2015年7月25日

アナログ回路のトレードオフと不確定性原理, 普遍量

群馬大学　電子情報部門
小林春夫

内容

- 主張
- 不確定性原理
- アナログ回路のトレードオフの
  不確定性原理での説明
- アナログ回路と不変量
- まとめ

内容

- <u>主張</u>
- 不確定性原理
- アナログ回路のトレードオフの
  不確定性原理での説明
- アナログ回路と不変量
- まとめ

主張

アナログ回路のトレードオフ、
性能指標(Figure of Merit: FOM)
性能限界を
不確定性原理とのアナロジーで解釈すると
体系化できる、見通しがよくなる。

「アナログ回路技術」というより「アナログ回路哲学」

内容

- 主張
- <u>不確定性原理</u>
- アナログ回路のトレードオフの
  不確定性原理での説明
- アナログ回路と不変量
- まとめ

不確定性原理

量子力学(Heisenberg) 不確定性原理

$\Delta x \cdot \Delta p > K1$ ①

x: 位置、 p: 運動量

K1: 定数

$\Delta t \cdot E > K2$ ②

t: 時間, E: エネルギー

K2: 定数

物理現象。
数学的には
証明できない。

周波数/時間の「不確定性原理」

信号波形　s(t)

そのパワースペクトラム　S(jω)

