ADCヒストグラムテスト時間短縮法の検討

趙 宇杰＊　杜 遠洋　小澤 祐喜　佐々木 優斗
桑名 杏奈　小林 春夫　中谷 隆之　畠山 一実
（群馬大学）

佐藤 賢央　石田 嵩　岡本 智之　市川 保
（ローム株式会社）

群馬大学
GUNMA UNIVERSITY

OUTLINE

- 研究目的
- 正弦波ヒストグラム法
- 時間短縮のためのアプローチ
  - 等価時間サンプリング
  - 複数の正弦波を合成
- 入力波とヒストグラム形状の関係の定式化
- 結論

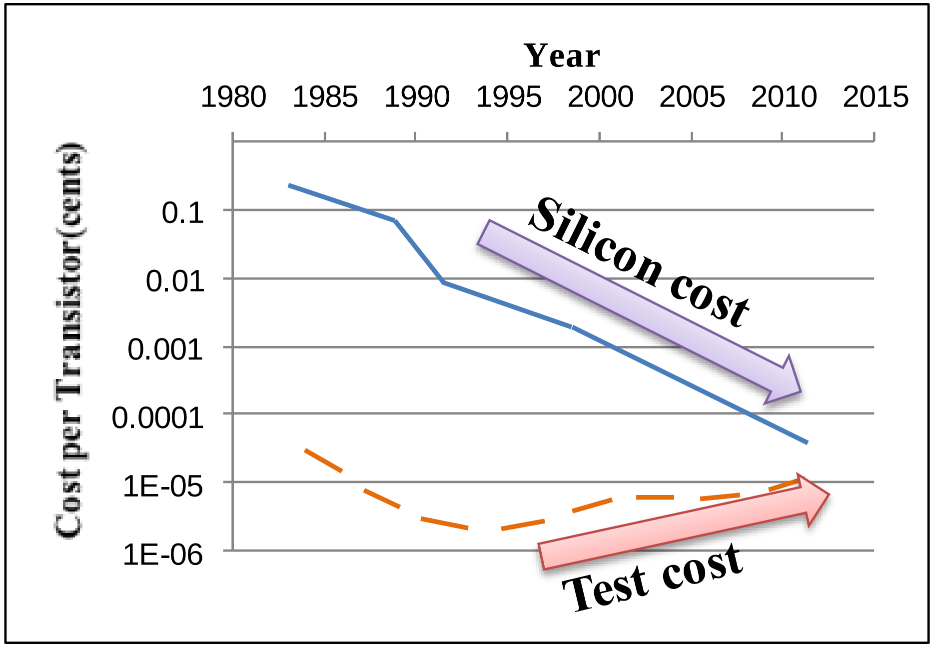
OUTLINE

- 研究目的
- 正弦波ヒストグラム法
- 時間短縮のためのアプローチ
  - 等価時間サンプリング
  - 複数の正弦波を合成
- 入力波とヒストグラム形の関係の定式化
- 結論

