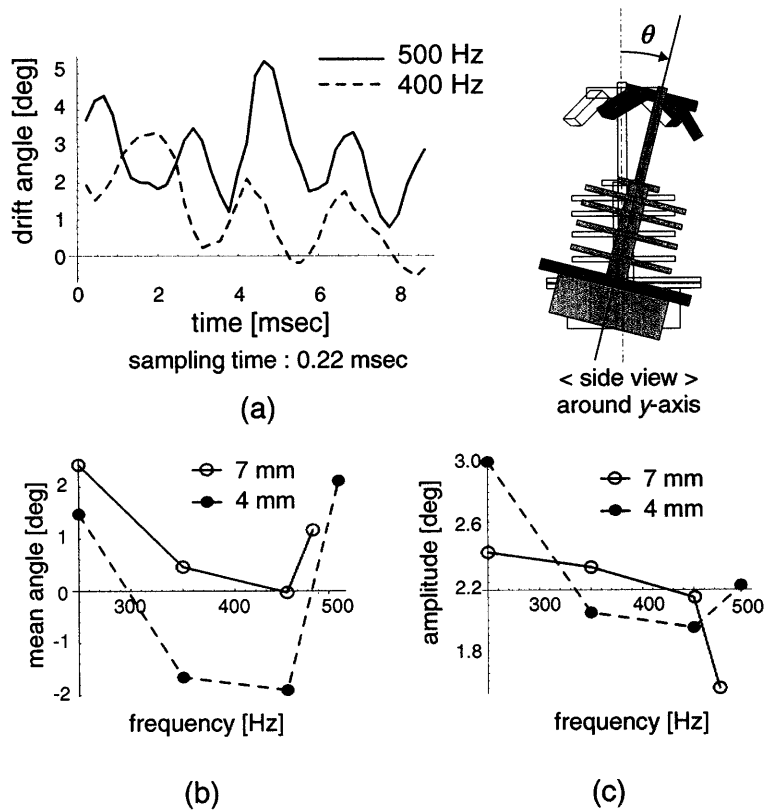


Figure 6 y 軸周りのふれ角.

$$F = \mu \cdot \frac{2}{3} \pi^2 \rho b c (f^2 - f_w^2) R^3 (C_l + \phi C_d) \quad (13)$$

ここで、 f_w は回転翼の浮上周波数である。すなわち F は $(f^2 - f_w^2)$ に比例し、周波数が増加すれば大きくなる。2 種類のボディをもつ微小浮上機構で実験をおこなった。タイプ A は通常ボディ、タイプ B は中央の 2 本の長方形型磁性体薄膜をもたないボディをもつ。タイプ B はタイプ A に比べ磁気異方性が小さいので、ふれ角も増加する。Figure 7(b) は周波数に対するふれ角の関係を示している。周波数の増加とともにふれ角が増大している。タイプ A は、ディスクとボディの摩擦力によるふれ角を 550 Hz において 2.5 度に抑えた。実験に用いた微小浮上機構の回転翼の浮上周波数は $f_w = 246$ Hz であった。ディスクとボディ間の摩擦と釣り合う磁気異方性トルクは $\sin 2\theta$ に比例する。Figure 7(c) に

$f^2 - 246^2$ と $\sin 2\theta$ の関係を示す。実験結果は比例関係を示しており、磁気異方性トルクが、ディスクとボディ間の摩擦により発生するふれ角を抑え、微小浮上機構の z 軸周りの自由度を拘束していることがいえる。

微小浮上機構は磁場方向 (x 軸方向) 周りには自由度を拘束されていないため、 x 軸周りの過度の回転を抑制するために、ガイドを 2 本設置した。微小浮上機構は翼の回転周波数 540 Hz において、 y 軸、 z 軸まわりに自由度を拘束されながら、ガイドまで浮上することに成功した。浮上の様子を Figure 8 に示す。

