

センサ信号の処理の基礎

仙台市地域連携フェロー

熊谷 正朗

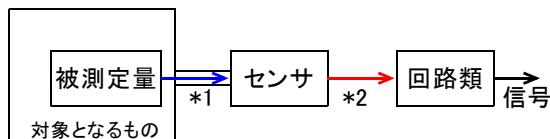
kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

東北学院大学工学部
ロボット開発工学研究室 **RDE**

イントロダクション

○ センサの役割

物理的・化学的現象(*1)を電気的変化(*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

今回の目的

○ センサ信号の処理の基礎

テーマ1: センサの信号と情報

- ・センサの信号は処理が必要
- ・値の変換処理・微分積分

テーマ2: フィルタ=時間変化する信号の処理

- ・ノイズ除去系のフィルタ
- ・周波数抽出・分析型

テーマ3: 信号処理の実例

- ・ロボット姿勢センサ等

イントロダクション

○ センサ信号の処理の例

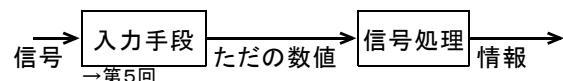
- ・AD変換後のデジタル値→測定値
 - ・値の微分積分
 - ・フィルタ（時間変化信号の加工）
 - ・周波数分析
 - ・画像処理
 - ・認識(文字、音声)
- 今日はここまで

※制御も数式上は類似するが、区別されている

イントロダクション

○ センサの信号処理の役割

ただの数値データを情報に



数値データ≠情報

コンピュータに入力したのみでは、
ただのデジタル数値であって、
情報への変換、情報の抽出が必要。

値の変換処理

○ センサからの値を被測定量に（まとめて）

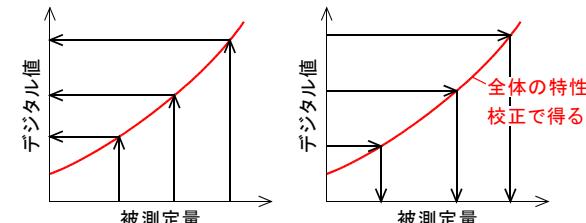


個別に考えて計算するのではなく、被測定量と
得られるデジタル値の関係だけを考慮する。

$$D = K \times \text{量} \quad \text{※センサまでだけではなく、機構} \\ \text{量} = D \div K \quad \text{(回転一直動)や計測法(風速→} \\ \text{風車回転数)まで含められる。}$$

値の変換処理

○ センサからの値を被測定量に（比例せず）



測定期: 被測定量 → 変換特性 → デジタル

復元: デジタル → 変換特性逆読み → 被測定量

データ列の処理

○ セットとして、変化傾向として

◇ 時間的な変化

- ・時々刻々変化する値を扱う。
- ・「**今の値**」でなにか(制御等)する。
- ・「**これまでの値の傾向**」から、なにかする。

◇ 空間的な変化

- ・長さ方向、面方向の値の変化。
- ・画像データ(画像処理)。
- ・地図と標高。

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 9 基礎からのメカトロニクスセミナー

微分と積分

○ センサの選択肢を増やす処理

◇ 微分

- ・信号の単位時間あたりの変化を得る。
- ・瞬間的な速度。
- ・位置センサー→速度→加速度

◇ 積分

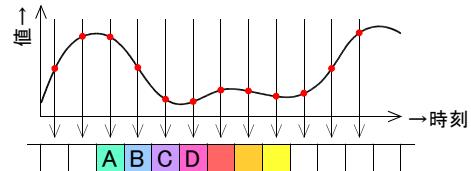
- ・微分の逆、値を積み上げる。
- ・速度に対する位置の関係。
- ・角速度センサー→角度

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 11 基礎からのメカトロニクスセミナー

時間の系列のデータの処理

○ データのサンプリング (→第5回)