LSIテストとコスト

テストコストは テスト時間に比例

1ドルのチップのテスト時間の上限
＝1秒程度まで



線形性テストには ヒストグラム法が よく用いられる

高分解能低速ADC

長時間を要する ☹

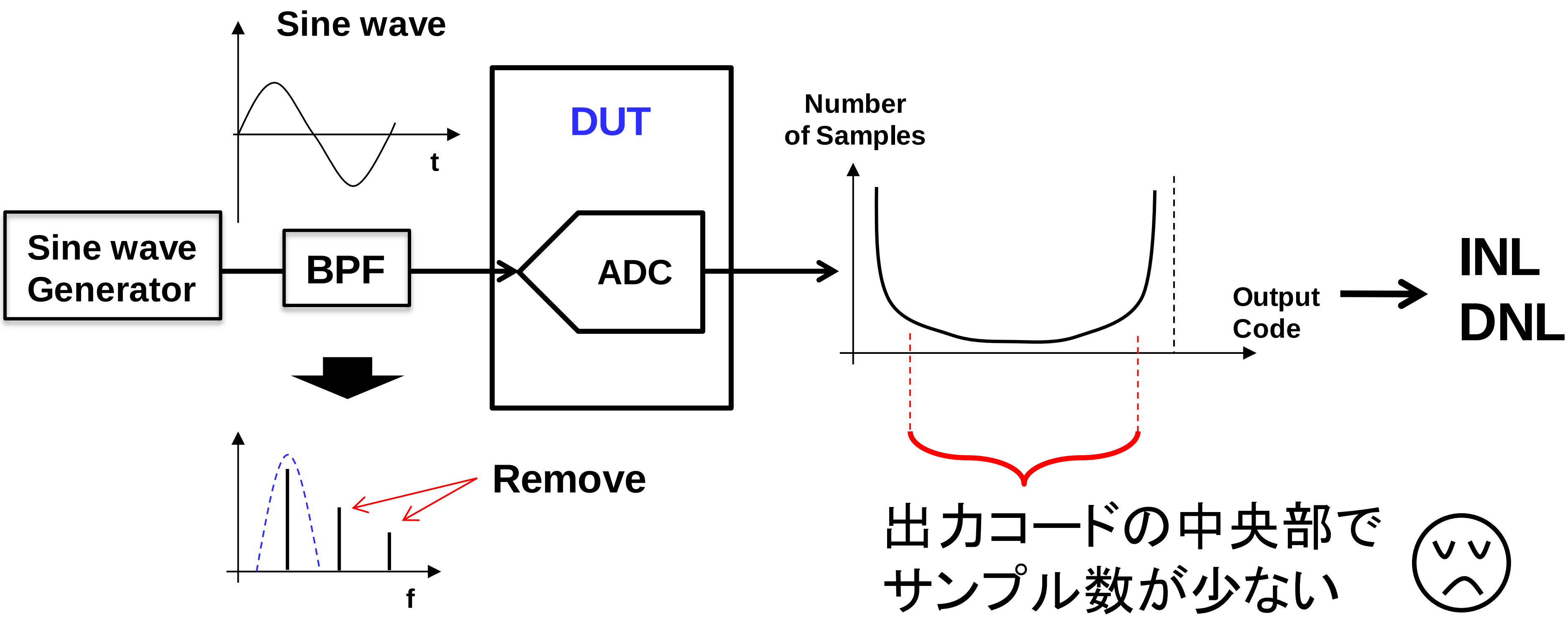
⇨ **本研究では テストにかかる時間を 短縮することを目指す**

OUTLINE

- 研究目的
- **正弦波ヒストグラム法**
- 時間短縮のためのアプローチ
  - 等価時間サンプリング
  - 複数の正弦波を合成
- 入力波とヒストグラム形の関係の定式化
- 結論

