

前回の復習: 電界の計測:

電界効果トランジスタ(FET):

高入力インピーダンスFETを使って、絶縁体の表面に発生する電位、あるいは電荷分布を非接触で測定する。(静電誘導)

光電界センサ:

強誘電体ニオブ酸リチウム(LiNbO_3)などの電気光学素子に外部から電界を加えると、電気光学効果で誘電率 ϵ が変化する。それに伴い、光の屈折率 $N (= \sqrt{\epsilon / \epsilon_0})$ も変化する。主屈折率の変化 \propto (電界) \Rightarrow 1次光学効果 or ポッケルス効果
主屈折率の変化 \propto (電界) $^2 \Rightarrow$ 2次光学効果 or カー効果

前回の復習: 磁界の計測:

ホール磁気センサ:

ホール素子に磁束密度 B_Z を掛けて電流 I_H を流すと、キャリアはローレンツ力を受け、 B_Z に比例したホール起電力 V_H が生じる。ホール素子の出力電圧は小さいので、電圧増幅器と一体化したホールIC素子として用いられることが多い。

磁気抵抗素子、巨大磁気抵抗素子:

外部磁場を印加すると電気抵抗が変化する。大容量ハードディスクの磁気ヘッド等に使われている。

(参考)磁気光学効果:

磁化の向きによって屈折率が変わるので、物質の表面に偏光した光をあてると、反射光の偏光面が磁化の向きに応じて変わる。

前回の復習: 光計測:

光導電セル:

光照射によって、光電効果で電子が価電子帯から伝導帯に励起され電気抵抗が変化する。

フォトダイオード、フォトトランジスタ:

光照射によって、光電効果で電子が価電子帯から伝導帯に励起され起電力が生じる。光エネルギーを電気エネルギーに変換できる。

焦電型赤外線センサ:

強誘電体タンタル酸リチウム(LiTaO_3)等に、赤外線が照射されると受光素子の温度が上

がる。すると、焦電効果によって電気分極が誘起される

ので、それを電圧変化として検出する。最大の用途は人体検

知。窓材には適切なフィルタが装着される。

前回の復習: 温度計測:

熱電対:

2種類の金属を接合させた閉回路で、2つの接点に温度差があると電圧が生じるゼーベック効果を利用する。

測定したい温度範囲に応じてKタイプやBタイプ等のいくつかの種類がある。

サーミスタ:

温度で電気抵抗が変化する。金属酸化物半導

体製の温度が上がると抵抗が減少するタイプ(NTC)と、チタ

ン酸バリウム製の増加するタイプ(PTC)と、特定の温度領域

で抵抗が急激に減少タイプ(CTR)がある。

IC温度センサ:

サーミスタに制御回路を付けて、温度-抵抗率の非線形性を補正して出力電圧を線形にしている。センサ部分と制御回路を一つのパッケージに格納している。

前回の復習: 圧力の計測:

歪ゲージ、ピエゾ抵抗効果形歪ゲージ:

微小金属細線(抵抗線)を絶縁基板上に形成して、細線の歪みを電気抵抗の

変化から検出する。金属の代わりに半導体(ピエゾ抵抗効果形)を使った(2桁程度)高感度のものもある。

半導体圧力センサ:

ダイアフラムの上に不純物拡散によってピエゾ抵抗効果形歪ゲージによる抵抗ブリッジを形成す

る。圧力が加わり半導体が歪むと、抵抗値が大きく変化して

抵抗ブリッジが平衡条件からズレて電圧が検出される。

静電容量形圧力センサ:

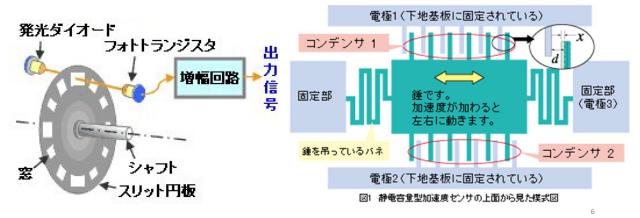
圧力を静電容量の変化として計

測する。圧力が加わり、平行平板コンデンサの電極間の距

離 d が変わると静電容量 C が変化する。

力学量の計測:

- 機械制御などで利用
- 力・トルク: ひずみゲージ等
- 変位: ポテンシオメータ(可変抵抗器)、ロータリーエンコーダ(角度をデジタルで出力)等
- 速度・加速度・角速度: ジャイロ等
- 回転量: タコジェネレータ(直流発電機)等

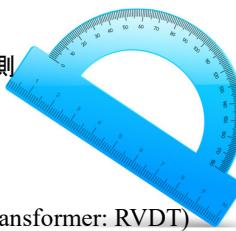


位置の計測:

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
 - ポテンショメータ
 - 回転可変・差動トランス
- (Rotary Variable Differential Transformer: RVDT)

