



## 位置の計測:

ある場所からの変位を位置として計測

### 1. 回転的変位を利用

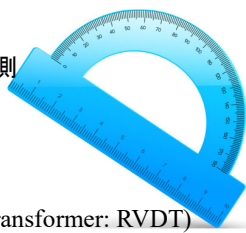
- ・ ロータリエンコーダ
- ・ ポテンシオメータ
- ・ 回転可変・差動トランス

(Rotary Variable Differential Transformer: RVDT)

### 2. 直線の変位を利用

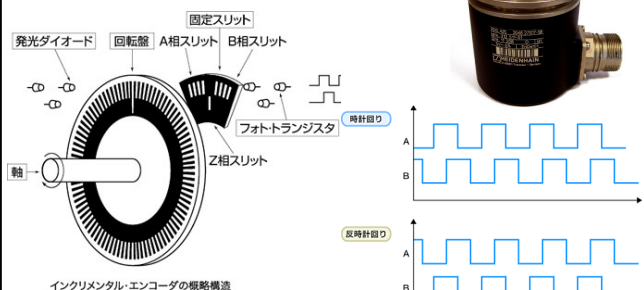
- ・ リニアエンコーダ
- ・ リニアモーション・ポテンシオメータ
- ・ 直線可変・差動トランス

(Linear Variable Differential Transformer: LVDT)



## 回転的変位: ロータリエンコーダ(インクリメンタル形)

フォトランジスタからの出力パルスをカウントして相対回転角度、回転数および回転方向を検出するセンサ。互いに90°位相が異なるA相、B相から回転方向を検出する。Z相は原点を与える。



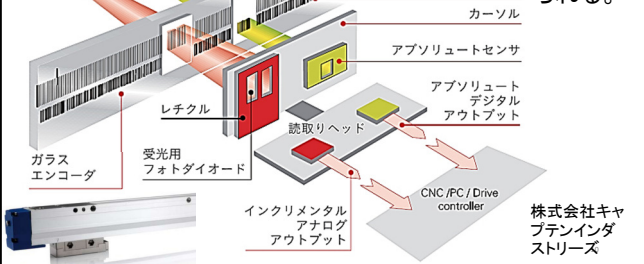
## 回転的変位: ロータリエンコーダ(アブソリュート形):

回転角度の絶対値を出力する。工作機械、ロボット等のサーボモータの位置制御に使われる。コード方式は、隣接した符号間で常に1ビットのみが変化するグレイコードが使われる。



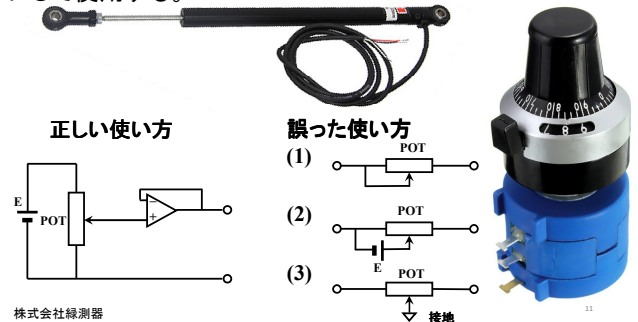
## 直線的変位: リニアエンコーダ

透明板または反射板に目盛りを刻んでおき、発光素子と受光素子によって、目盛りを読み取ることで板の変位を検知。アブソリュート型とインクリメンタル型がある。工作機械や半導体製造装置の位置制御などに用いられる。



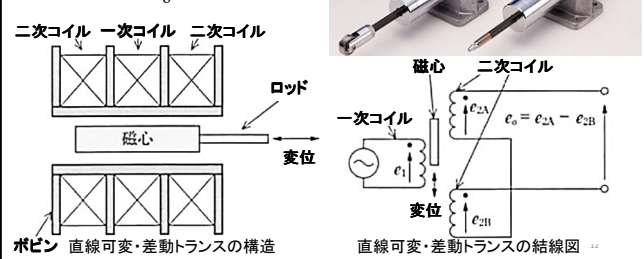
## 回転+直線的変位: ポテンシオメータ、リニアモーションポテンシオメータ

電圧調整用の高精度の可変抵抗器を使う。回転角や位置によって抵抗値が変化する。可動部は接触抵抗があるので、一般的に可動部に電流が流れない様にして使用する。



## 回転+直線的変位: 回転可変、直線可変・差動トランス

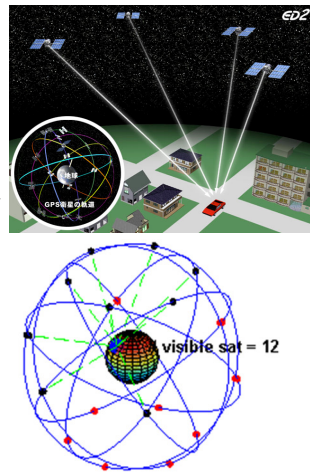
可動磁心の上に巻いたコイルの変圧器作用により直線的や回転的な変位を検出。右下図で磁心が中央だと $e_{2A} = e_{2B}$ だが、中央からずれると $e_{2A} \neq e_{2B}$ となり電位差 $e_0$ が生じる。