正弦波ヒストグラム法

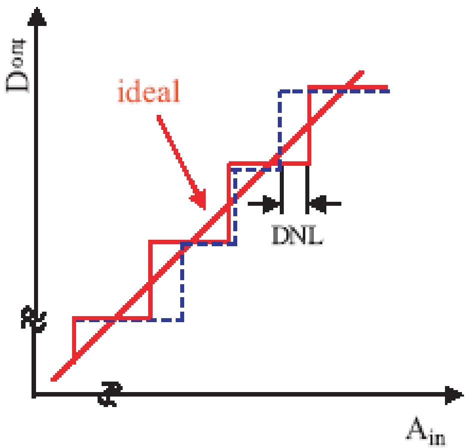
ヒストグラム法（単一正弦波を入力）

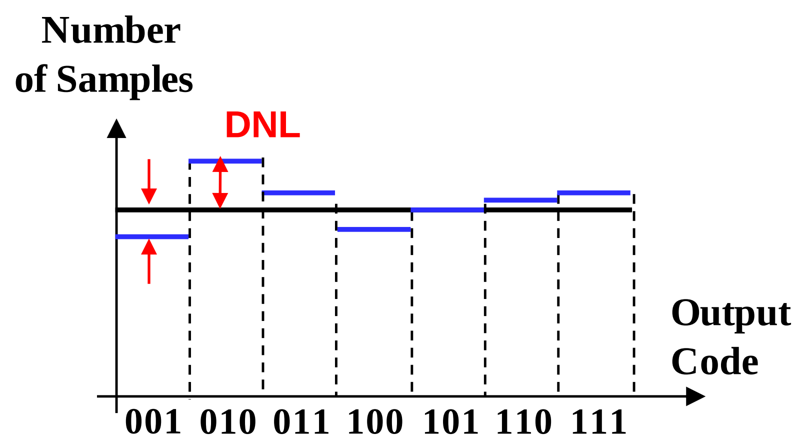


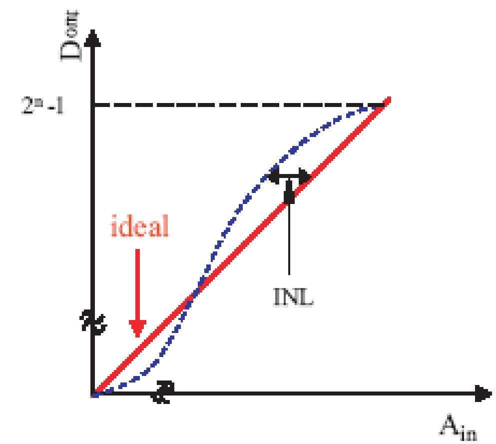
出力コードの中央部で
サンプル数が少ない

アナログフィルタを用いると
低歪の純粋な正弦波が
比較的簡単に作成できる

DNL & INL







- **ADCのテストで重要な指標**

  DNL（Differential Non-Linearity　微分非直線性誤差）：

  実際のステップ幅と理想値の差

  INL（Integral Non-Linearity、積分非直線性誤差）：

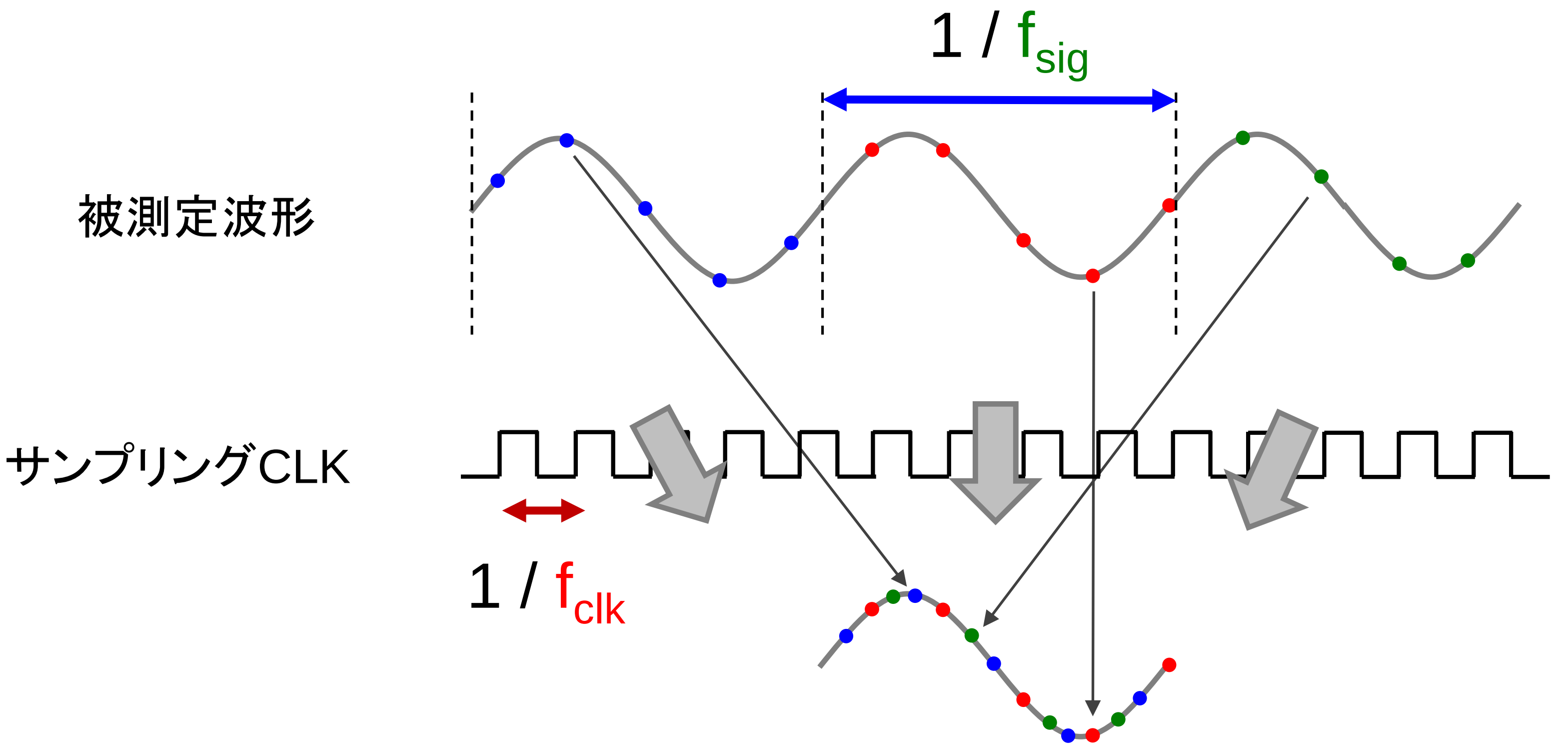
  理想的なコンバージョンラインからの差

$$\mathrm{INL}(k) = \sum_{i=1}^{k} \mathrm{DNL}(i)$$

OUTLINE

- 研究目的
- 正弦波ヒストグラム法
- 時間短縮のためのアプローチ
  - 等価時間サンプリング
  - 複数の正弦波を合成
- 入力波とヒストグラム形の関係の定式化
- 結論

等価時間サンプリングの原理



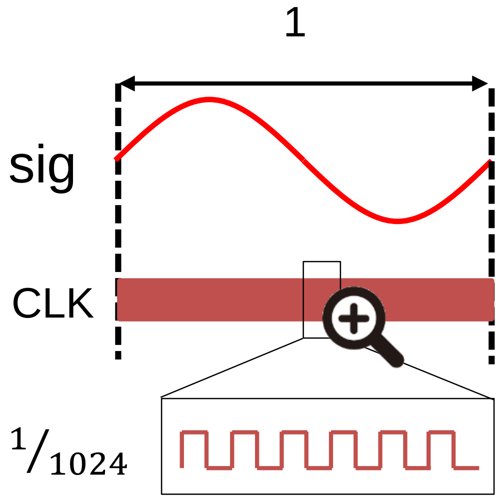
f_{sig}: 信号周波数
f_{clk}: クロック周波数

繰り返し波形を非同期CLKでサンプリング → 単波形を構成

「波形抜け」と「黄金比(小林-佐々木定数)」

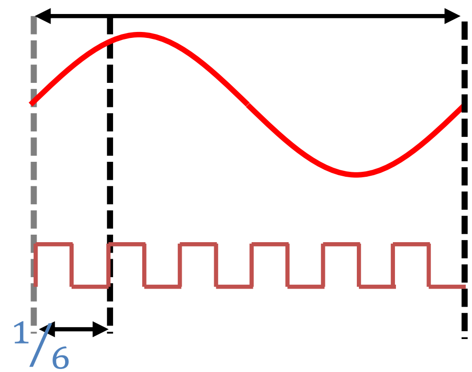
波形抜け

$$f_{CLK} \gg f_{sig}$$

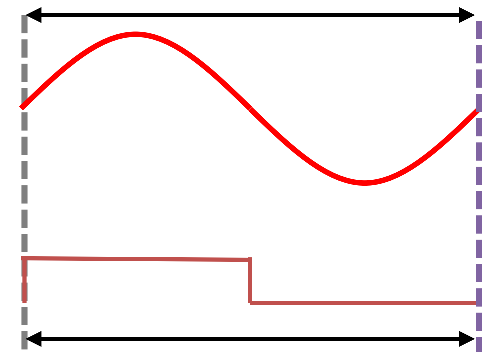


$$f_{CLK} \approx \frac{1}{\alpha} f_{sig}$$

$$\left(\alpha = 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \cdots, \frac{1}{6}, \cdots\right)$$



