

センサの基礎

仙台市地域連携フェロー

熊谷正朗

kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

東北学院大学工学部
ロボット開発工学研究室 RDE

今回の目的

○ センサの基礎

テーマ1: センサとは

- ・ センサの役割 センサの例
- ・ センサを使う上での原則

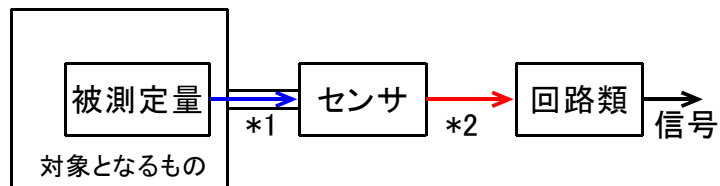
テーマ2: センサを使うための基礎知識

- ・ センサの性能を表す特性
- ・ センサの校正 (キャリブレーション)
- ・ センサの選び方

イントロダクション

○ センサの役割

物理的・化学的現象(*1)を電気的变化(*2)に。



*1 光、温度、圧力、速度、加速度、角速度、
電圧、電流、抵抗、pH、化学物質、等

*2 電圧変化、電流変化、抵抗変化、
電気容量変化、インダクタンス変化、等

イントロダクション

○ センサで何が測れるか

メカトロの対象となりそうな量は、「ほどほど」
には大抵のものを測る手段がある。

- ・ 位置/角度/速度/加速度/質量(重量)/力
- ・ 温度/湿度/圧力(接触圧,油圧,気圧)
- ・ 光量(明るさ/色/波長)
- ・ 電圧/電流/電力/抵抗/容量
- ・ 時間/周波数 (センサではないが)
などなど (これは?という質問歓迎)

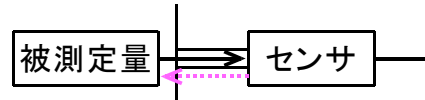
イントロダクション

○ センサで何が測れるか

メカトロの対象となるような量は、「ほどほど」には大抵のものを測る手段がある。

問題は、

- ・ どう測るか？（センサ選定、仕掛け）
- ・ 十分な測定性能が得られるか？
- ・ 対象への影響は？
- ・ コストは？



イントロダクション

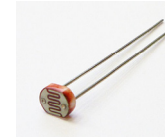
本資料の画像の一部はWikipediaおよび秋月電子通商サイトより引用しています

○ 何で測るか

例：光センサ

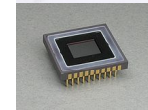
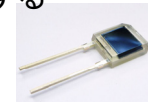
A) 光で抵抗値が変化

- ・ CdSセンサ



B) 光で電流が流れる/電荷が発生する

- ・ フォトダイオード →
- ・ フォトトランジスタ
- ・ CCD/CMOS撮像素子
- ・ 光電子増倍管



イントロダクション

○ どう測るか？

例：流体の速さ

- ・ 風車/水車のようなものを流れに挿入
- ・ 流体と圧力の関係（ベルヌーイ、ピトー管など）
- ・ 音波の伝播時間やドップラー効果利用
- ・ 流体に奪われる熱量の測定（熱線流速計）
- ・ 磁界と運動と電流の関係（電磁流量計）
- ・ マーカを入れてその移動観測
- ・ 流量（も多様な方法）÷ 時間



イントロダクション

○ センサで何が測れるか

メカトロの対象となるような量は、「ほどほど」には大抵のものを測る手段がある。

ので、

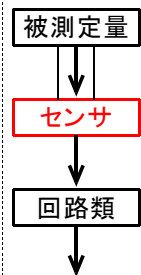
- ・ 「〇〇を測るセンサ」の紹介は避け、センサを使うとき/選ぶときに共通して注意すべき点に注目。
- ・ 「こういうものを測るときには」は個別に質問をお受けします。