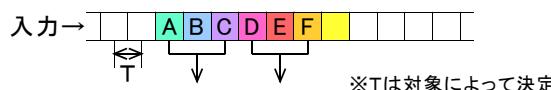
- ・時間変化するデータを取るときは、一般に一定の時間間隔で行う(サンプリング周期)。
- ・取得したデータの系列を処理する。

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 10 基礎からのメカトロニクスセミナー

微 分

○ 系列データからの算出 その1



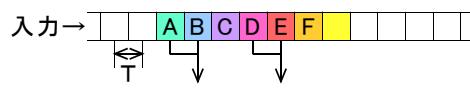
- ・データは時間T間隔でサンプルされている。
- ・Bの時点での微分値 : $(C-A)/2T$
- ・Eの時点での微分値 : $(F-D)/2T$
- ・「**未来の値**」を使う。
- = Bの時点ではCはまだ得られていない

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 13 基礎からのメカトロニクスセミナー

微 分

○ 系列データからの算出 その2



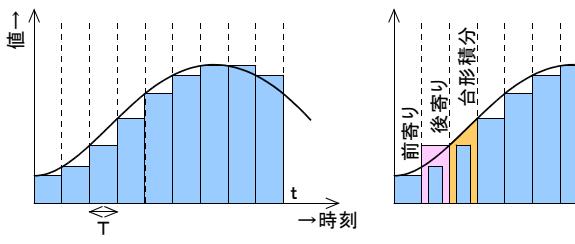
- ・データは時間T間隔でサンプルされている。
- ・Bの時点での微分値 : $(B-A)/T$
- ・Eの時点での微分値 : $(E-D)/T$
- ・**未来の値を使わない。**
- = Bまでのデータで問題なく計算できる。

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 14 基礎からのメカトロニクスセミナー

積 分

○ 面積を求める



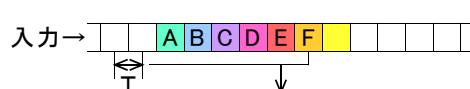
- ・波形と横軸で囲まれた面積。短冊の和。
- ・高さ = 短冊区間の前の値、後、両方(台形)。

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 15 基礎からのメカトロニクスセミナー

積 分

○ 系列データからの算出



- ・データは時間T間隔でサンプルされている。
- ・短冊の面積 = $\cdots A \times T, B \times T, C \times T \cdots$
- ・積分値 = $\cdots (A \times T) + (B \times T) + (C \times T) \cdots$
- ・データが得られるたび加算

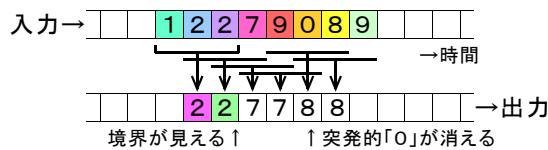
$$S + (A \times T) \rightarrow S, \quad S + (B \times T) \rightarrow S$$

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 16 基礎からのメカトロニクスセミナー

デジタルフィルタ

○ メディアン(中間値)フィルタ



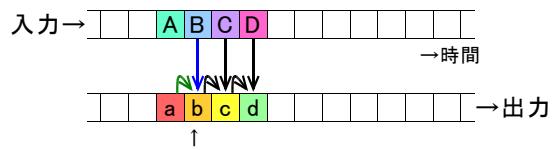
- ・突発的な大きなノイズ(スパイクノイズ)の除去に効果的で、画像処理(ごま塩対策)で有名。
- ・「並び替え」で処理の手間が大きい。
- ・表計算ソフトでは手軽に処理できる。

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 25 基礎からのメカトロニクスセミナー

デジタルフィルタ

○ 1次ローパスフィルタ



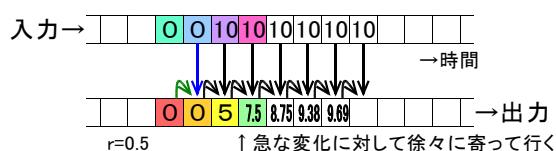
- ・入力だけではなく、直前の出力も使う。 $b = r \times B + (1-r) \times a$ r は0~1
- ・比率 r が0に近いほど、変化が通りにくい。 $\approx r=0 \rightarrow b=a$ (出力変わらず) $r=1 \rightarrow b=B$ (入力そのまま)