### (参考) 地球規模の位置検出 GPS (Global Positioning System)

約2万kmの高度にいる30機程のGPS衛星が1周約12時間で地球を回っている。GPS衛星には、超高精度の原子時計が積まれている。アメリカ宇宙軍が運用している。

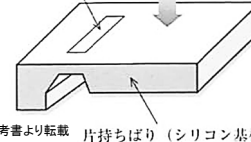
カーナビやスマホは、4個以上のGPS衛星からの電波を受信して、各衛星と自分との距離を測定し、位置を算出する。日本版GPS衛星の「みちびき」も4機ある。



### 加速度の計測(1): ピエゾ抵抗形加速度センサ

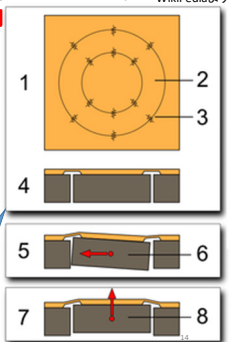
MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術でシリコン基板を加工して片持ち梁を作製し、その根元に不純物拡散によるピエゾ抵抗形ひずみゲージを構成したもの。WikiPediaより

Z方向のみ 全方向



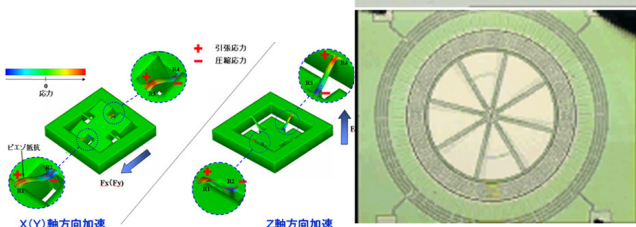
参考書より転載 片持ちばり (シリコン基板)

1. 平面図 2. ダイアフラム 3. ピエゾ抵抗器 4. 側面図 5. X軸またはY軸方向に加速度がかかった場合の側面図 6. 錘が横に引かれピエゾ抵抗器で不等分の変化を検出 7. Z軸方向に加速度がかかった場合の側面図 8. 錘が縦に引かれピエゾ抵抗器で等分の変化を検出



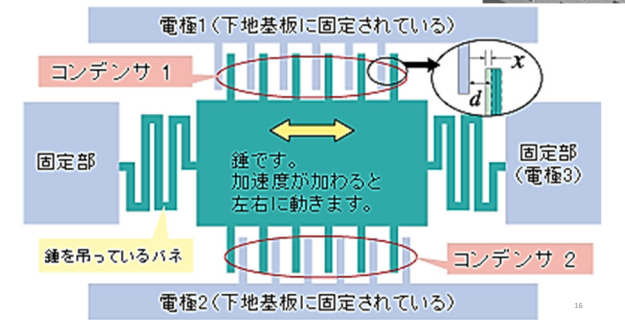
### (参考) マイクロエレクトロメカニカルシステム(MEMS):

集積回路製造のプロセス技術が高度に発達したので、機械要素部品(センサー、アクチュエータ、電子回路等)を一つのシリコン基板上に集積した微小機械製作(マイクロマシニング)ができる様になった。



### 加速度の計測(2): 容量変化形加速度センサ

加速度センサに一定質量の可動電極を設け、それをバネで支持する。固定電極と可動電極の相対的な微小変位による電極間の静電容量の変化から加速度を計測する。



### 速度の計測原理:

- 超音波やマイクロ波を用いたドップラー効果を利用
- 変位(位置)センサの出力信号を微分

$$v = \frac{dx}{dt}$$

- 加速度センサの出力信号を積分

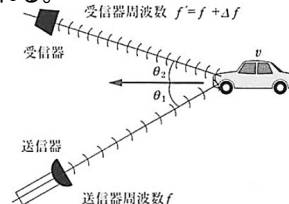
$$v = \int_0^t a \, dt$$

### 速度の計測(1): ドップラー効果形センサ

左下図のように速度 $v$ で移動する物体に対して、角度 $\theta_1$ で周波数 $f$ 、波長 $\lambda$ の電磁波を入射して、物体から $\theta_2$ の角度で出てくる反射波を受信する。このとき受信される周波数のオフセットを $\Delta f$ とすると、物体の速度 $v$ は、

$$v \cong \frac{\Delta f \cdot \lambda}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}$$