S(t) の標準偏差　σ_t

S(jω) の標準偏差 σ_ω

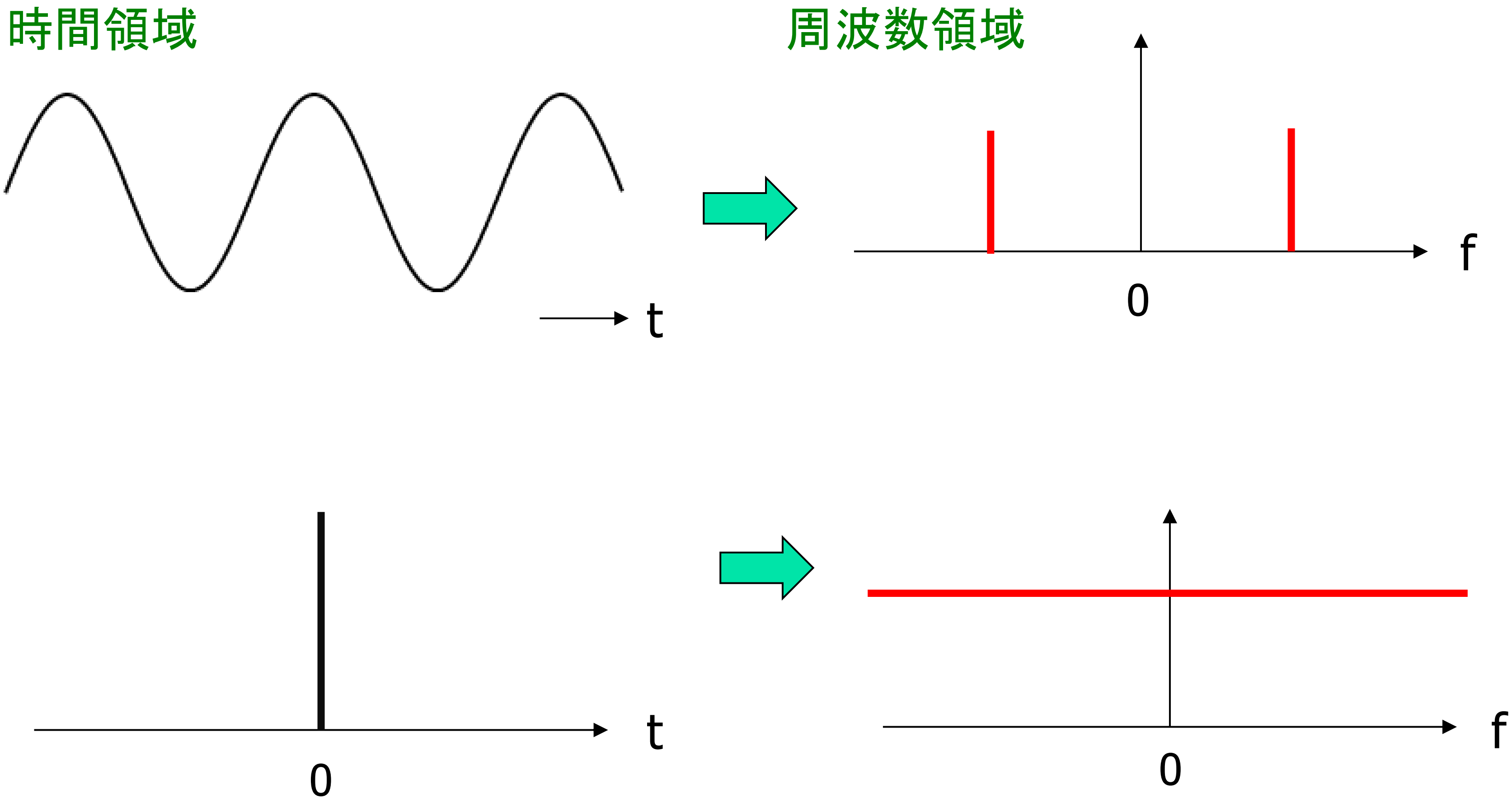
実際は物理現象の
不確定性原理ではない。
数学的に証明可能。

$\sigma_t \cdot \sigma_\omega > K3$　　③

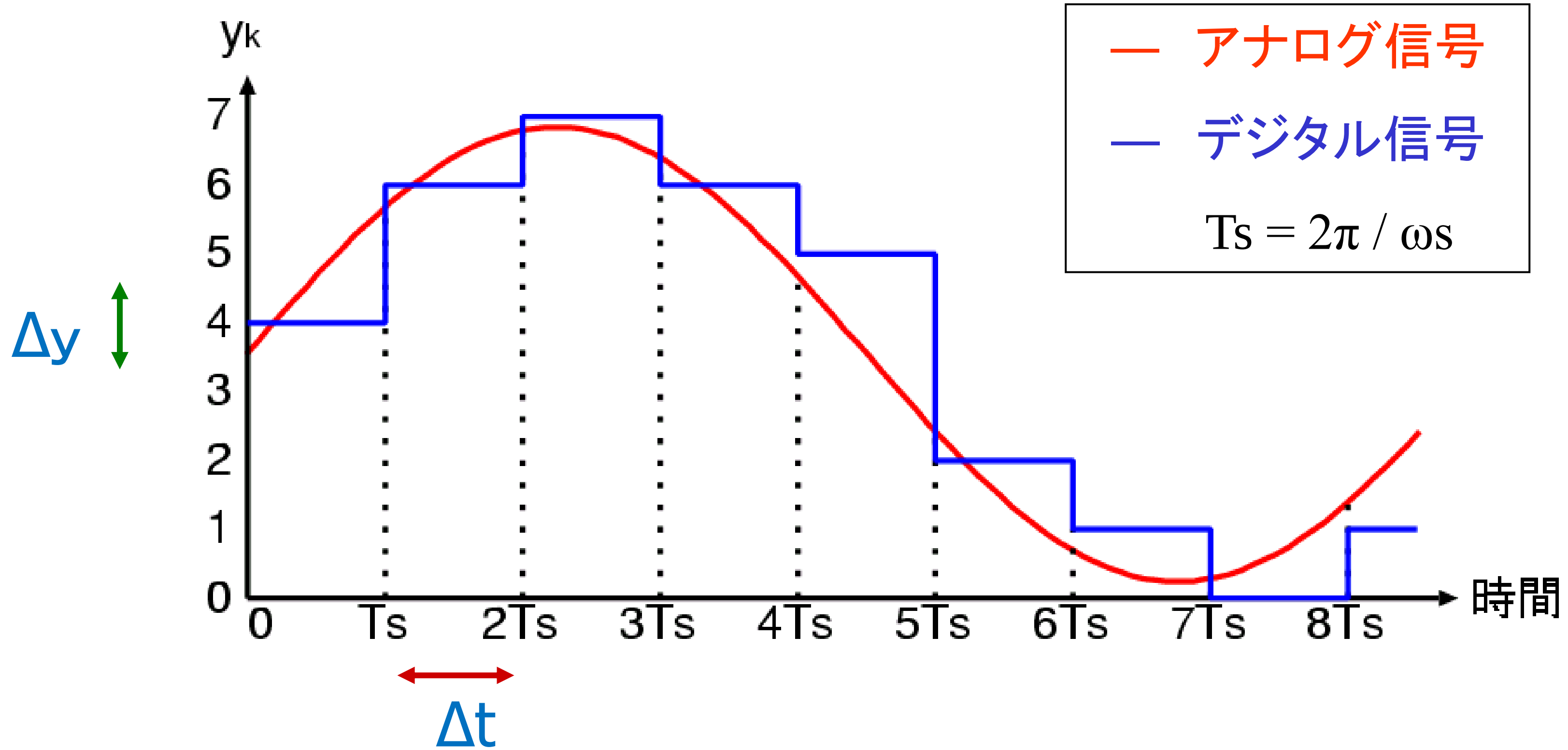
例1：　正弦波は時間領域では無限に続く、
　　　周波数領域ではデルタ関数

例2：　時間領域デルタ関数は
　　　周波数スペクトルは無現の裾野

周波数/時間の「不確定性原理」の例



デジタル信号の
信号振幅・時間の不確定性



Δy ・Δt ＞ K4　　④

内容

- 主張
- 不確定性原理
- <u>アナログ回路のトレードオフの不確定性原理での説明</u>
- アナログ回路と不変量
- まとめ

ジッタと消費電力

$\Delta t \cdot E > K2$ ② ⇨ $(\Delta t / T) \cdot P > K2$

クロック発生回路で、消費電力Pを
増加させると　ジッタΔt を低減できる。

その限界は不確定性原理で規定される

アパーチャ時間と消費電力

Δt・ E > K2 ② ⇨ (Δt /T)・ P > K2

クロックク発生回路で、消費電力Pを
増加させると 有限アパーチャ時間を
を低減できる。

その限界は不確定性原理で規定される

信号帯域と消費電力

$\Delta t \cdot E > K2$ ② ➡ $E / f > K2$

アンプ等のアナログ回路で
消費電力(エネルギー　E)を増加させると
帯域 f を拡大できる。

サンプリング回路での有限アパーチャ時間と帯域

σt・σω ＞ K3 ③

有限アパーチャ時間 σt を短くすると
帯域 σω を拡大できる。

ノイズ（信号振幅不確定性）と容量C

$\Delta x \cdot \Delta p > K1$　　①

電気と力学のアナロジー

Q（電荷）⟺ p (運動量)

V (電圧) ⟺ v (速度)

C (容量) ⟺ m (質量)

電荷保存則 ⟺ 運動量保存則

ノイズ（信号振幅不確定性）と容量C (2)

$\Delta x \cdot \Delta p > K1$ ① $\Longleftrightarrow$ $(\Delta V/f) \cdot \Delta Q > K1$