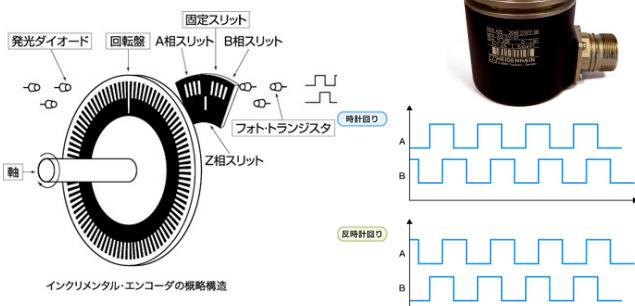


2. 直線的変位を利用

- リニアエンコーダ
 - リニアモーション・ポテンショメータ
 - 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。



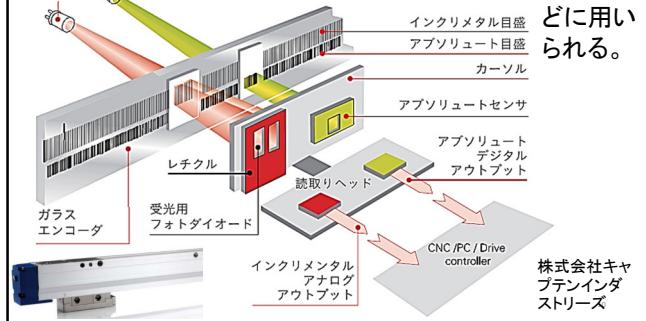
回転的変位: ロータリエンコーダ(アソリュート形):

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。

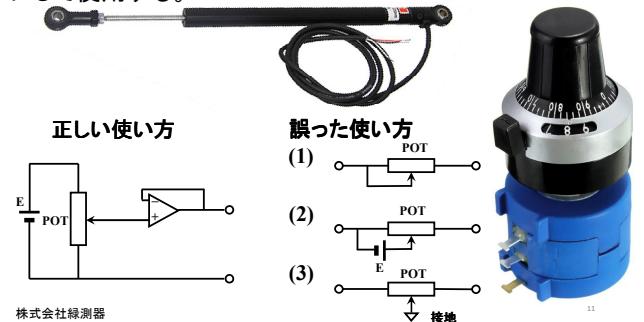


直線的変位: リニアエンコーダ

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、目盛値を読み取ることで板の変位を検知。ア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。

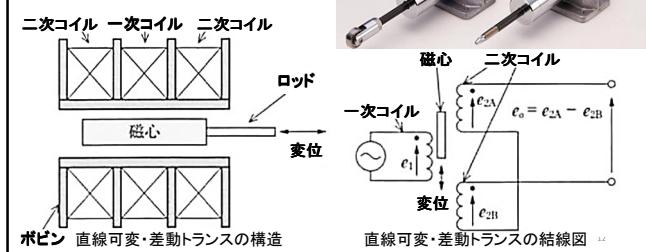


回転+直線的変位: ポテンショメータ、リニアモーションポテンショメータ 電圧調整用の高精度の可変抵抗器を使う。回転角や位置によって抵抗値が変化する。可動部は接触抵抗があるので、一般的に可動部に電流が流れない様にして使用する。



回転+直線的変位: 回転可変、直線可変・差動トランス

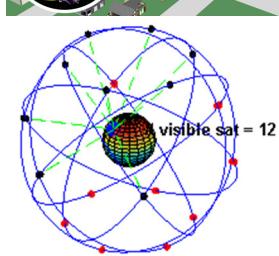
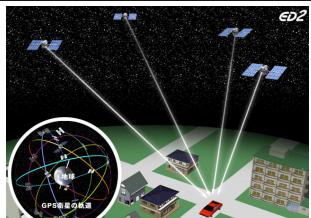
可動磁心の上に巻いたコイルの変圧器作用により直線的や回転的な変位を検出。右下図で磁心が中央だと $e_{2A}=e_{2B}$ だが、中央からずれると $e_{2A} \neq e_{2B}$ となり電位差 e_o が生じる。



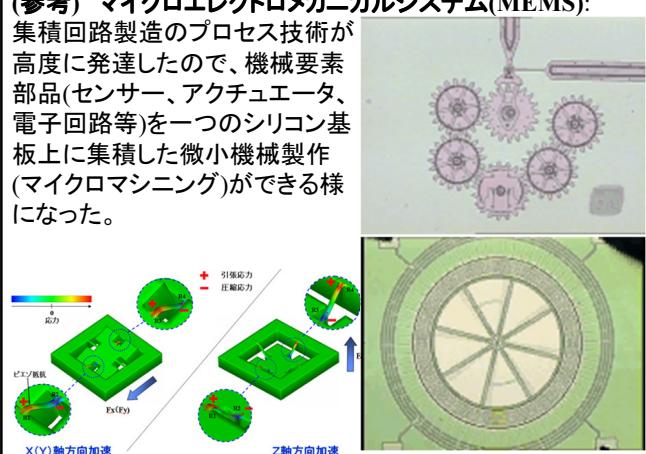
(参考) 地球規模の位置検出 GPS (Global Positioning System)