計測・センシングの大原則

○ 1: センサの性能以上のことはできない

◇メカトロ制御の要はセンサ

- ・制御は「センサで拾う現在値」を「目標」に一致させるように働く
 - 実際の値とセンサ出力に差があると、それだけで制御の誤差になる。
 - 計測できないものは制御できない。(計測だけでも制御できないが)

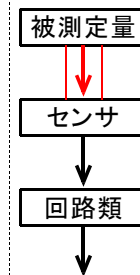


計測・センシングの大原則

○ 2: センサと対象の確実な連結

◇センサに現象を反映させる

- ・センサが対象と状態を共有すること。
 - 例) 接触式温度センサ (体温計等)
温度センサが対象と同じ温度に暖まらないと、温度計測できない
 - 可能な限りしっかり結合
- ・密着は必要ではないが、非接触センサに確実に状態が伝わること。

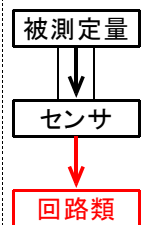


計測・センシングの大原則

○ 3: センサの出力を劣化させない

◇変換・増幅・デジタル化

- ・いくらセンサの性能が良くとも、その後で劣化したら、良いセンサの意味が薄れる。
- ・利用側から見たら、回路も含めてセンサ信号の性能。
- ・なるべく手短かにデジタル化する。
- ・コストを考慮するなら、センサの性能に応じた回路などの用意。

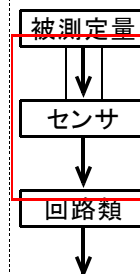


計測・センシングの大原則

○ 4: センサの用法をよく守る

◇センサは常に万全のコンディションではない

- ・センサがカタログ通りの性能を発揮するためには、様々な条件がある。
 - 例) 温度を一定に保つ
振動を与えない
高精度に一定の電源を供給
- ・補正可能な場合もあるが、限度がある。



センサの種類

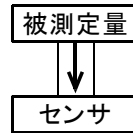
○ 接触型 と 非接触型

◇ 接触型

- ・対象に直接取り付ける。
- ・対象に何らかの影響を及ぼしやすい。



例:一般的な温度センサ

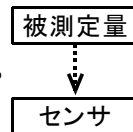


◇ 非接触型

- ・直接取り付けることなく測定する。
- ・影響を及ぼさないことが一般的。



例:放射温度計、サーモグラフィー



センサの種類

○ パッシブ(受動) と アクティブ(能動)

◇ パッシブ型

- ・対象から「受けるだけ」のセンサ。
- ・多くのセンサがこれにあたる。 [対])))) [セ]

◇ アクティブ型

- ・何か対象に働きかけて、反応を見るセンサ。
- ・例)超音波距離センサ

[対象] (((([送])))) [受] 超音波を発射→跳ね返る時間の計測

センサの種類

○ パッシブ型センサ [対])))) [セ]

◇ 対象から「受けるだけ」のセンサ。

- ・一般に構造が簡単=安い。
- ・消費電力は(同対象の能動型に比べ)低め。
- ・複数のセンサを置いても干渉することは少ない。
- ・対象から「出る特徴」がないと、測定できず。
例)暗闇でカメラは使えない

センサの種類

○ アクティブ型センサ [対象] (((([送])))) [受]

◇ 何か対象に働きかけて、反応を見るセンサ。

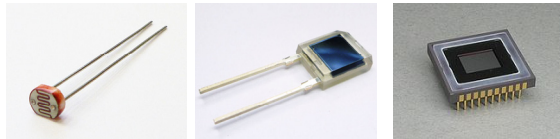
- ・「測りやすいように」細工できるため、
パッシブでは困難な測定ができる。
例)ステレオビジョン VS Kinect
- ・アクティブ同士は干渉することがある。
例)光パターン投影型の画像センサを複数使うと
パターン同士が重なって干渉する。
- ・独特の使用制限:(例)日光下不可

センサの種類

○ デバイス・モジュール・装置

◇デバイス(部品)

- ・素のセンサ。通常は受動のみ。
- ・適切な処理回路を必要とする。
- ・部品コストは低め。(トータルではものによる)



センサの種類

○ デバイス・モジュール・装置

◇モジュール・センサIC

- ・センサデバイスに回路等加えたもの。
- ・アクティブ型の部品状のもの。
- ・単一部品にAD変換まで入れたものもある。



カメラ

PSD測距

超音波測距
(sparkfun elec.)