$\Longleftrightarrow$ $C(\Delta V^2/f) > K1$ ⑤

ΔV: 電圧ノイズ　　f: 帯域

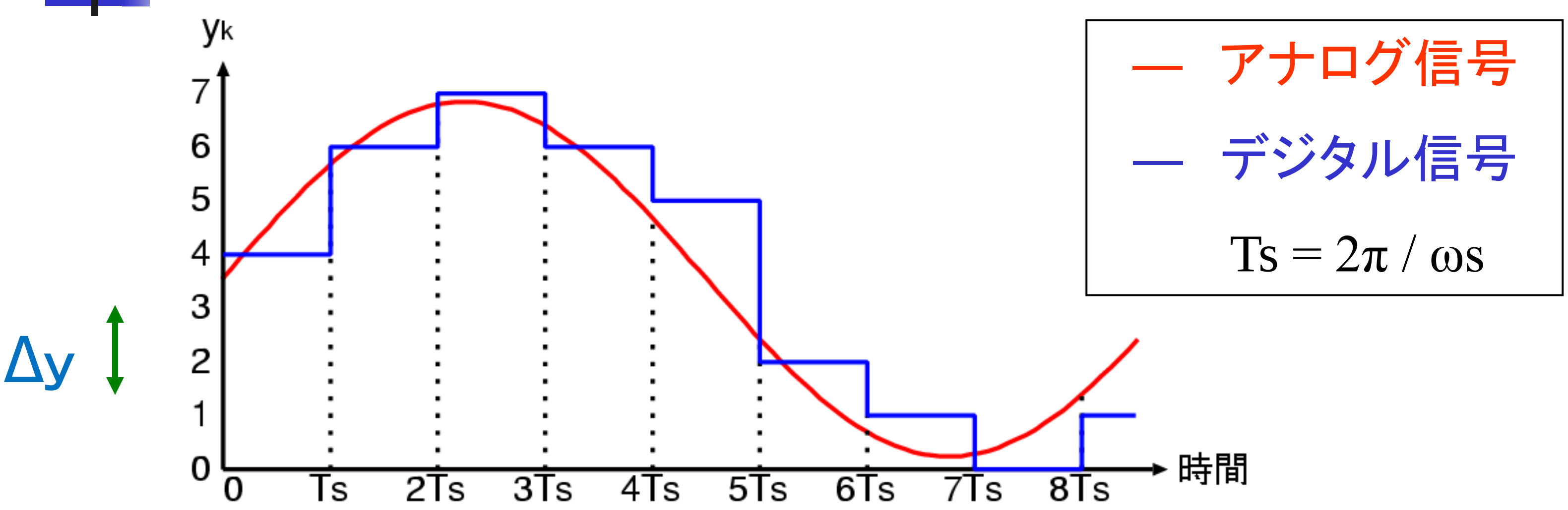
容量Cの全帯域ノイズ $\Delta V_n^2 = kT/C$

⑤ は Cが大きくなるとΔV^2は小、

ノイズ帯域fが大きくなると ΔV^2は大

という回路設計のトレードオフを表現している。

ADCの性能指標 (Figure of Merit: FOM)



Δt

$\Delta y \cdot \Delta t > K4$　④

n-bit: 分解能
fs: サンプリング周波数

$$\boxed{\text{ADC のFOM} = P / (2^n f_s) = P\, \Delta y\, \Delta t > P \cdot K4}$$

２つのADCで同じ消費電力P　で
Δy Δt　は一定ならば　２つは同等の実力

内容

- 主張
- 不確定性原理
- アナログ回路のトレードオフの不確定性原理での説明
- <u>アナログ回路と不変量</u>
- まとめ

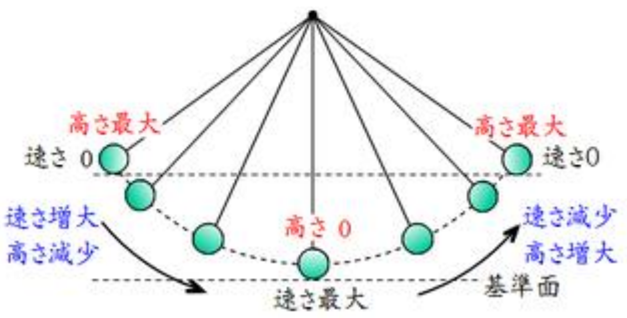
物理学
不変量の法則を見つける

エネルギー保存則

質量保存則

電荷保存則

運動量保存則

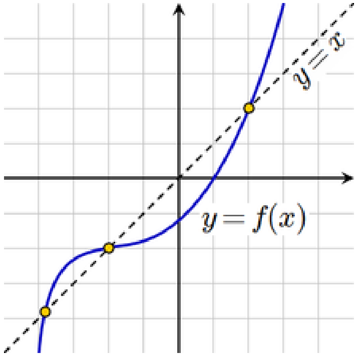


幾何学
不動点を見つける

不動点: その写像で自分自身に写される点

不動点定理

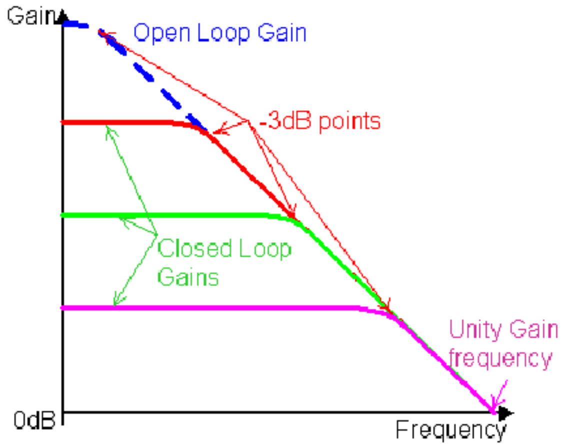
平衡、安定性の不動点での説明



航海での　北極星

アナログ回路設計

Gain Bandwidth Product
(GB 積、利得帯域積)