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。



(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。



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

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

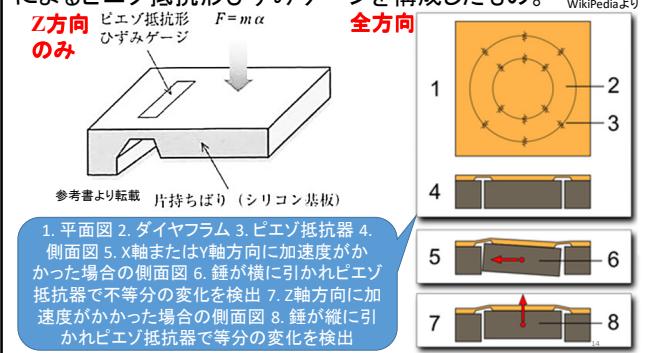
- 加速度センサの出力信号を積分

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

17

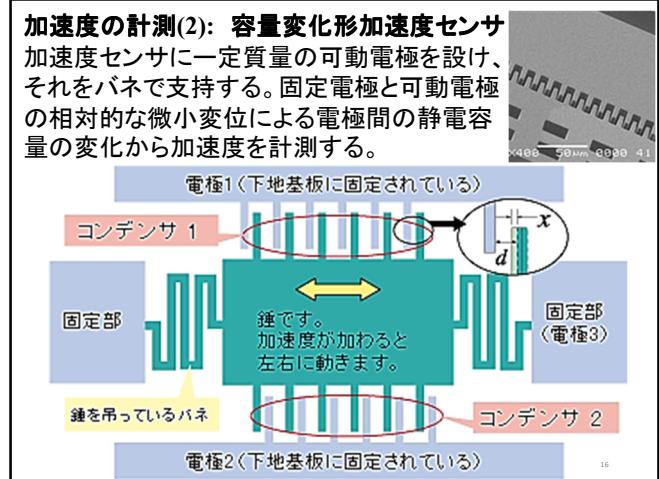
加速度の計測(1): ピエゾ抵抗形加速度センサ

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。



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。



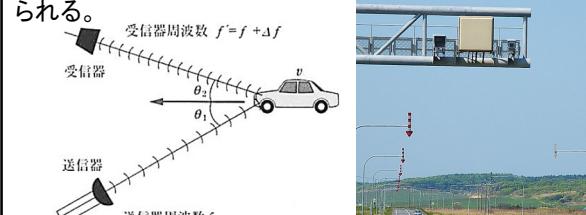
16

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 θ_1 で周波数 f 、波長 λ の電磁波を入射して、物体から θ_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 Δf 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。



18

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 λ' 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、

19

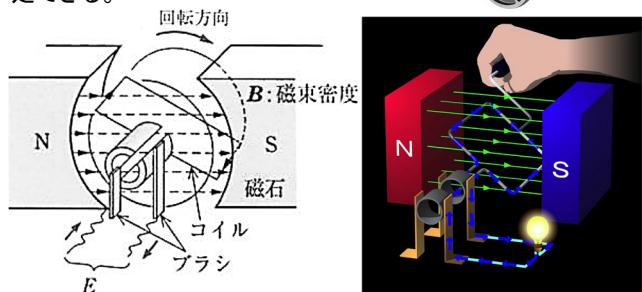
$$\begin{aligned} \Delta f &= f' - f = \frac{cn}{c - v \cos \theta_2} - f = \frac{c(c + v \cos \theta_1)}{\lambda(c - v \cos \theta_2)} - f \\ &= f \left(\frac{c + v \cos \theta_1}{c - v \cos \theta_2} - 1 \right) = f \frac{v(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{c - v \cos \theta_2}, \end{aligned}$$

となる。よって、

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

20

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): ジャイロスコープ(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。

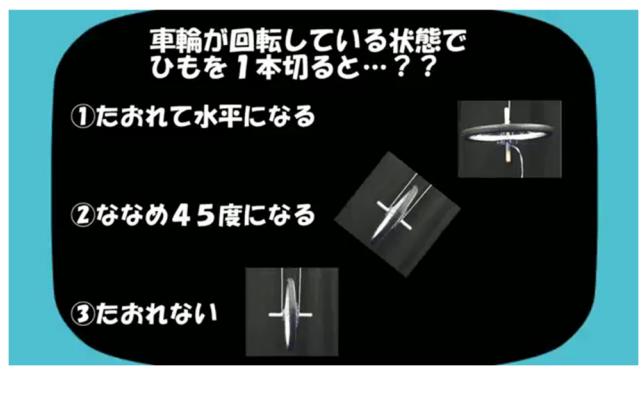
$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F},$$

車両やロボットなどの姿勢制御に利用される。



21

ジャイロ効果:



角速度の計測(3): ジャイロスコープ(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 ω)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。

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