センサの種類

○ デバイス・モジュール・装置

◇装置

- ・処理部なども含めて箱に入れた物。
- ・「情報」(≠「信号」)を出力するものも多い。
- ・扱いやすいが高価。



SICK社
レーザレンジ
ファインダ



HIOKI
クランプオン
電流計

センサの種類

○ 出力の違いとその受け取り方

◇装置型

- ・出力は色々だが「しっかりとした」出力。
アナログ信号/デジタル信号(各種通信)/
オンオフ(シーケンサ用)
- ・つなぐという点では楽だが、動作設定が
複雑なものは多い。
(どちらかというとソフト的な作業。)

センサの種類

○ 出力の違いとその受け取り方

◇モジュール型

- ・出力は様々だが「**しっかりとした**」出力。
アナログ信号/デジタル信号(各種通信)/
オンオフ(シーケンサ用)
- ・センサ部品の延長にあるため、**生の信号に近い**。設定箇所は無く/少なく、処理は利用者側が担当することが一般的。

センサの種類

○ 出力の違いとその受け取り方

◇部品型

- ・「電気的変化」として様々なケースがある。
- ・出力は**一般に弱く**、回路の設計によってセンサの性能が悪化する/使えない。
弱い:変化が小さい、影響を受けやすい、
電流が少ない(インピーダンスが高い)
- ・回路の精度の影響を受ける。

センサの種類

○ 出力の違いとその受け取り方

◇部品型:電圧出力型

- ・影響を考慮しつつ、増幅する。
反転増幅 (電流が多少流れてもOK)
非反転増幅・ボルテージフォロワ
(電流が流れると困る場合)
差動増幅 (電圧差が出力される場合)
インスツルメンテーションアンプ
(電流流さず、電圧差を大きく増幅)

センサの種類

○ 出力の違いとその受け取り方

◇部品型:電流出力型 (主に光センサ)

- ・電流変化を電圧変化にする。
抵抗に流してその電圧 (簡易型)
電流・電圧変換回路
電流センサ (大電流用, トランス、ホール)

センサの種類

○ 出力の違いとその受け取り方

◇部品型:抵抗変化型

- ・抵抗変化を電圧変化にする。
一定の電流を流しておく
固定抵抗と分圧回路を構成

※ 流して良い電流に留意

センサの種類

○ 出力の違いとその受け取り方

◇部品型:容量変化型

- ・発振回路などを用いて、周波数、周期変化にした上で時間で処理する場合が多い。
- ・固定周波数の信号を与えておき、その流れ具合で評価する方法もある。

センサの種類

○ 出力の違いとその受け取り方

◇部品型(モジュール型):パルス出力型

- ・被測定量に対応したパルス列が得られるセンサがある。
 - a) ロータリーエンコーダ
 - b) 敢えてパルス列に変換して出力
- ・マイコンのパルス計測系の入力端子に接続する。

