

MEMS 振動型ジャイロ스코ープの動作原理と最近の動向

塚本 貴城, 田中 秀治

1. MEMS 振動型ジャイロ스코ープの動作原理 (塚本 貴城)

1.1 2 自由度振動子の運動方程式

MEMS の振動型ジャイロスコープ (CVG, Coriolis Vibratory Gyroscope) は、図 1 に示すような x-y 面内の 2 自由度振動子を用いてその動作を説明することができる。実際のジャイロスコープは、次節で実例として示すような複雑な構造をしているが、そのほぼ全てがこの図のような単純な 2 自由度振動子としてモデル化することができる。z 軸まわりの角速度 Ω_z が加わった場合のこの振動子の運動方程式は、

$$m\ddot{x} + C_x\dot{x} + K_x x = f_x + 2m\dot{y}k\Omega_z \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + C_y\dot{y} + K_y y = f_y - 2m\dot{x}k\Omega_z \quad (2)$$

となる。ここで、 m, C_i, K_i, f_i, k ($i = x, y$) はそれぞれ、振動子の質量、減衰定数、ばね定数、加振力、角度ゲインである。角度ゲインは、振動質量に影響するコリオリ力の割合を示しており、図 1 に示すような理想的な集中質量系では 1 となるが、ばね部等の質量が相対的に無視できなくなると 1 以下の値となる。この角度ゲインの値は振動子の構造によって決定されるため、時間や温度等によって変動しない定数である。右辺第 2 項がコリオリ力による影響を示しており、この項の存在により、x 軸と y 軸の運動が相互に影響することになる。

この式は、

$$\ddot{x} + \frac{\omega_x}{Q_x}\dot{x} + \omega_y^2 y = \frac{f_x}{m} + 2\dot{y}k\Omega_z \quad (3)$$

$$\ddot{y} + \frac{\omega_y}{Q_y}\dot{y} + \omega_x^2 x = \frac{f_y}{m} - 2\dot{x}k\Omega_z \quad (4)$$

のように書き換えることができる。ここで、 ω_i と Q_i はそれぞれ、(無減衰の場合の) 系の固有振動数と振動の Q 値であり、

$$\omega_i = \sqrt{K_i/m} \quad (5)$$

$$Q_i = \sqrt{mK_i/C_i} \quad (6)$$

の関係がある。また、 $\tau_i = \frac{2Q_i}{\omega_i}$ が共振周波数で駆動した場合の系の応答時定数になる。

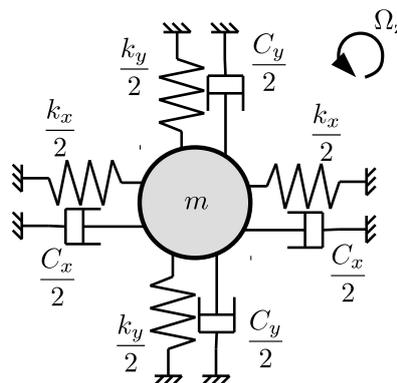


図 1: 2 自由度振動子。

1.2 熱機械ノイズ

MEMS のような微細構造体では、熱運動によって生じるランダム振動の影響が相対的に大きくなり、これによりジャイロスコープの SN 比の上限が決まってしまう。

熱振動は、次式のような白色雑音を加振力に加わるとしてモデル化できる [1]。

$$\sigma_f = \sqrt{4k_B T C_i} \quad (7)$$

これが、センス軸（y 軸）に加わるとすると、熱雑音によるセンス軸の熱振動振幅は、式（4）を用いることで次式のように求められる。

$$\sigma_y = \frac{1}{\omega_x \sqrt{(\omega - \omega_x)^2 + \omega^2 / (4Q_y^2)}} \sqrt{\frac{k_B T \omega_x}{m Q_y}} \quad (8)$$

上式と後述のスケールファクタを用いると、ノイズ等価角速度（熱ノイズに相当する入力角速度）は、

$$\Omega_{\text{noise}} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{k_B T}{m Q_y X_0^2 \omega_x}} \quad (9)$$

となる。この式より、大きな質量（ $m \rightarrow$ 大）を、大振幅で（ $X_0 \rightarrow$ 大）、速く（ $\omega_x \rightarrow$ 大）動かし、センス軸の Q 値を大きくする（ $Q_y \rightarrow$ 大）ことにより、低ノイズ化できることがわかる。

1.3 振幅変調型ジャイロスコープ

振幅変調（AM, Amplitude Modulation）ジャイロスコープは、ある 1 軸（例えば、図 1 の x 軸）にそって振動子を駆動し、直交方向（y 軸）に生じる振動の振幅から角速度を求める。図 2 に、AM ジャイロスコープのブロック図を示す。式（3）において、コリオリ力の項を無視すると、一般的な減衰振動子の強制振動の式となっていることがわかる。ゆえに、x 軸の振動は $\omega = \omega_x \sqrt{1 - \frac{1}{2Q_x^2}}$ において最大振幅をとる。ところで、一般に CVG の Q 値は数 1000～数百万程度の極めて大きい値であるので、最大振幅は $\omega = \omega_x$ で生じると考えてよい。また、この時の、加振力と振動振幅の位相差は -90° となる。よって、この位相差が一定値（ -90° ）になるように、位相同期ループ（PLL, Phase Locked Loop）によってフィードバック制御することで、x 軸を共振駆動させることができる。また、振動の振幅を同期検波により検出し、この振幅が一定になるようにフィードバック制御する（AGC, Automatic Gain Control）。Q 値や共振周波数は環境温度等の影響により変動するが、PLL と AGC を用いることで x 軸の振動を一定に保つことができる。PLL と AGC により、x 軸が

$$x = X_0 \sin(\omega_x t) \quad (10)$$

のように駆動されているとする。この時、式（4）は、

$$\ddot{y} + \frac{\omega_y}{Q_y} \dot{y} + \omega_y^2 y = \frac{f_y}{m} - 2X_0 \omega_x k \Omega_z \cos(\omega_x t) \quad (11)$$