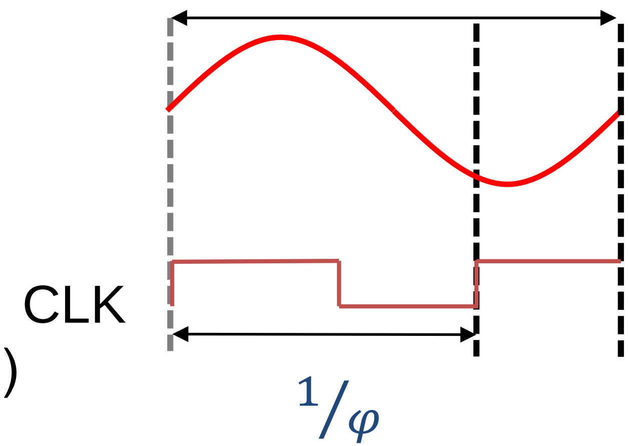
$$f_{CLK} \approx f_{sig}$$



黄金比

$$\boldsymbol{f_{CLK} = \varphi \times f_{sig}}$$

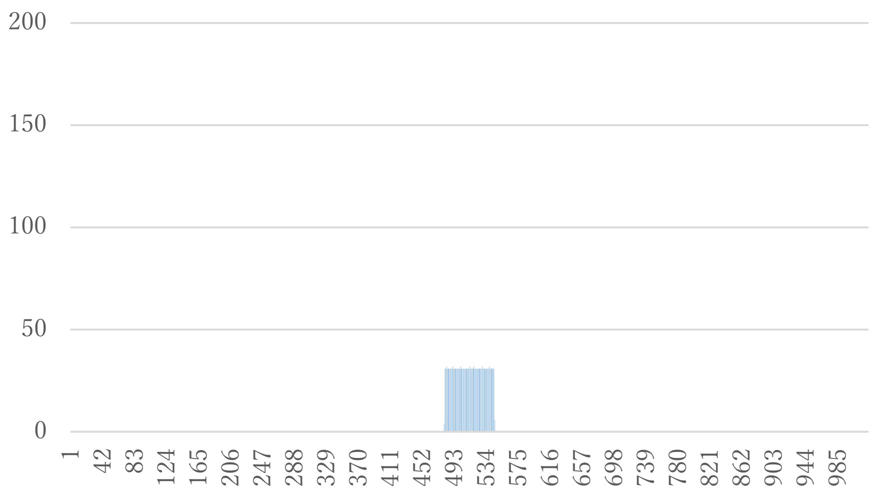
$\boldsymbol{\varphi}$ **: Golden ratio**
(= 1.6180339887…)

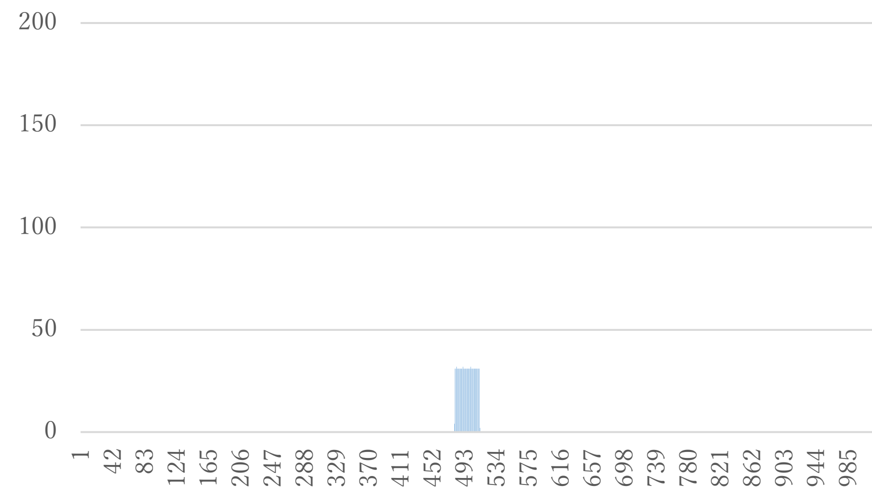


Yuto Sasaki, Yujie Zhao, Anna Kuwana and Haruo Kobayashi, "Highly Efficient Waveform Acquisition Condition in Equivalent-Time Sampling System", 27th IEEE Asian Test Symposium, Hefei, Anhui, China (Oct. 2018)

波形抜けを利用

入力信号波形の収集効率が悪いf_{CLK}とf_{sig}の関係を利用すれば，特定コードにヒストグラムを集中させることができる。

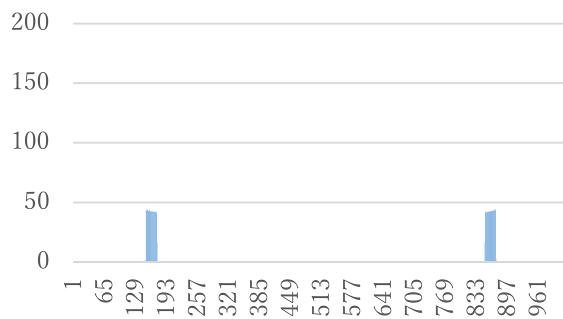


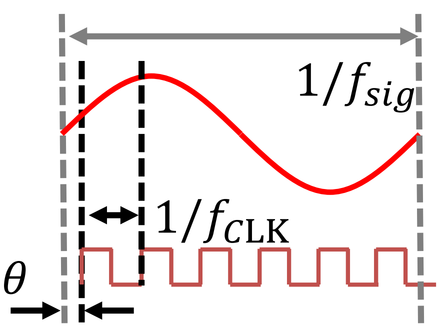


$$f_{\mathrm{CLK}} = f_{sig} \times \frac{2 \times (1 + 100000)}{100000}$$

$$f_{\mathrm{CLK}} = f_{sig} \times \frac{1 + 100000}{100000}$$

特定コードにヒストグラムを集中

	$f_{\mathrm{CLK}} = f_{sig} \times \frac{2 \times (1 + 100000)}{100000}$	$f_{\mathrm{CLK}} = f_{sig} \times \frac{1 + 100000}{100000}$
$\theta = \pi/2 \times 0.5$		
$\theta = \pi/2 \times 0.9$		