今回の目的

○ センサの基礎

テーマ1:センサとは

- ・センサの役割 センサの例
- ・センサを使う上での原則

テーマ2:センサを使うための基礎知識

- ・センサの性能を表す特性
- ・センサの校正 (キャリブレーション)
- ・センサの選び方

センサの性能を表す特性

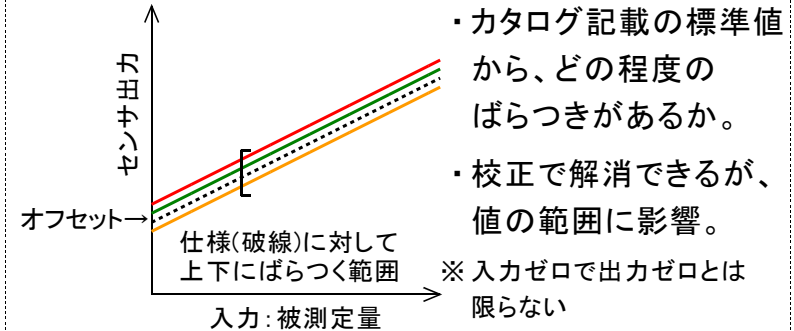
○ センサの特性

- ・精度: オフセット/ゲイン/直線性
- ・ヒステリシス
- ・応答性
- ・ノイズ
- ・単調性
- ・再現性
- ・分解能
- ・温度に依存する精度/ゼロドリフト

センサの特性

○ オフセットとその精度

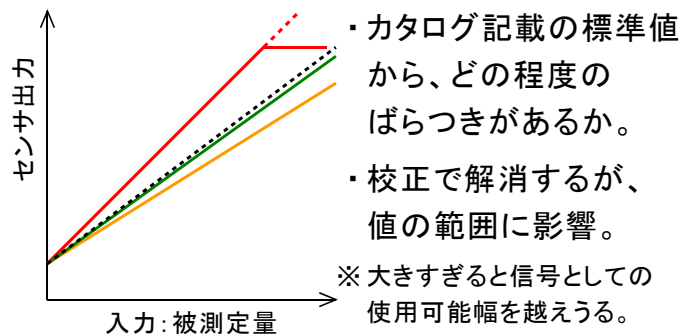
「ゼロ相当」の出力とその正しさ(個体差)



センサの特性

○ ゲインとその精度

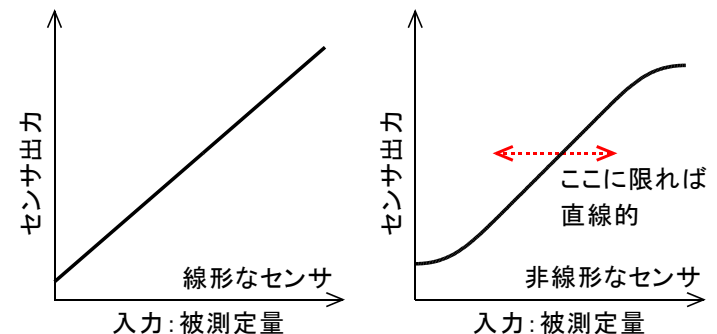
被測定量に対する感度(グラフの傾き)と精度



センサの特性

○ 直線性(線形/非線形)

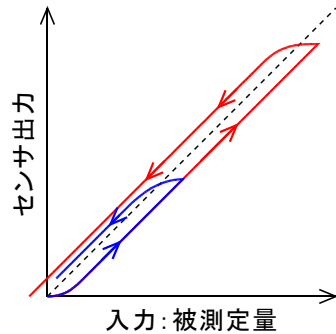
被測定量と出力の関係が比例(一次式)か?



センサの特性

○ ヒステリシス

行きと帰りで異なる特性。

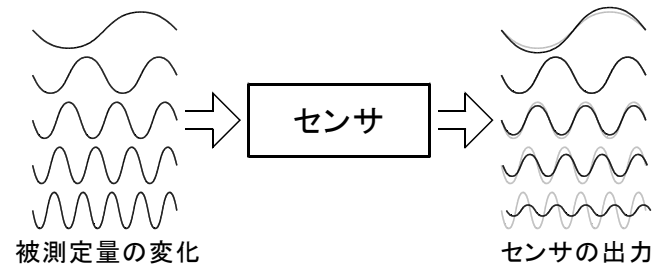


- ・ 直流を扱うセンサ。
- ・ メカ部のあるセンサや (ガタ, 伸縮など) 磁気系のセンサで見られることが多い。
- ・ 往復使用時に問題。一方向なら補正可。