となる。上式からわかるように、y 軸の運動も一般的な減衰系の強制振動の形となっている。これを、 $f_y = 0$ として解くと、y 軸の振幅、 Y_0 、は、

$$Y_0 = \frac{kX_0}{\sqrt{(\omega_y - \omega_x)^2 + \left(\frac{\omega_y}{2Q_y}\right)^2}} \Omega_z \quad (12)$$

となる。ここで、 $|\omega_y - \omega_x| \ll \omega_x, \omega_y$ を仮定した。

この式から、AM ジャイロスコープの感度（SF、スケールファクタ）を求めることができる。もし、x 軸と y 軸の共振周波数が一致している場合には、式（12）より、

$$\text{SF} = \frac{dY_0}{d\Omega_z} = \frac{2Q_y k X_0}{\omega_y} = k \tau_y X_0 \quad (13)$$

となる。この式より、y 軸（センス軸）の Q 値が高い方が感度が大きくなることがわかる。シリコンを用いた MEMS 振動子では、100 万程度の Q 値を得ることができ、高感度化が可能であることがわかる。しかしながら、Q 値が大きい場合には、時定数（ τ_y ）も大きくなるため、測定バンド幅が極めて小さくなってしまふ。これは、スケールファクタとバンド幅にトレードオフの関係が存在することを意味する。また、Q 値が温度、経時変化などで変動すると、感度変動してしまうという問題点がある。

そこで、温度安定性とバンド幅を向上させるために、通常は x 軸と y 軸の共振周波数を意図的にずらしている。式

(12) において、周波数ミスマッチ量を共振ピーク幅よりも大きくする ($|\omega_y - \omega_x| \gg \frac{\omega_y}{2Q_y}$) と、スケールファクタは、

$$SF = \frac{kX_0}{|\omega_y - \omega_x|} \quad (14)$$

となる。x 軸と y 軸は同じ材質（通常はシリコン）でできているため、ほぼ同等の温度係数を持っている。そのため、温度変化に対して比較的安定である。また、測定バンド幅は $|\omega_y - \omega_x|$ となり、所望の値に設計することができる。しかしながら、やはり式 (14) からわかるように、スケールファクタとバンド幅にはトレードオフが存在する。

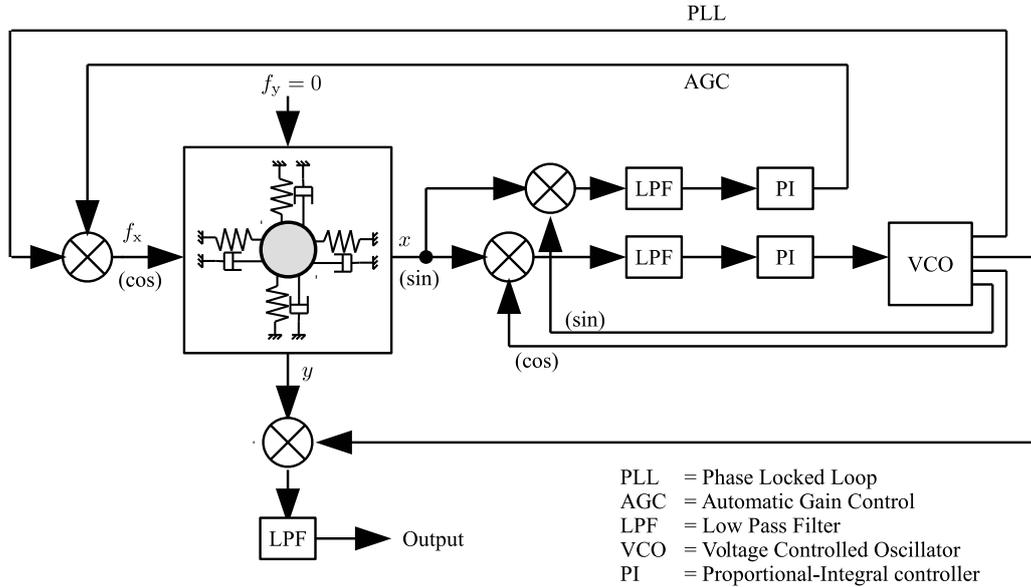


図 2: 振幅変調 (AM) ジャイロ스코ープのブロック図。

1.4 フォースリバランス型ジャイロ스코ープ

AM 型の欠点である、スケールファクタとバンド幅のトレードオフは、高い Q 値の振動子では、ある入力に対して出力振幅が一定になるまでの時間（応答の時間定数 τ ）が大きいことに由来する。そこで、フィードバック制御によりセンス軸の振幅を常に一定（通常は 0）に維持させることで、応答速度を改善したのがフォースリバランス型のジャイロスコープである [2]。

図 3 にブロック図を示す。ドライブ方向の駆動に関しては AM 型と同一である。AM 型との違いは、同期検波によりセンス軸の振動を検出し、この振幅が目標値（通常は 0）になるようにフィードバック制御している点である。このブロック図は、同図 (b) のように、簡略化することができる [3]。よって、角速度を入力とした場合の、閉ループ伝達関数は、

$$\frac{kX_0(K_P s + K_I)}{s^2 + \left(\frac{\omega_y}{2Q_y} + \frac{K_P}{2m\omega_y}\right)s + \frac{K_I}{2m\omega_y}} \quad (15)$$

となる。上式で $K_I = 0$ とすれば、

$$\frac{kX_0 K_P}{s + \left(\frac{\omega_y}{2Q_y} + \frac{K_P}{2m\omega_y}\right)} \quad (16)$$