$f_{\mathrm{CLK}} = f_{sig} \times$ ● →ヒストグラムの集中度

θ →ヒストグラムを集中させる位置

→調整できる

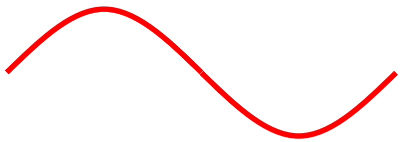
実装時、θ を自由に制御するのは難しい

OUTLINE

- 研究目的
- 正弦波ヒストグラム法
- 時間短縮のためのアプローチ
  – 等価時間サンプリング
  – 複数の正弦波を合成
- 入力波とヒストグラム形の関係の定式化
- 結論

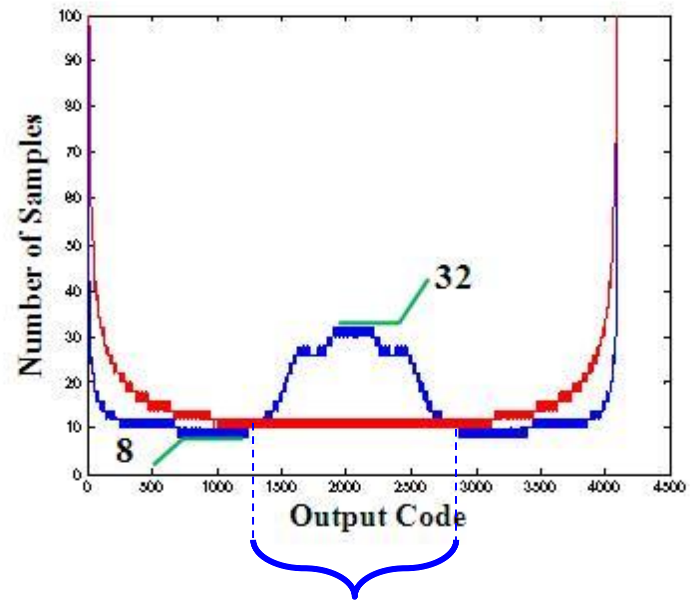
複数の正弦波を合成

単一正弦波(赤)



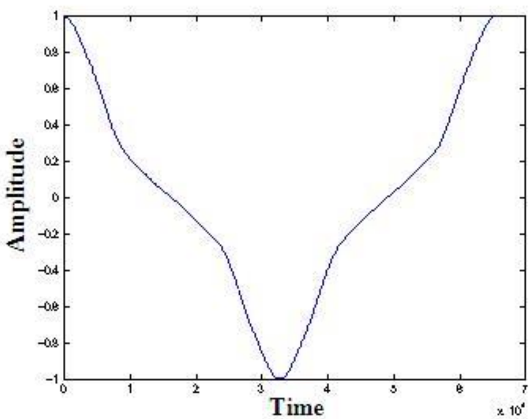
$f(t) = \sin \omega t$

ヒストグラム



特定コードにヒストグラムが集中

正弦波を合成(青)



$$f(t) = A(W_1 + 2.6 \cdot W_2 + 1.8 \cdot W_3 + 1.4 \cdot W_6 + 1.2 \cdot W_7) + V_{OS}$$

$$W_m = \frac{\cos((2m-1)\omega t)}{(2m-1)^2} \qquad A = 2.90[V] \qquad V_{OS} = 4.0[V]$$