センサの特性

○ 応答性

どのくらい短い時間周期の変化まで計測できるか。信号に遅れは出ないか？

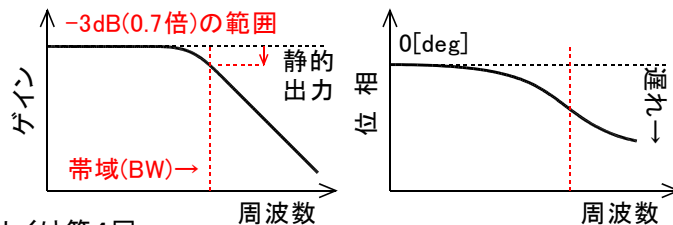


センサの特性

○ 応答性の表現: 周波数応答

ある周波数の正弦波変化を与えたときに、

- ・ ゲイン線図: 被測定量と出力信号の比率
- ・ 位相線図: 出力がどのくらい遅れるか



センサの特性

○ 応答性の評価

◇ゲイン:

- ・ 帯域が対象の時間変化をカバーするか。
- ・ 求める制御の速度より十分速いか。
- ・ 帯域でフラットな特性かどうか。

◇位相:

- ・ 使用範囲で妥当な遅れに収まっているか。
→ 「計測」ならあとで補正可、
「制御」だと要注意

センサの特性

○ ノイズ

どのくらい出力にノイズが混じっているか

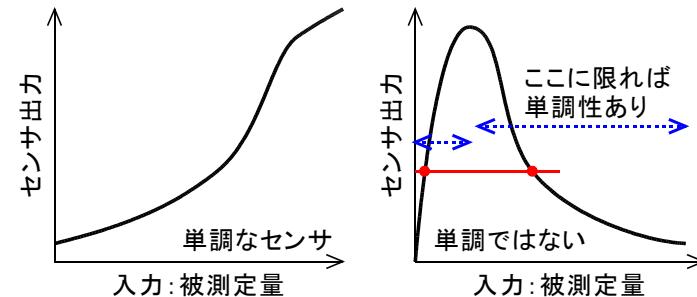
- ・ どれほど高精度なセンサでも大きなノイズが混じっているとそのまま使えない。
※信号処理で改善できることはある
- ・ 出力の小さなセンサは、増幅の過程でノイズも増幅したり、ノイズが混入したりするので注意が必要。