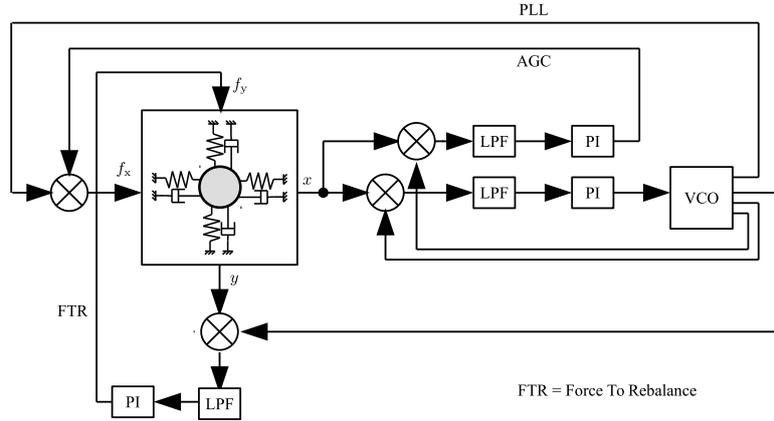
となる。これは、バンド幅が $\omega_{fr} = \frac{\omega_y}{2Q_y} + \frac{K_P}{2m\omega_y}$ となることを意味している。図 4 に、フィードバックによるバンド幅向上の原理の模式図を示す。比例要素 (K_P) のみだと定常偏差が残るので、通常は積分要素 (K_I) も用いて定常偏差を低減させる。しかし、積分要素によって $\omega = \sqrt{\frac{K_I}{2m\omega_y}}$ に、 $Q = \sqrt{\frac{K_I}{2m\omega_y} \frac{1}{\omega_y/(2Q_y) + K_P/(2m\omega_y)}}$ のピークが生じることになる。フィードバックが完全に効いている場合には、スケールファクタは、

$$SF = 2km\omega_y X_0 \quad (17)$$

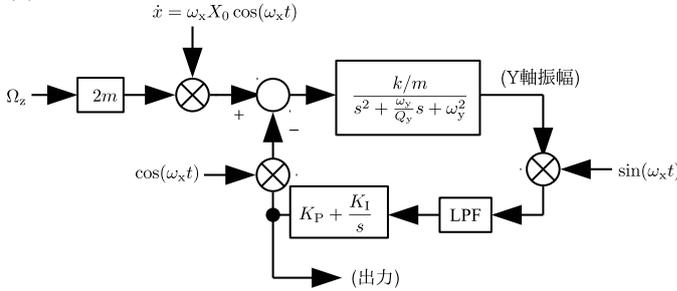
となる。ただし、 ω_y は一般に温度依存性を持つので、スケールファクタが温度依存性を持つことになり、これを補正

する必要がでてくる。

(a)



(b)



(c)

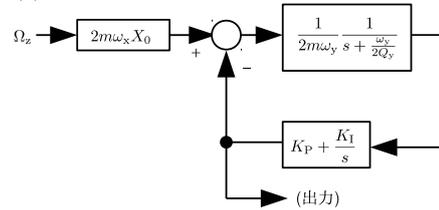


図 3: (a) フォースリバランス型ジャイロスコープのブロック図と、y 軸の (b) 制御モデルと、(c) その簡易化モデル。

1.5 周波数変調型ジャイロスコープ

式 (3)、(4) において、 $K_x = K_y$ 、 $C_x = C_y$ を仮定すると、x 軸と y 軸が等価な振動子（縮退振動子）の運動方程式となる。縮退とは、2つの固有モードが等しい固有周波数を持っている状態である。ただし、この振動子が縮退するのは、角速度 Ω_z が 0 の時のみである。角速度が加わると縮退が解け、2つの異なる固有周波数を持った固有モードに分離する。この2つの固有モードは、図 5 に示すように、時計回転（CW）モードと、反時計回転（CCW）モードであり、それぞれの固有周波数は以下ようになる [4, 5]。

$$\omega_{CW} = \omega_0 + k\Omega_z \quad (18)$$

$$\omega_{CCW} = \omega_0 - k\Omega_z \quad (19)$$

ここで、 ω_0 は角速度が 0 の時の固有周波数である。以上のように、固有振動数が角速度によって変調される（FM, Frequency modulation）ため、周波数（より現実的には、後述のように2つの周波数の差）を計測することで角速度を知ることができる。 ω_0 は材料のヤング率によって影響を受けるため、一般に温度依存性を持つが、CW モードと CCW モードの周波数差に着目すると、

$$\omega_{CW} - \omega_{CCW} = 2k\Omega_z \quad (20)$$

となり、センサーの出力から ω_0 の影響を完全に排除することができる。この時のスケールファクタは、

$$SF = 2k \quad (21)$$

となる。角度ゲイン k は構造によって決まる定数であるため、スケールファクタの温度変化を極めて小さくすることができる。

また、AM 型やフォースリバランス型の場合は、式 (13)、(17) のようにスケールファクタにドライブ軸の振動振幅 X_0 が含まれているため、小型化することでスケールファクタが低下してしまう。一方、FM 型の場合はスケールファクタは振幅に依らないので、小型化によるスケールファクタの低下は見られない。（ただし、熱機械ノイズについては、AM 型等と同様に式 (9) にしたがって増大する。）