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 26 基礎からのメカトロニクスセミナー

デジタルフィルタ

○ 1次ローパスフィルタ



- ・出力= $0.5 \times \text{入力} + 0.5 \times \text{直前の出力}$
- ・徐々に入力値に近づいていく。
- ・ r を小さく(0.01等)すると信号がなだらかに。
- ・簡単な式で効果がある。

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 27 基礎からのメカトロニクスセミナー

デジタルフィルタ

○ そのほかのフィルタ

◇ フィルタの種類

- ・周波数の低い成分を減らすハイパスなど様々あり、設計手段も用意されている。
- ・アナログフィルタより一般に高性能。(特性、精度)

◇ FIR型とIIR型

- ・FIR型: 入力のみから出力を作る。
 - ・IIR型: 入力と過去の出力から算出。
- ※厳密な定義は異なる

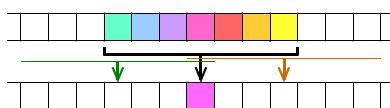
C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 28 基礎からのメカトロニクスセミナー

デジタルフィルタ

○ FIR(有限インパルス応答)フィルタ

- ・ある瞬間の入力が出力に及ぼす影響は時間的に限定されている。
- ・長周期の信号処理には計算量が増大。
- ・特性の数学的設計をしやすい。
- ・後処理向き、制御不向き。



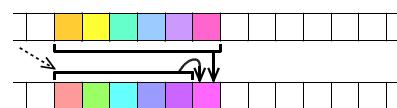
C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 29 基礎からのメカトロニクスセミナー

デジタルフィルタ

○ IIR(無限インパルス応答)フィルタ

- ・ある瞬間の入力はその先ずっと出力に影響し続ける。
- ・長周期の信号処理が少ない計算で可能。
- ・フィルタ設計はアナログの手法を用いる。
- ・制御、アナログフィルタの置き換え向き。



C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 30 基礎からのメカトロニクスセミナー

周波数分析

○ 信号に含まれる特定周波数の抽出

- ◇ すべての信号は正弦波(+余弦波)に分解できる
- ・フーリエ級数、フーリエ変換
 - ・何らかの信号に含まれる、特定の周波数に注目して測定したい。

◇ 周波数分析の例

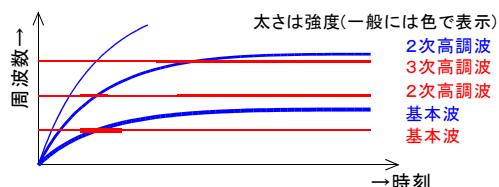
- ・機械振動やノイズの特性確認→原因調査
- ・ノイズに強い信号分析
- ・声や楽器に含まれる周波数成分

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 31 基礎からのメカトロニクスセミナー

周波数分析

○ 機械振動の解析 (自動車等回転機械)



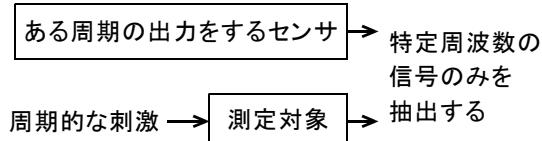
- ・機械の振動は、回転由来+固有振動
- ・時間とともに周波数が変化=回転による
- ・周波数一定で強度が変わる=固有振動