※ただし特性値を理解するのは難しい

センサの特性

○ 単調性

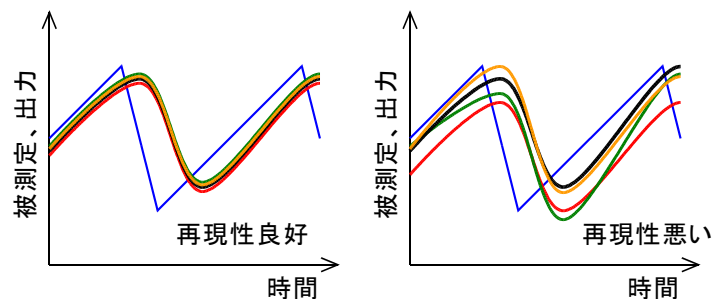
被測定量の増加に対して、出力が増加(減少)するだけかどうか。



センサの特性

○ 再現性

何回同じ測定をしても、同じ結果が得られるかどうか。



センサの特性

○ 分解能

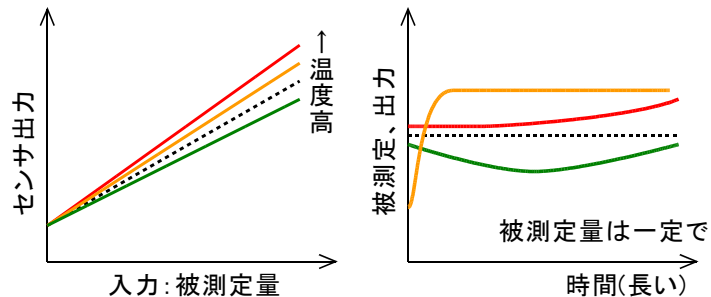
値をどのくらい細かく信じて良いか

- ・ どのくらい小さな変化をとらえられるか。
- ・ ノイズに埋まることなく取り出せるか。
- ・ AD内蔵センサ: ADの分解能
- ・ 装置型: 出力される値の分解能
- ・ 「分解能」と「精度」は別の物。

センサの特性

○ 温度依存性/ゼロドリフト(オフセットドリフト)

温度によるゲインその他の特性の変化/
ゼロ点(オフセット)の温度変化



センサの特性

○ 温度依存性/ゼロドリフト(オフセットドリフト)

◇対策

- ・ 温度センサを併用 & 温度も含めた校正を行う。
(これを想定して、温度センサ入りのセンサもある)
- ・ センサの温度変化を抑える。
(容器に入れる、断熱、一定温度に暖める)
- ・ とくにゼロ点の重要なセンサ(積分する等)では注意が必要。

センサの校正

○ センサの校正(キャリブレーション)

◇原理

- ・ 1個1個のセンサに、単調性と再現性があれば、センサの特性が非線形でも誤差があっても、補正ができる。
- ・ 温度の影響を受けていても、その影響の度合いが分かれば、温度センサを併用することで補正することができる。

センサの校正

○ センサの校正(キャリブレーション)

◇校正の一般的方法

- ・ 「正確な」「基準となる」被測定量を何通りか与える。
- ・ そのときの測定値を得る。
(コンピュータに取り込んで処理後の値)
- ・ 正しい(既知の)被測定量 → 測定値
の関係を反対にして、使用時には
測定値 → 実際の被測定量

センサの校正

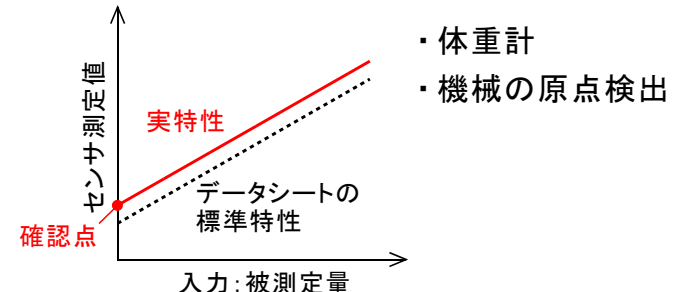
○ 校正の実例

- ◇体重計（各種電子重量計）
 - ・電源を入れて数秒間、重量を測定してそこを「重さゼロ」とする。
- ◇ロボット用姿勢センサ
 - ・静止/鉛直と見られるところでの測定値を基準とする。
- ◇ゲームコントローラ
 - ・最初に、指定された操作、動作を行う。

センサの校正

○ 校正方法：直線性が高くゲインは安定

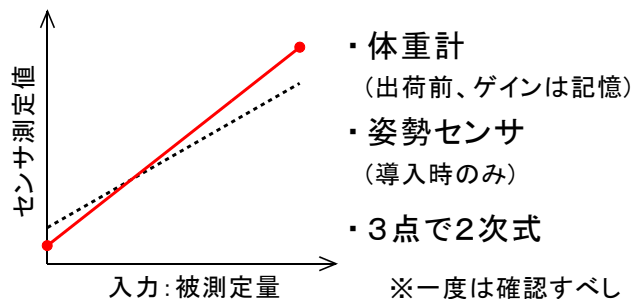
「ゼロ」に対する出力を測定 +
被測定値に対する出力ゲイン(固定)