で与えられる。自動車の速度計測や気象観測などに用いられる。





### レーダー・ドップラー効果の式の導出:

前頁の図で電磁波の伝搬速度を $c$ とすると、速度 $v$ の車両は1秒間に $v \cos \theta_1$ だけ送信器に近づく。従って、その間に

$$\frac{c + v \cos \theta_1}{\lambda} \equiv n \text{ 個}$$

の波を反射する。また、受信機に向けては $v \cos \theta_2$ だけ近づくので、1秒間に $n$ 個の波を $c - v \cos \theta_2$ の長さの範囲に送り出す。従って反射波の波長 $\lambda'$ は、

$$\lambda' = \frac{c - v \cos \theta_2}{n},$$

となり、受信器での受信周波数 $f'$ は、

$$f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{cn}{c - v \cos \theta_2},$$

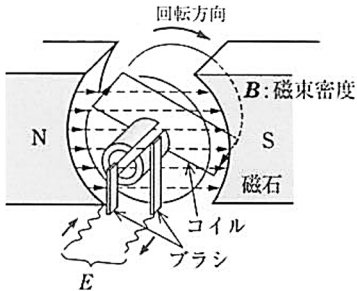
となり、周波数のオフセットは、

$$\begin{aligned} \Delta f = f' - f &= \frac{cn}{c - v \cos \theta_2} - f = \frac{c(c + v \cos \theta_1)}{\lambda(c - v \cos \theta_2)} - f \\ &= f \left( \frac{c + v \cos \theta_1}{c - v \cos \theta_2} - 1 \right) = f \frac{v(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{c - v \cos \theta_2}, \end{aligned}$$

となる。よって、

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f}{f} &= \frac{v(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{c - v \cos \theta_2} \cong \frac{v}{c} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2), \\ \therefore v &\cong \frac{\Delta f \cdot \lambda}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \end{aligned}$$

**角速度の計測(1):** タコジェネレータ  
直流発電機とほぼ同じ構造をしている。ファラデーの電磁誘導の法則で軸の回転速度に比例した起電力 $E$ が発生するので、角速度が測定できる。

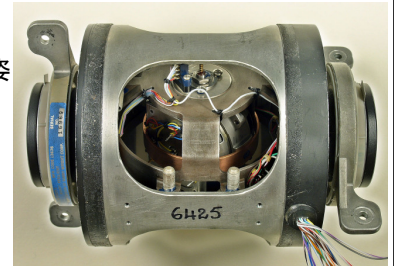
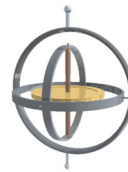


### 角速度の計測(2): ジャイロ스코プ(回転型)

フライホイールを用いた方式で、角運動量 $\vec{L}$ のホイールの回転面を傾けるような外力 $\vec{F}$ が加わると、角運動量保存則で元の状態を維持しようとする慣性力が発生する。これを検出して物体の角速度を測定する。

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F},$$

車両やロボットなどの姿勢制御に利用される。



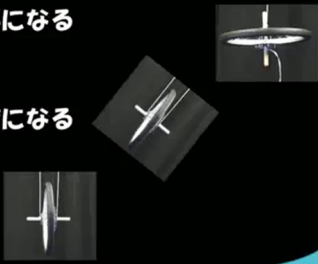
### ジャイロ効果:

車輪が回転している状態で  
ひもを1本切ると...?

①たおれて水平になる

②ななめ45度になる

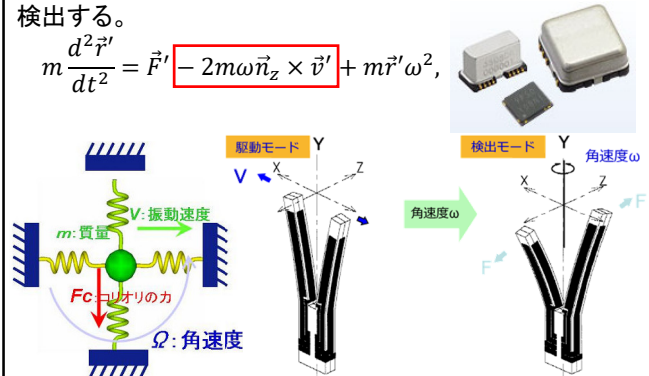
③たおれない



### 角速度の計測(3): ジャイロ스코プ(振動型)

振動するピエゾ・アクチュエータ(後述)に回転力(角速度 $\omega$ )が加わった場合、振動垂直方向に発生するコリオリの力を検出する。

$$m \frac{d^2 \vec{r}'}{dt^2} = \vec{F}' - 2m\omega \vec{n}_z \times \vec{v}' + m\vec{r}'\omega^2,$$