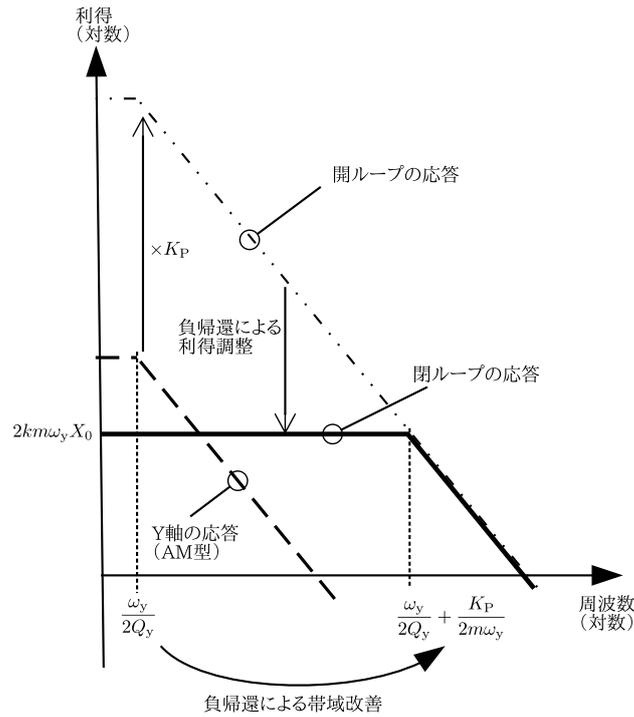


図 4: フィードバックによるバンド幅向上 (K_P による影響)。

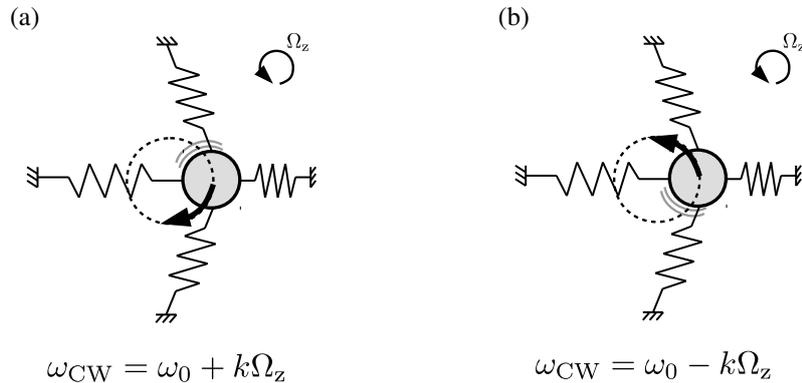


図 5: z 軸まわりに角速度が加わっている場合の縮退振動子の固有モード。(a) 時計回転 (CW) モードと、(b) 反時計回転 (CCW) モード。

1.6 積分型ジャイロスコープ

ここまでに紹介したジャイロスコープは全て角速度 Ω_z を測るものであった。ナビゲーション用途などで回転角度が必要な場合には、この角速度を数値積分する必要がある。しかしながら、数値誤差の蓄積によるドリフトや、サンプリングと演算速度によってバンド幅が制限されてしまうという問題がある。一方、積分型ジャイロスコープは、これらとは異なり、回転角度（つまり $\int \Omega_z dt$ ）を直接測るものである。積分型ジャイロスコープには、FM 型と同様に温度依存性が無く、バンド幅が無限であるといった特徴がある [6]。最も有名な積分型ジャイロスコープの例はフォーコー振子である。

積分型ジャイロスコープも、FM ジャイロスコープと同様に、縮退振動子を使用する。簡単のために、減衰が無い振動子を用いて動作の概要を説明する。縮退振動子に、初期状態として直線振動を与えると、無減衰の場合には駆動力が無くても振動が持続する。また、静止状態ではこの直線振動の方向は変化しない。一方、回転を加えると、その角速度によって生じるコリオリ力によって振動方向と直角方向に力が生じる。この力によって振動方向が変化するが、その振動方向は加わった回転角度に比例するため、振動方向から回転角度を知ることができる。

しかしながら、現実には減衰が存在するため、振動方向を乱さずに振動を維持させる（振動子に振動エネルギーを与

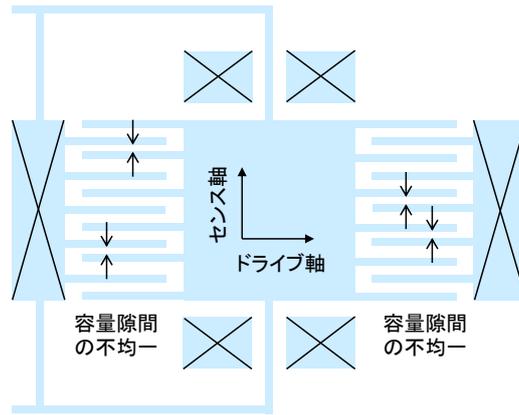


図 6: MEMS ジャイロスコープの構造の一部。(楕歯トランスデューサの隙間が不均一な場合)

える) 必要がある。振動方向を乱さずに直線振動を励振する方法としては、パラメトリック励振による等方的加振 [7]、検出された振動方向に合わせて x 軸、y 軸の駆動力を調整する方法 [8]、独立に制御された CW 振動と CCW 振動を重畳させる方法 [5] などがある。

スケールファクタは、

$$SF = k \quad (22)$$

となり、FM 型の場合と同じように、振動子の振動振幅や温度変化に影響されない。

2. MEMS ジャイロスコープの実際 (田中 秀治)

2.1 理想的ではない実際のジャイロスコープにおける問題と対策

第 1 章において振動ジャイロスコープの理論を説明したが、そこでは理想的な 2 自由度振動系を仮定していた。ここで「理想的」というのは、2 軸が直交しているということであるが、実際には主に加工誤差によって 2 軸は直交しない。その結果、同相バイアスエラー、およびクアドラチャエラーと呼ばれる誤差が生じる。どちらもコリオリ力以外によるセンス軸の励振に起因する誤差である。これについて以下に具体例をあげて説明する。