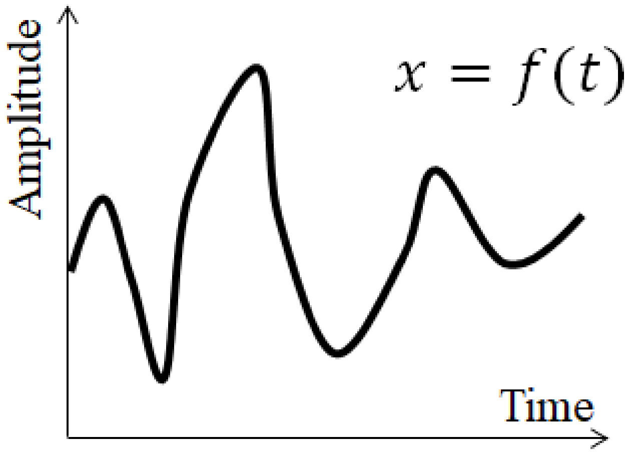
…定式化したい

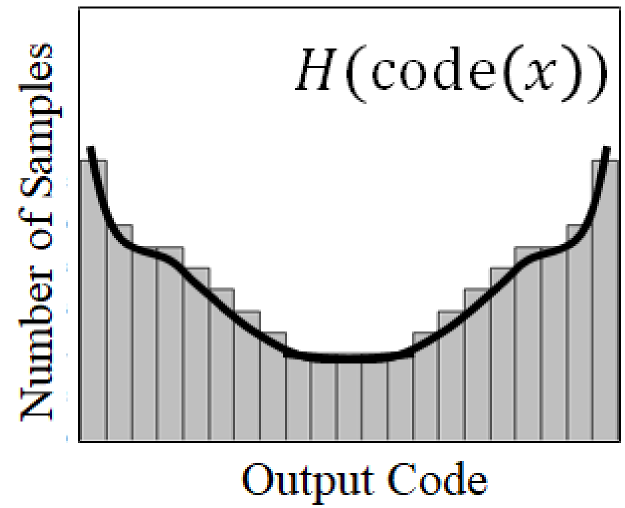
Satoshi Uemori, Takahiro J. Yamaguchi, Satoshi Ito, Yohei Tan, Haruo Kobayashi, Nobukazu Takai, Kiichi Niitsu, Nobuyoshi Ishikawa, "ADC linearity test signal generation algorithm", Circuits and Systems (APCCAS), 2010 IEEE Asia Pacific Conference, p.44-47, (2010).

OUTLINE

- 研究目的
- 正弦波ヒストグラム法
- 時間短縮のためのアプローチ
  - 等価時間サンプリング
  - 複数の正弦波を合成
- **入力波とヒストグラム形の関係の定式化**
- 結論