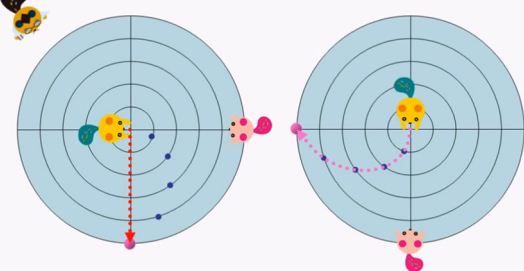


## コリオリの力:

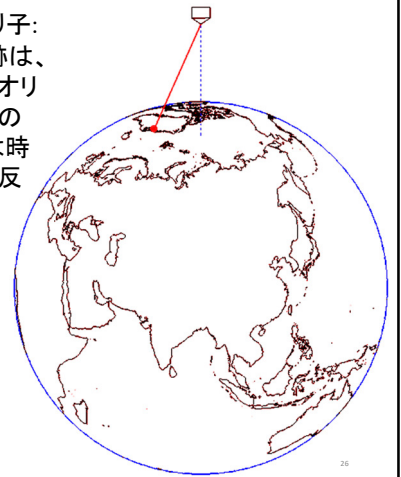
回転する円板の  
中心から外に向かってボールを転がす場合

外から見るとこう見える  
1秒おきの軌跡

円板に立って見るとこう見える  
1秒おきの軌跡

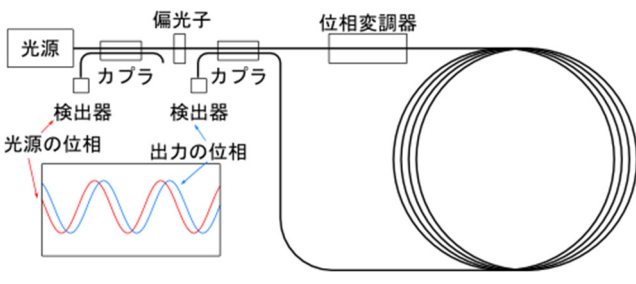


(余談) フーコーの振り子:  
長い振り子の錘の軌跡は、  
地球の自転によるコリオリ  
の力のために、振り子の  
振動面が、北半球では時  
計回りに、南半球では反  
時計回りに回転する。  
南極と北極では1日  
に1回転して、赤道で  
は回転しない。  
(九大伊都キャンパス  
にある)



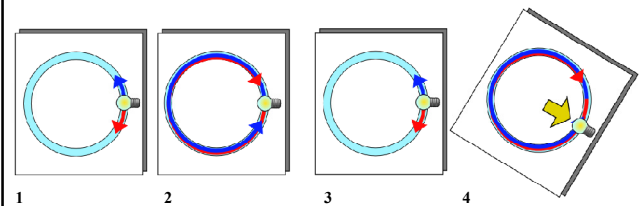
## 角速度の計測(4): 光ファイバ・ジャイロスコープ

コイル状に巻かれた光ファイバに、2つの光を互いに逆方向から入射する。光ファイバが静止していれば光路長は同じだが、回転しているとサニャック効果で互いの光路長が異なり、位相差が生じる。可動部が無いので機械式ジャイロスコープより信頼性が高い。



## (参考) サニャック効果

装置が回転していない場合は、光ファイバの中の1点から出た光は両方向に走り出して(1)、両方の光は同時に元の位置に戻る(2)。しかし、装置が回転している場合には、光ファイバの中の1点から出た光は(3)、赤い光よりも青い光が先に元の位置に戻る(黄色の矢印)(4)。



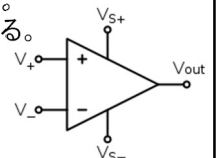
## 光ファイバ・ジャイロスコープ(2):

装置の回転と地球の自転を足し合わせることで、方角検出もできる。



## 次回の予告: アナログーデジタル間の変換 演算増幅器 (オペアンプ)

- アナログ信号処理のコアデバイスの一つ。
- 入力信号の $n$ 倍、加算、微分、積分といった処理が係数のコントロールも含めて正確にできる。
- $V_+$ と $V_-$ の差分が増幅されて出力される。



## 理想的な演算増幅器の特徴

- 利得は無限に大きい。
- 増幅できる周波数帯域は無限に広い。
- 入力インピーダンスは無限大。
- 出力インピーダンスは0。