MEMS のトランスデューサとして一般的な楕歯アクチュエータ (図 6) を考える。今、加工誤差によってドライブ軸の楕歯の間隔が一定ではないと仮定する。楕歯の間隔が一定であれば、楕歯にそった方向にみに力が働くが、そうでなければ、直交する方向、つまりセンス軸にも力が働く。この力はドライブ軸の励振力と同相であるから、これは同相バイアスエラーになる。また、ドライブ軸の楕歯アクチュエータが動けば、楕歯の重なる長さが変化する。これによって上述のセンス軸に働く力が変調される。共振点ではドライブ軸の変位は加振力に対して 90° 位相がずれるので、前述の変調によるセンス軸の振動変位は、ドライブ軸のそれと 90° 位相がずれる。したがって、これはクアドラチャエラーになる。

センス軸とドライブ軸とがそもそも幾何的に直交していなければ、ドライブ軸の加振力によってセンス軸も加振されるので、同相バイアスエラーが生じる。また、構造が非対称であると、ドライブ軸の変位による歪がセンス軸に対して非対称な応力を生むので、クアドラチャエラーが生じる。さらに、機械的に理想的に共振子ができていても、ドライブ軸の駆動信号がセンス軸にフィードスルーすれば、同相バイアスエラーが生じる。

クアドラチャエラーはフィードバック制御によって抑制できるものの、同相バイアスエラーはジャイロスコープにとって基本的にコリオリ力による加振と区別がつかないので、本質的な誤差である。その第一の対策は、センス軸とドライブ軸とがデカップルされた設計とし、その上で加工誤差を減らし、できるだけ完璧なジャイロスコープ構造を作ることである。図 7 にデカップル構造の一例を示す [9]。マスは x、y 方向に振動するが、各軸の楕歯トランスデューサには、各軸にしか動かないシャトルを介して繋がっている。

信号処理によって同相バイアスエラーをキャンセルする方法も提案されている [10]。上述の同相バイアスエラーはドライブ軸の駆動由来であり、駆動の位相を 180° 回せば、それに依りて逆相になる。したがって、 0° 位相の駆動と 180° 位相の駆動を短時間で切り替えて、それらの出力を足し合わせれば、駆動由来の同相バイアスエラーはキャンセルできる。ただし、この方法が有効なのは、切り替え周波数より十分に低い帯域の角速度に対してのみである。足し合わせる前の出力を使えば、高い周波数の角速度も測定できるが、Q 値の高い共振子は急には停止・起動できないので、減速から逆相での起動の間、振幅が小さな状態になり、その結果、式 (9) からわかるようにアングラランダムウォーク (ARW) が増加する。

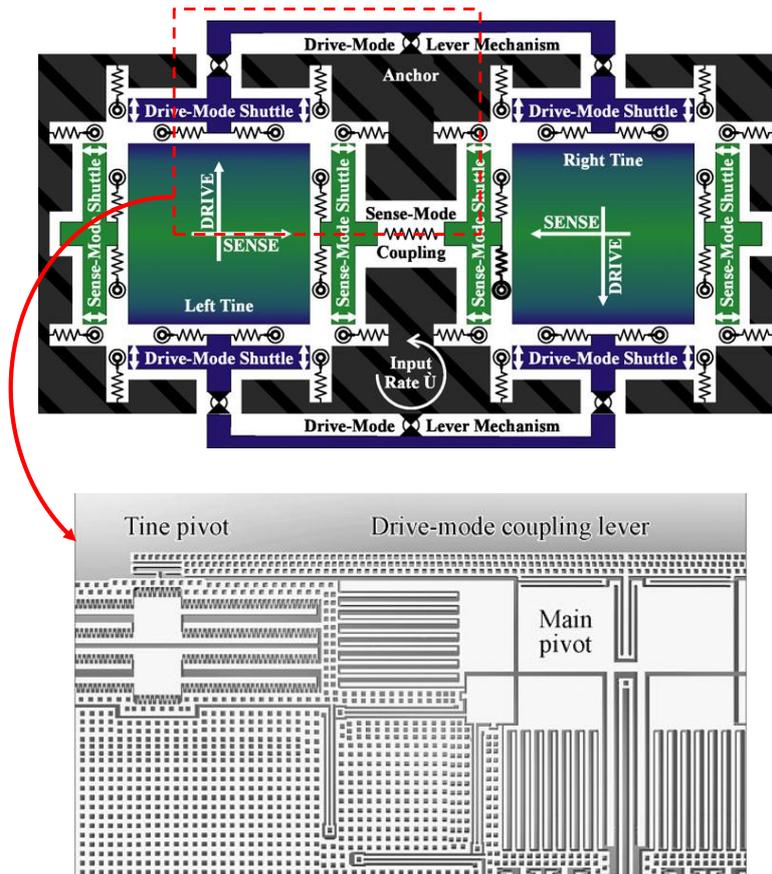


図 7: クアッドマスジャイロスコープのデカップル構造。(文献 [9] から引用して改変)

2.2 先進的な MEMS ジャイロスコープ

伝統的な MEMS ジャイロスコープは、第 1 章で説明した振幅変調型とフォースリバランス型である。ともにセンス軸とドライブ軸の共振周波数が数 % 異なっており、これは「モードミスマッチ」と呼ばれる。振幅変調型でモードミスマッチが必要な理由は式 (14) に説明した通りである。しかし、一方でセンス軸とドライブ軸の共振周波数が一致していたときの方が感度は高い。この状態を「モードマッチ」と呼ぶ。先進的な MEMS ジャイロスコープは、大抵、モードマッチを前提としている。ここではそのようなジャイロスコープを 2 つ紹介する。