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 32 基礎からのメカトロニクスセミナー

周波数分析

○ ノイズに強い測定（微弱信号の検出）

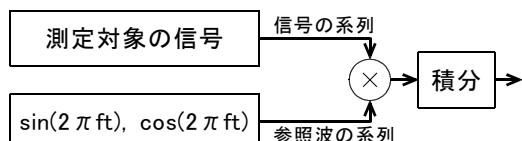


- ・特定の周波数の信号成分のみを測定することで、その他の信号(=ノイズ等)の影響を受けにくい計測が可能。

※ロックインアンプはこの一種。

周波数分析の方法

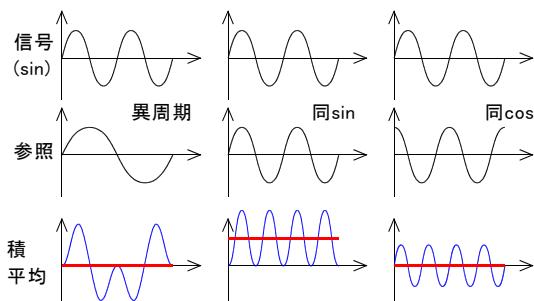
○ 一つの周波数成分の検出



- ・検出対象としている周波数の \sin (正弦波)と \cos (余弦波)を対象信号に乗じて、時間平均を求める(一定期間積分をする)。
→ その周波数が含まれる大きさが得られる。

周波数分析の方法

○ 一つの周波数成分の検出: 例



周波数分析

○ 基本的性質

- ・一般的の信号には多数の周波数成分が入っているが、混じっていても特定の成分にのみ反応する。
※近い周波数もある程度反応する
- ・同周波数でも正弦波と余弦波は別扱い。
→ $\sqrt{(\sin \text{成分})^2 + (\cos \text{成分})^2}$ で振幅
 \sin 成分と \cos 成分の比で位相
 \sin と \cos を独立に使うこともできる。

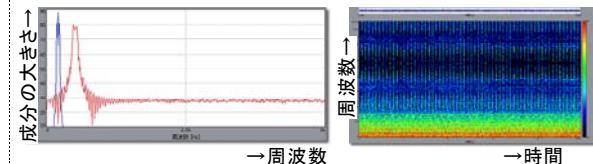
周波数分析

○ FFT(高速フーリエ変換)

- ・「特定の成分」のみではなく、「含まれる成分の大きさの一覧」を得たいときは、フーリエ変換を利用する。
- ・FFTはDFT(離散フーリエ変換)の演算を工夫して高速化したもので、近年はオシロスコープなどでも標準的機能になった。
- ・演算プログラム例なども多数あり。
(注: 一般に 2^n 個のデータに対して適用)

周波数分析

○ FFT(高速フーリエ変換)



FFTの表示例 (小野測器社WEBサイトより)

- ・周波数—成分の大きさ : 一般的表示
- ・時間—周波数—大きさ(色) : 時間変化する信号の解析用

周波数分析

○ FFT(高速フーリエ変換)

- ・周波数成分から「意味」を見つけるには、別の処理(や人間の判断)が必要。
- ・なにか対象への、**入力と出力**の波形の双方のFFT結果を演算することで、**対象の周波数特性**が得られる。
- ・周波数分解能と時間分解能は**両立せず**。
例) 1Hz単位の周波数分析には1秒間にわたりデータの計測が必要

整数演算と浮動小数点演算

○ 計算の速度と読みやすさ

整数演算(固定小数点演算)

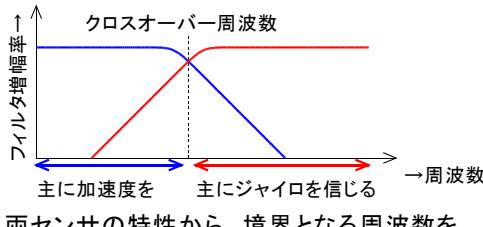
- 速度が速い/マイコンでも実用にしやすい。
- △ SI単位系で書くことは困難。
- ✗ 特有のテクニックが必要。

浮動小数点演算

- SI単位系による可読性の高いプログラム。
- △ 演算コストが大きい
(CPUの演算機能/ソフトウェアエミュレーション)