汎用的なアルゴリズム生成





最終目標

- テストしたいコードにヒストグラムを集中させる
- 任意の$H(\mathrm{code}(x))$ を作成する$f(t)$を得る

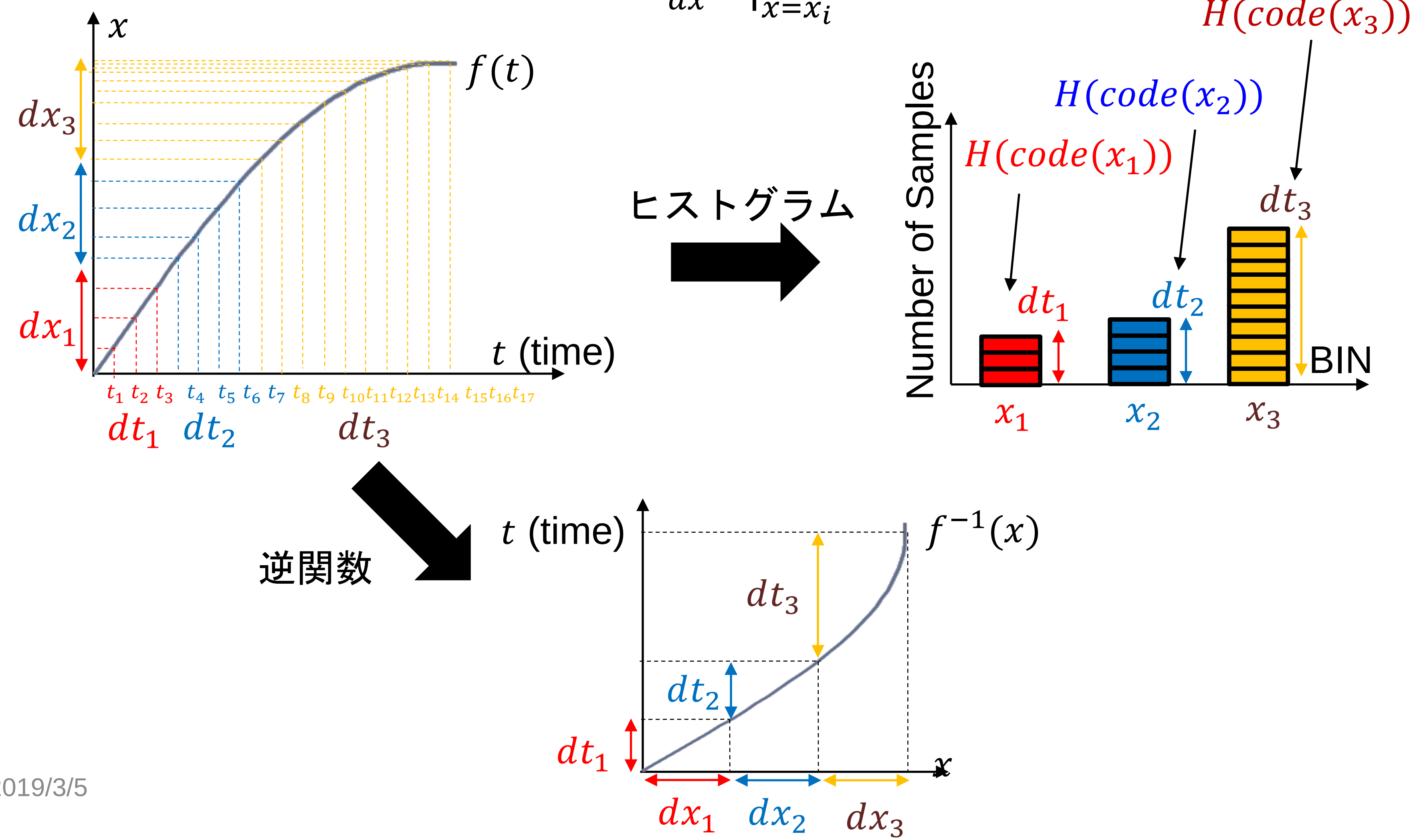
本研究（その第一段階）

- ヒストグラムの形$H(\mathrm{code}(x))$を
  入力関数$f(t)$から数学的に求める

アルゴリズムの元となる考え

ヒストグラムの傾き$\frac{\Delta H(\mathrm{code}(x_i))}{\Delta \mathrm{code}(x_i)}$は

入力関数$f(t)$の逆関数$f^{-1}(x)$の微分$\left.\frac{df^{-1}(x)}{dx}\right|_{x=x_i}$に比例する。

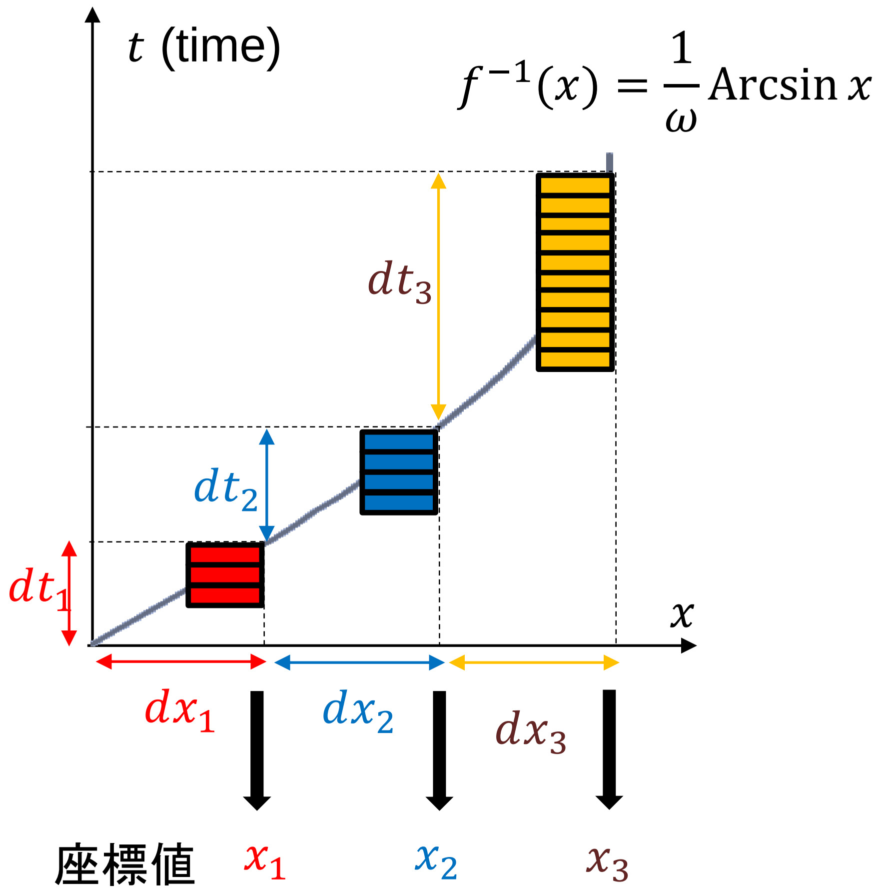


アルゴリズム1

逆関数$f^{-1}(x)$を使う

$$H(\mathrm{code}(x_i)) = \left.\frac{df^{-1}(x)}{dx}\right|_{x=x_i} - H(\mathrm{code}(x_{i-1}))$$

$f(t) = \sin \omega t$ の例



$$dt_1 = \frac{1}{\omega}\mathrm{Arcsin}\, dx_1$$

$$dt_2 = \frac{1}{\omega}\mathrm{Arcsin}(\underbrace{dx_1 + dx_2}_{x_2}) - dt_1$$

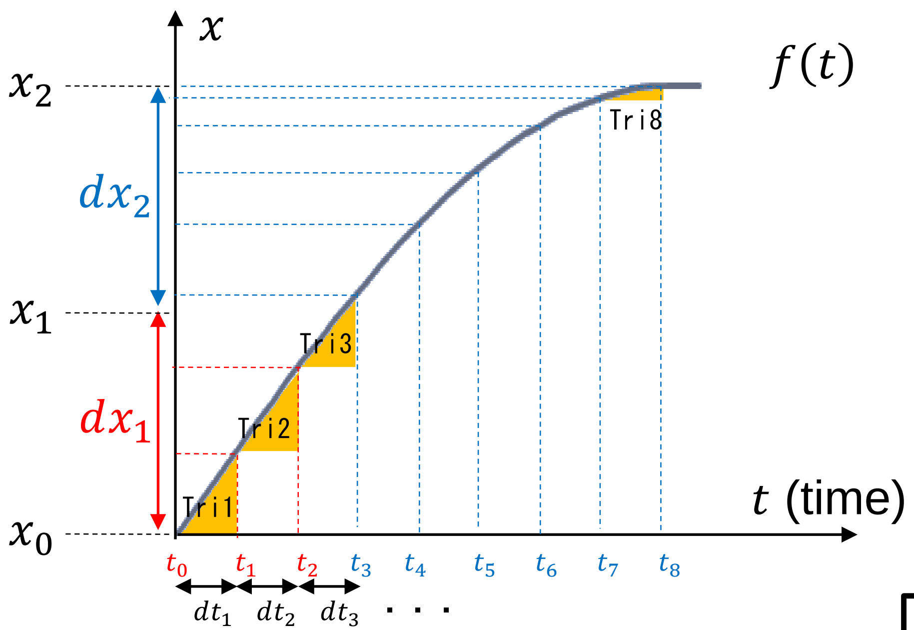
$$dt_3 = \frac{1}{\omega}\mathrm{Arcsin}(\underbrace{dx_1 + dx_2 + dx_3}_{x_3}) - dt_1 - dt_2$$