本研究の結論を以下に記す。基板から離れ自由度が増した微小機構の姿勢制御は、全てを制御するのではなく、外部磁場によっていくつかの自由度を拘束するのがよい。微小機構に磁気異方性をもたせれば、磁気異方性トルクによって 2 自由度の拘束が可能である。また拘束にも利用できる外部交流磁場により、同時に磁性体回転翼を駆動できる。駆動と拘束の選択性は、初期回転に依存している。上方から気流を与えると、ボディやアーチの磁性体は回転しないが、磁性体回転翼はその翼形状により初期回転をおこなう。シミュレーションにより、磁性体回転翼は外部磁場に同期し、ほぼ等角速度運動をおこなうことがわかった。MEMS 技術によって翼長 2.5 mm の磁性体回転翼をもつ微小浮上機構を製作し、実験をおこなった。微小浮上機構は磁気異方性をもち、磁化容易軸が磁場方向 (x 軸方向) を向くときが最も安定である。磁気異方性トルクによって y 軸周りのふれ角の平均角度を ± 2.5 度以内、振動の振幅を 3 度以内に抑えられた。また z 軸周りには、ディスクとボディの摩擦力による回転を、550 Hz において 2.5 度に抑えた。これらのことから外部交流磁場による 2 自由度の拘束が有効であることを示せた。微小浮上機構は 540 Hz でガイドまでの浮上に成功し、外部交流磁場によって回転翼の駆動と微小浮上機構の姿勢拘束を同時におこなえることが実証された。

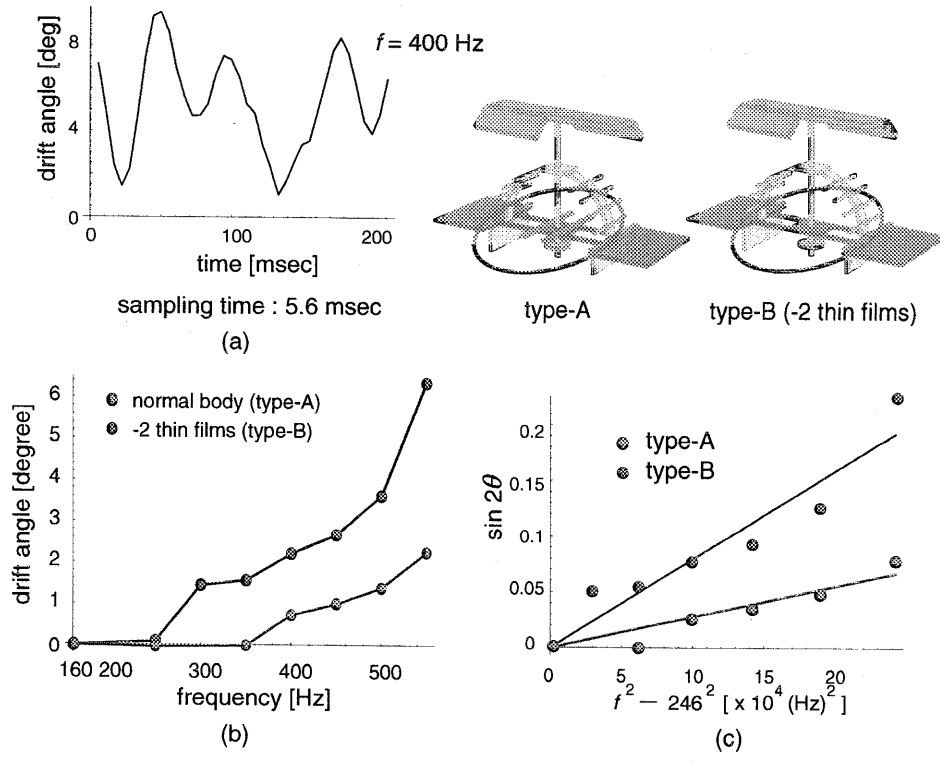


Figure 7 z 軸周りのふれ角.

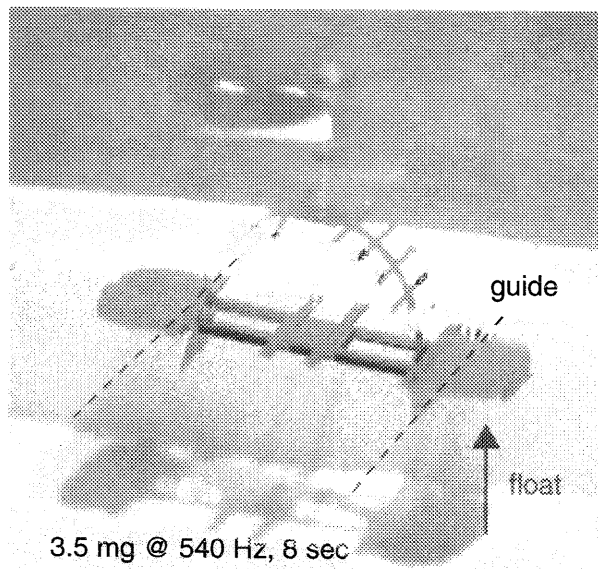


Figure 8 磁性体回転翼をもつ微小浮上機構のガイドへの浮上.