信号処理の実例：ロボットの姿勢センサ

○複数のセンサ信号の混合：フィルタ特性



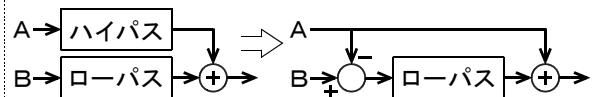
- 両センサの特性から、境界となる周波数を基準とした二つのフィルタを検討する。
- 重なりすぎ、隙間があくことはNG。

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 49 基礎からのメカトロニクスセミナー

信号処理の実例：ロボットの姿勢センサ

○信号の混合用フィルタの一体化



$$\begin{aligned} \text{・ハイパス特性} &= 1 - \text{ローパス特性} \\ \text{・ハイパス(A)} + \text{ローパス(B)} &= [A - \text{ローパス}(A)] + \text{ローパス}(B) \\ &= A + \text{ローパス}(B - A) \end{aligned}$$

※フィルタの「線形性」で演算順序交換

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 50 基礎からのメカトロニクスセミナー

信号処理の実例：ロボットの姿勢センサ

○ローパスフィルタの実装

◇式変形：一次ローパス

入力:U 出力:Y 比率:r

$$Y_{\text{次}} = rU + (1-r)Y_{\text{前}}$$

$$Y_{\text{次}} = Y_{\text{前}} + r(U - Y_{\text{前}})$$

◇C言語で整数演算実装

$r=(1/2^n)$ とすると、

($r \times$) は ($>>n$, nビット右シフト) になる。

$$Y += (U - Y) >> n; \quad *Y=Y+(U-Y)>>n$$

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 51 基礎からのメカトロニクスセミナー

信号処理の実例：音楽の周波数解析

○学生さん：「楽譜を起こせる処理を」

◇処理の背景

・音楽で聞こえる音高は「周波数」。

→周波数分析できれば音高は分かる？

・音楽では「音符の長さ」「タイミング」が必要。

→時間分解能も必要

◇課題点：両立

・周波数分解能(隣接する音の周波数は1.06倍)

・時間分解能(0.1秒くらいは欲しい)

C07 センサ信号の処理の基礎

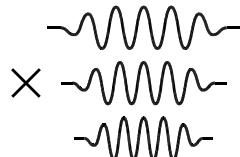
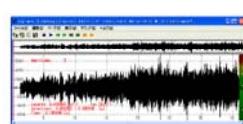
Page. 52 基礎からのメカトロニクスセミナー

信号処理の実例：音楽の周波数解析

○使用した手法：ウェーブレット変換

◇周波数と時間の分解能を、ある程度両立

- 周波数の低い成分は周波数優先
- 周波数の高い成分は時間を優先

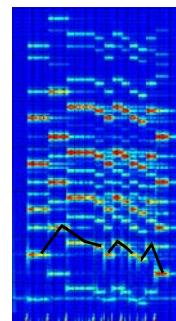


C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 53 基礎からのメカトロニクスセミナー

信号処理の実例：音楽の周波数解析

○処理結果



・それなりに高低の変化は得られた。

・かなりの高調波(倍音)が含まれている。

・ここから楽譜にするのは、別の処理が必要。

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 54 基礎からのメカトロニクスセミナー

まとめ

○センサ信号の処理の基礎

- センサから取り込み、AD変換した値はただのデータであって、情報ではない。有意の情報にするには何らかの処理が必要。
- 最低でも、被測定量への変換が必要。
- 簡単な演算で微分積分ができる。これにより、センサの選定範囲を増やす。

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 55 基礎からのメカトロニクスセミナー

まとめ

○時間変化する信号の処理

・単発の計測では得られない情報が、連続した計測データから得られる。

・時間的に前後に関連するデータの処理でノイズを除去したり、不要な周波数の成分を落とすことができる。

・周波数分析は演算量が多いが、実用的な用途には強力な手法である。

C07 センサ信号の処理の基礎

Page. 56 基礎からのメカトロニクスセミナー