2.2.0.1 モードマッチ・フォースリバランス型ジャイロスコープ

モードマッチとする場合、1.4 節で説明したようにフォースリバランスが必須である。そして、モードマッチとすることにあたっていくつかの問題を解決する必要がある。まず、そもそもどうやってモードマッチさせるかという問題がある。センス軸とドライブ軸の共振周波数が一致するように設計しても、加工誤差のため両者は厳密には一致しない。これに対して最も一般的に取られる対策は、電気的チューニングである。平行平板電極にバイアス電圧をかけると、それによる静電引力によってマスは容量隙間が狭まる方向に動きやすくなる。これはマスを支えるばねが弱くなったことと等価であるので（ソフトスプリング効果と呼ばれる）、共振周波数を下げることができる。電気的チューニングを行う軸の共振周波数が若干高くなるように公差を設定しておけば、バイアス電圧によってモードマッチを実現できる。もう 1 つの方法はトリミングである。ウェハ加工の後、センス軸とドライブ軸の共振周波数を測定し、レーザーアブレーションなどによって共振周波数を調整する。

電気的チューニング自体は簡単であるが、共振周波数には温度特性があり、しかも温度と共振周波数との関係には様々な原因によって再現性があるとは限らないので、電気的チューニングはクローズドループで行う必要がある。その方法として次のものが知られている。クアドラチャ補正信号にフォースリバランスループの帯域外の変調信号（疑似クアッド信号）を付加し、これをセンス軸で同期検波する。モードマッチしていれば、疑似クアッド信号は検出されないはずである。つまり、この同期検波の出力が 0 になるようにバイアス電圧をフィードバック制御すればよい。モードマッチによって発生する問題の 1 つは、式 (17) に説明されるスケールファクタの共振角振動数 ω_y 依存性である。 ω_y には温度依存性があるので、スケールファクタが温度依存性を有することになる。この問題の解決法として、スケールファクタをインラインで測定、補正する方法が報告されている [11]。図 8 にそのシステムダイアグラムを示

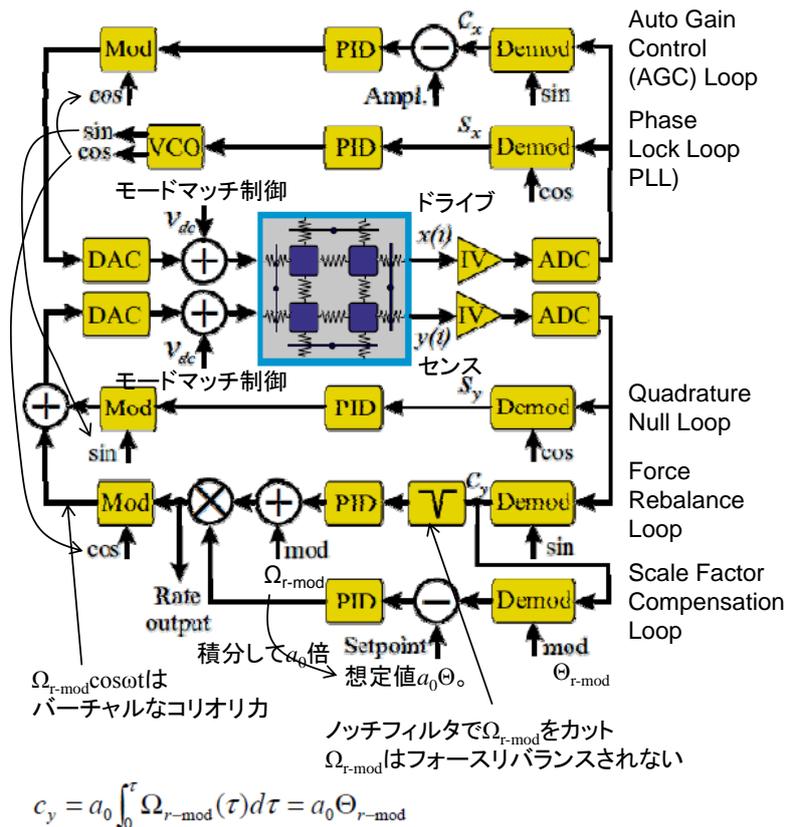


図 8: スケールファクタ補正ループを有するモードマッチ・フォースリバランス型ジャイロ스코ープのシステムダイアグラム。(文献 [11] から引用し、改変)

す。フォースリバランスループに疑似レート信号 Ω_{r-mod} を加える。 Ω_{r-mod} は共振子に疑似コリオリ力を生じさせ、その応答がフォースリバランスループに戻ってくる。これが目標値になるようにレート信号を調整すれば、スケールファクタが一定になる。ただし、 Ω_{r-mod} がフォースリバランス制御されるとその応答が観測できないので、フォースリバランスループには Ω_{r-mod} の周波数に対応するノッチフィルタを入れる。その結果、 Ω_{r-mod} に対してはオープンループとなるので、Q 値の高い、つまり時定数の大きな共振子では、観測される信号は Ω_{r-mod} の時間積分値になる。もう 1 つのわかっている問題は、電気的チューニングによる Q 値の低下である。Q 値の高い共振子は対称性の高い構造を有している。これはアンカーロスを減らすには、対称構造とする必要があるからである。しかし、電気的チューニングのためにバイアス電圧を印可すると、アンカーにかかる力のバランスが崩れ、Q 値が下がる。文献 [12] では 100 万を超える Q 値を有する 2 kHz のクアッドマス共振子が報告されているが、35 Hz のモードミスマッチを電気的にチューニングすると、Q 値は 3 割程度に低下した。式 (9) に示すように、Q 値が 3 割に低下すると ARW は約 1.8 倍悪化する。それでもこの文献では $0.045^\circ/\sqrt{h}$ の ARW、 $0.07^\circ/h$ のバイアス安定性が報告されている。ただし、Q 値 30~40 万で期待される程には ARW は下がっていない。