センサの校正

○ 校正方法：直線性が高い（含むゲイン確定）

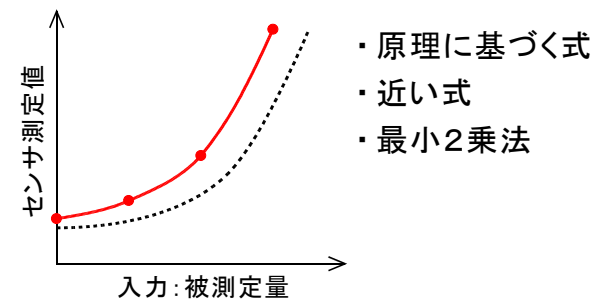
測定対象区間で2カ所の測定を行い、
その間を一次式($y=ax+b$, $x=(y-b)/a$)で求める。



センサの校正

○ 校正方法：直線性がない場合

何点かで対応関係を測定する
→その点(の近く)を通る曲線で近似する

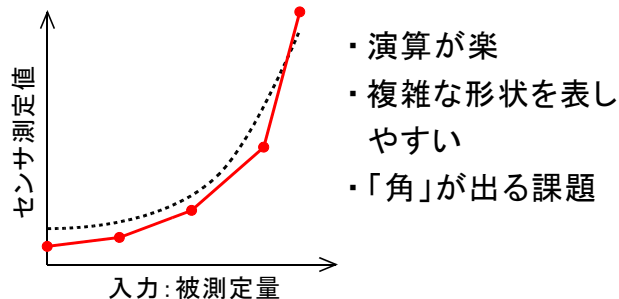


センサの校正

○ 校正方法: 直線性が無い場合

何点かで対応関係を測定する

→ 区分した直線(曲線)で近似する



センサの選び方

○ なにを測りたいかを明確にする

◇ 測定する量

・ 対象とする物理量を明確にする。

・ 対象そのものと関連する量をリストアップ:

例) 速度の測定 =

速度(直接)/位置(微分)/加速度(積分)

傾斜角度の測定 =

傾斜計(直接)/角速度ジャイロ(積分)/

加速度(重力加速度の成分)

センサの選び方

○ なにを測りたいかを明確にする

◇ 測定する対象の制約

・ 主に注意すべきは大きさ。

= センサが取り付けられるかどうか、

センサを取り付けた影響がでないか

・ センサを取り付けることで生じる影響の許容範囲。

= 特に接触式は何らかの影響がでる

センサの選び方

○ 使えそうなセンサをリストアップ

◇ 知識・体験ベース

・ いきなりネット検索しても「無事に使える」ものを見つけることは難しい。

・ センサが使われている事例に普段から興味を持って接すること、センサの製品情報をみる、直接触ってみるなどが重要。

・ 見当を付けた種類で絞り込んだ上でネットでカタログ集め。

センサの選び方

○ 使えるようなセンサをリストアップ

◇センサの使えるカタログ・使えないカタログ

- ・必ずセンサのカタログ・データシートには目を通す。
- ・使えるカタログ： →いい例
データ(グラフ)がたくさん載っている、
使い方の回路例が載っている 等
- ・使えないカタログ： →悪い例
「高性能です！」としか書いてない

センサの選び方

○ 限界を知る

◇入手できそうなセンサのうちで最高性能は？

- ・「それ以上の性能は無理」
が設計要件を満たすかどうか。
満たさない場合は、設計と相談。
- ※最悪のケースは断念
- ※メーカーに特殊グレードが無いか確認

センサの選び方

○ 妥協点を検討する

◇どこまで計測値の質を下げているか？

- ・質を下げる余裕があるほど、
コストや取り付け場所などの制約が楽に。
- ・目標性能の面からの妥協。
- ・回路のその他の「足をひっぱるところ」
との比較。
※もちろん、必要ならそちらを改善