ノイズ^2 / 帯域
ジッタ^2 / 帯域

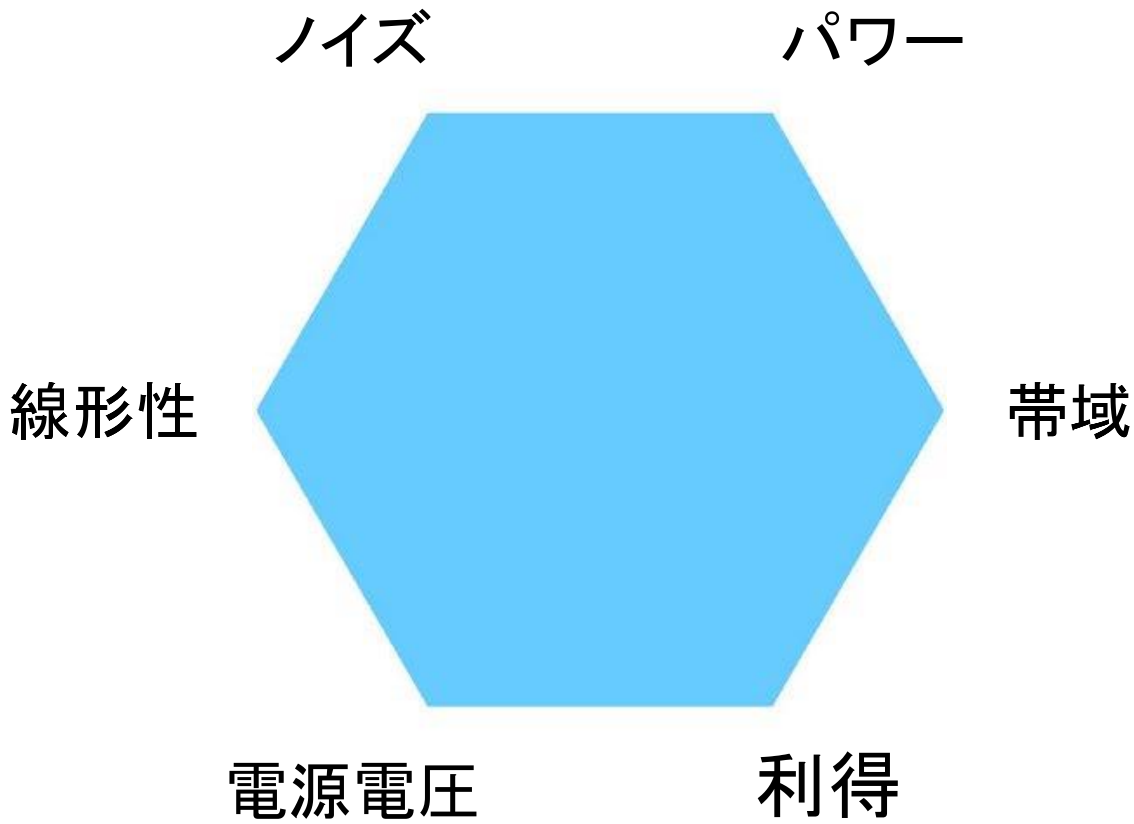
Technology Constant
FOM (Figure of Merit)

プロセス、電源電圧、温度変動に依らない

基準信号 がアナログ集積回路で一つ必要

- 基準電圧　Vref
  - DACは Vref の整数倍のアナログ電圧を出力
  - ADCはアナログ入力電圧がVrefの何倍かを検出
- 一つのVref があれば
  それをコピー、定数倍して使う。
- 基準時間信号Tref
  - アナログフィルタの周波数特性の調整
  - TDC回路は入力時間がTrefの何倍かを検出

アナログRF設計のトレードオフ六角形



離散フーリエ変換と不確定性関係

サンプリング周波数 fs

サンプリング周期 Ts (= Δt)

  Ts = 1/fs

N-point DFT

周波数分解能 Δf = fs/N = 1/(Ts N)

$$\boxed{\Delta f\,\Delta t = 1/N}$$

サンプリングは「測定」

上記はサンプリング（測定）による不確定性

量子力学との対応

アパーチャ時間による時間、周波数の不確定性

⟺ ケナードの不等式

サンプリングによる時間、周波数の不確定性

⟺ Heisenberg 不確定性原理

アパーチャ時間ありのサンプリングによる
波形の計測で　小澤の不等式に相似のものが
導出できないか。

内容

- 主張
- 不確定性原理
- アナログ回路のトレードオフの
  不確定性原理での説明
- アナログ回路と不変量
- まとめ

まとめ

- アナログ回路のトレードオフ、FOMを不確定性原理とのアナロジーでとらえると見通しがよくなる。
- 実際の性能限界も不確定性原理で与えられることが多い。

課題: 線形性も不確定性原理で表現する。