2.2.0.2 積分型ジャイロ스코ープ

積分型ジャイロ스코ープの理想形はフーコー振子であり、それはすなわち 1.5 節で述べた縮退振動子 ($K_x = K_y$, $C_x = C_y$) である。MEMS 技術によって縮退振動子を作製し、そこに直線振動を与えれば、積分型ジャイロ스코ープとなる。しかし、2.2.0.1 節に述べたように、実際には縮退振動子を作製することは難しい。 K_x , K_y は電気的チューニングによってある程度補正できるが、 C_x , C_y については別の補正方法を考えなくてはならない。 $K_x \neq K_y$ の場合、x 軸と y 軸の共振周波数が異なるので (モードミスマッチ)、各軸を PLL で駆動すれば、x 軸と y 軸の振動周波数が異なる。言い換えれば、振動の軌跡は直線ではなくリサージュ図形となる。一方、 $K_x = K_y$ (モードマッチ) かつ $C_x \neq C_y$ (Q ミスマッチ) の場合、x 軸と y 軸に働く減衰力が異なるので、それによって直線振動の方向が回転する力が働く。本来、直線振動の方向を回転させる力は、コリオリ力のみでなくてはならないので、Q ミスマッチはドリフトを発生させることになる。しかも、直線振動が Q 値最大となる方向になったときに系は最も安定となるので、そのポテンシャルの谷を超えるのに必要なコリオリ力が発生しない限り、直線振動がその方向にトラップされる。これは微小な角速度は検出できないことを意味する。このトラップ問題を解決する方法としては、直線振動

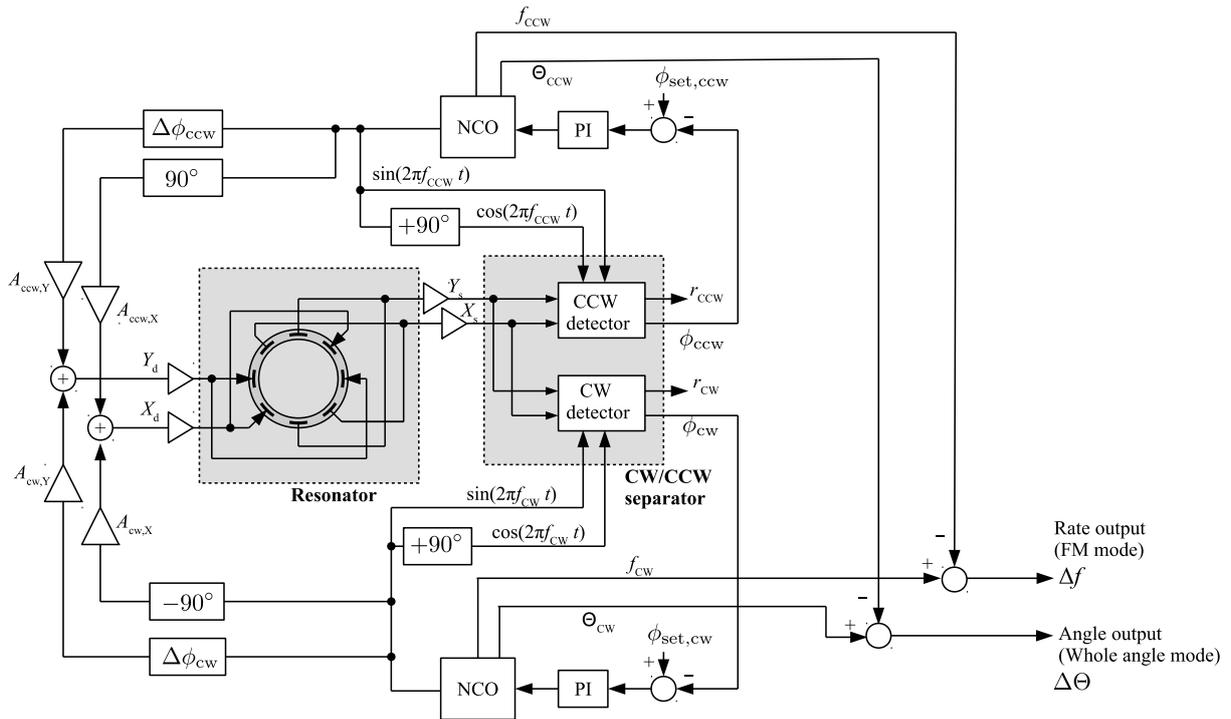


図 9: CW/CCW モードを励振するジャイロスコップのシステムダイアグラム。(文献 [15] から引用)

の方向を一定角速度で強制的に回転させる「バーチャル回転」が知られている [13]。

さて、現実の共振子では Q 値が有限値であり、直線振動は減衰するので、損失を補うように加振しなくてはならない。その方法として、最も単純な発想は直線振動の振幅と方向を検出し、それに合わせて x 軸と y 軸の振幅を調整して、 x 軸と y 軸をそれぞれの PLL を用いた加振することである [8]。しかし、この方法はいわばフーコー振子の揺れる錘を方向を狙い定めて押してやるようなものであり、力技的な方法と言わざるをえない。加振方向が僅かでもずれれば、それがそのまま誤差になる。