センサの選び方

○ 選定する

◇あとは選ぶだけ

- ・条件に合うものを選定。
- ・ただしベストな1個だけではなく、複数を検討しておく
＝カタログ通りに動かせない可能性
※周辺回路、動作条件
- ・実際にセンサ部だけ試作して動作チェック。

センサの選び方

○ 合成する/組み合わせる

◇ここまでの選定は「世の中全て」の原則

- ・メカやマイコンや、電子回路部品など

◇加えて、センサは信号処理や合成して

改良できる

- ・複数のセンサを使う＝マルチセンサ
- ・複数種のセンサをつかう
＝センサフュージョン
- ・数をそろえて信号処理

センサの選び方

○ 合成する/組み合わせる

◇マルチセンサ＋演算処理の例

- ・マイクを複数並べる
→指向性マイク、音源探知
- ・カメラを複数並べる
→ステレオビジョン(立体視)
- ・カセンサを複数並べる
→重心位置が分かる

※ 信頼性向上の場合も

センサの選び方

○ 合成する/組み合わせる

◇センサフュージョンの例

- ・姿勢センサ

ジャイロ: 応答性○ 安定性×

加速度計: 応答性× 安定性○

- ・障害物検出

超音波測距: 横に広がる、騒音に弱い

レーザ距離: 透明NG、反射物NG

→ とともに併用で欠点を減らす

センサの選び方

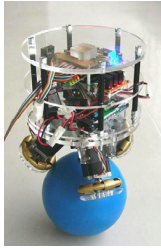
○ 合成する/組み合わせる

◇マルチセンサ、フュージョンを検討するには？

- ・個々のセンサの長所短所を把握する。
足りない何を付け加えたいのか、
何で何を補うのか。
- ・適切な信号処理法があるかどうか。
(含む処理のコスト)
- ・センシングシステムとしての開発が必要。
※いきなり実用というよりは研究開発型

センサ利用例

○ 市販のセンサを使う



姿勢センサ:

- ・角速度ジャイロ
- ・加速度(重力方向)

車両:

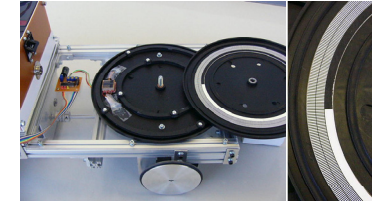
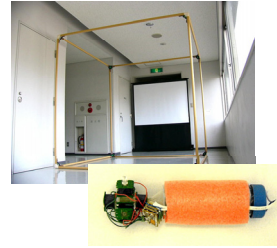
- ・ロータリーエンコーダ
- ・抵抗(電流検出)

上位:

- ・レーザレンジ
ファインダ

センサ利用例

○ センサをつくる



3次元モーションキャプチャ

- ・枠から交流磁界を発生
- ・手元のコイルで拾う
- ・位置姿勢を演算で求める

トレーラロボット用連結角センサ:

- ・ロータリエンコーダの原理
- ・薄いこと/耐荷重
- ・市販品に適当なものがない

まとめ

○ センサの基礎

- ・メカトロの**対象**になるような量には**測定できるセンサ**が大抵はある。
- ・同じ**対象**の測定でも、原理から異なる**複数のセンサ**があることも珍しくない。
- ・センサの性能以上の計測・制御は不可。
- ・部品、モジュール、装置などの形態がある。
- ・受動型と能動型がある。

まとめ

○ センサの性能・使い方・選定

- ・センサの選定において知っておくべき特性
オフセット/ゲイン/直線性/ヒステリシス
応答性/ノイズ/単調性/再現性/分解能
温度に依存性/ゼロドリフト
- ・一般に**校正が必要**。とくに絶対的な値を得るためには**ゼロ点の確認**が必要。
- ・センサの選定は、物としての選定に加え、**処理まで含めた検討**が望ましい。(→次回)