もう 1 つの方法はパラメトリック増幅である。パラメトリック増幅はブランコの漕ぎ方の例で説明されることが多い。ブランコに乗った人が振動周波数の 2 倍の周波数で屈伸すれば、ブランコの復元力はその周波数で変調され、ブランコは励振される。フーコー振子でも、錘を吊り下げているワイヤを振動周波数の 2 倍の周波数で引っ張って振動振幅を維持している。文献 [7] にはパラメトリック増幅を利用した積分型ジャイロスコップが報告されている。その共振子は多重リング構造であるが、リングの内側にある電極に振動周波数の 2 倍の周波数の電圧をかけて、リング全体のばね定数を変調する。この方式でモードミスマッチがあると、 x 軸と y 軸の励振タイミングがずれる、つまり励振効率が異なることになり、結果的にコリオリ力によらない直線振動方向の回転が起こり、ドリフトが発生する。また、 Q ミスマッチはドリフトとトラップの原因となる。

我々は、独立に制御された CW モードと CCW モードを 1 つの共振子に重畳させる方法を提案している [5]。CW モードの振動と CCW モードの振動を重畳させることで、直線振動を励振することができる [5]。また、この直線振動の振動方向が CW モードと CCW モードの位相の差に比例する。図 9 に示すように、CW モードと CCW モードを分離し、それぞれを独立した PLL によって励振する。2 つのモードの PLL の周波数差に注目すれば、それはすなわち 1.5 節に述べた周波数変調型ジャイロスコップになる。その周波数差の積分は CW モードと CCW モードの位相差 (すなわち直線振動の方向) となるため、位相差 (もしくは直線振動の方向) から回転角度 (角速度の積分) を測ることができる。つまり、積分型ジャイロスコップとしても動作していることになる。

この方式でも、モードミスマッチと Q ミスマッチによってパラメトリック増幅方式と同様の問題が生じる。しかし、この方法では、CW モードと CCW モードを独立した PLL によって励振するものの、最終的には静電力または電磁力によって x 軸と y 軸に励振力を加えるので、 x 軸と y 軸の励振タイミングまたは励振力を調整して、これらの問題を補正できる [14]。さらに、CW モードと CCW モードの PLL のロック点をずらすことによって、バーチャル回転を容易に導入できる [15]。以上のような特長から、この方法は積分型ジャイロスコップの制御法として優れていると言える。

参考文献

- [1] R. P. Leland, "Mechanical-thermal noise in mems gyroscopes," *IEEE Sensors Journal*, **5**, pp. 493–500, 2005.
- [2] D. D. Lynch, "Coriolis vibratory gyros," in *Proc. Symposium Gyro Technology*, Stuttgart, Germany, September 15-16 1998, pp. 1.0–1.14.
- [3] R. P. Leland, "Mechanical-thermal noise in vibrational gyroscopes," in *Proc. The 2001 American Control Conference*, Arlington, VA, June 25-27 2001, pp. 3256–3261.
- [4] M. Kline, Y. Yeh, B. Eminoglu, H. Najjar, M. Daneman, D. Horsley and B. Boser, "Quadrature fm gyroscope," in *Proc. IEEE MEMS 2013*, Jan. 2013, pp. 604–608.
- [5] T. Tsukamoto and S. Tanaka, "Fully-differential single resonator FM/whole angle gyroscope using CW/CCW mode separator," in *Proc. MEMS 2017*, Jan. 2017, pp. 1118–1121.
- [6] I. P. Prikhodko, S. A. Zotov, A. A. Trusov and A. M. Shkel, "Foucault pendulum on a chip: angle measuring silicon mems gyroscope," in *Proc. MEMS 2011*, Jan. 2011, pp. 161–164.
- [7] D. Senkal, E. J. Ng, V. Hong, Y. Yang, C. H. Ahn, T. W. Kenny and A. M. Shkel, "Parametric drive of a toroidal mems rate integrating gyroscope demonstrating < 20 ppm scale factor stability," in *Proc. MEMS 2015*, Jan. 2015, pp. 29–32.
- [8] J. K. Woo, J. Y. Cho, C. Boyd and K. Najafi, "Whole-angle-mode micromachined fused-silica birdbath resonator gyroscope (WA-BRG)," in *Proc. IEEE MEMS 2014*, Jan. 2014, pp. 20–23.
- [9] A. A. Trusov, A. R. Schofield and A. M. Shkel, "Micromachined rate gyroscope architecture with ultra-high quality factor and improved mode ordering," *Sens. Actuators, A*, **165**, pp. 26 – 34, 2011.
- [10] I. P. Prikhodko, C. Merritt, J. A. Gregory, J. A. Geen, J. Chang, J. Bergeron, W. Clark and M. W. Judy, "Continuous self-calibration canceling drive-induced errors in mems vibratory gyroscopes," in *Proc. 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, June 2015, pp. 35–38.
- [11] A. A. Trusov, I. P. Prikhodko, D. M. Rozelle, A. D. Meyer and A. M. Shkel, "1 ppm precision self-calibration of scale factor in mems coriolis vibratory gyroscopes," in *Proc. The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS EUROSENSORS XXVII)*, June 2013, pp. 2531–2534.
- [12] S. Askari, M. H. Asadian, K. Kakavand and A. M. Shkel, "Vacuum sealed and getter activated mems quad mass gyroscope demonstrating better than 1.2 million quality factor," in *Proc. 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Feb. 2016, pp. 142–143.
- [13] I. P. Prikhodko, J. A. Gregory, D. I. Bugrov and M. W. Judy, "Overcoming limitations of rate integrating gyroscopes by virtual rotation," in *Proc. 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Feb. 2016, pp. 5–8.
- [14] T. Tsukamoto and S. Tanaka, "FM/rate integrating MEMS gyroscope using independently controlled CW/CCW mode oscillations on a single resonator," in *Proc. 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Mar. 2017, pp. 1–4.
- [15] T. Tsukamoto and S. Tanaka, "Virtually rotated MEMS whole angle gyroscope using independently controlled CW/CCW oscillations," in *Proc. 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Lake Como, Italy, Mar. 2018, pp. 49 – 52.