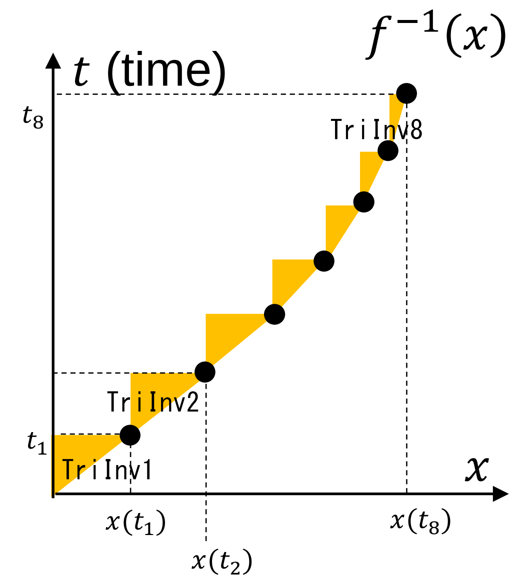
アルゴリズム2

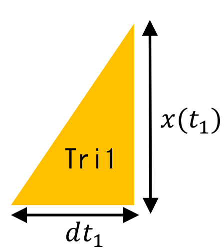
入力関数$f(t)$の傾きの逆数を，逆関数$f^{-1}(x)$の傾きと考える：

$$H\left(\mathrm{code}(x_i)\right) = 1/\left.\frac{df(x)}{dx}\right|_{x=x_i} \times \Delta x_i$$

$f(t) = \sin \omega t$ の例







Tri1の斜辺の傾き

厳密には：$\frac{dx(t)}{dt}\Big|_{t_1}$

数値的には：$\frac{x(t_1)}{dt_1}$

逆関数：

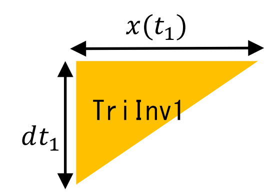
幾何学的には

上下反転→90度左に回転

数値的には

分子の数字と分母の

数字を入れ替え



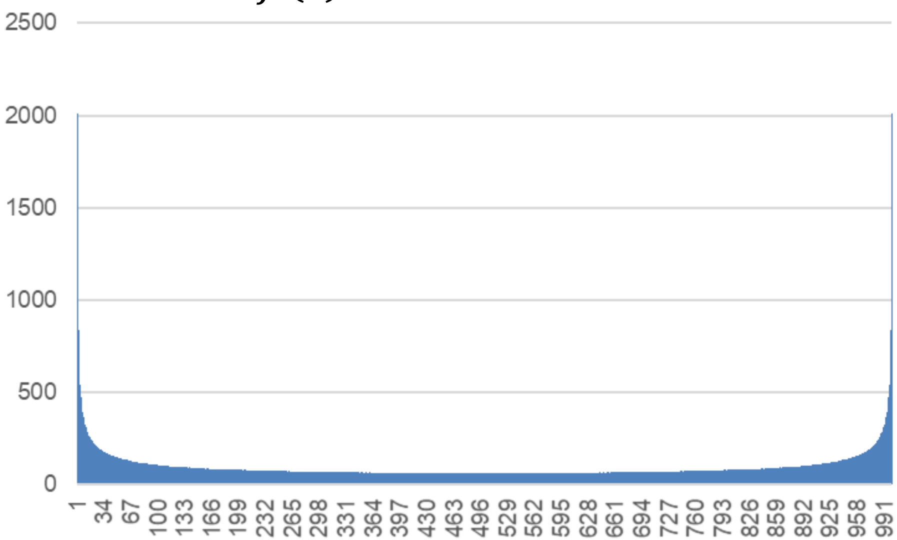
TriInv1の斜辺の傾き

数値的には：$\frac{dt_1}{x(t_1)}$

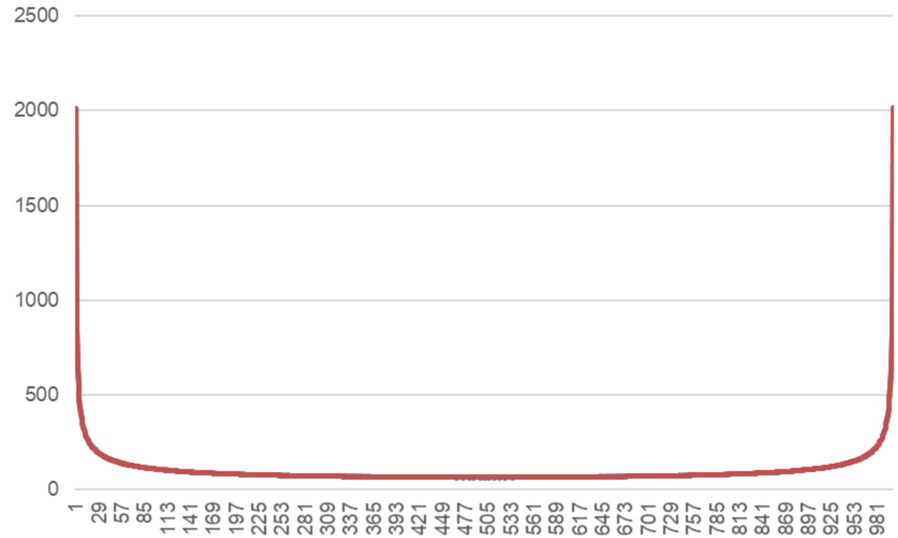
シミュレーション検証（アルゴリズム1）

(a)サンプリングにより得られたヒストグラム

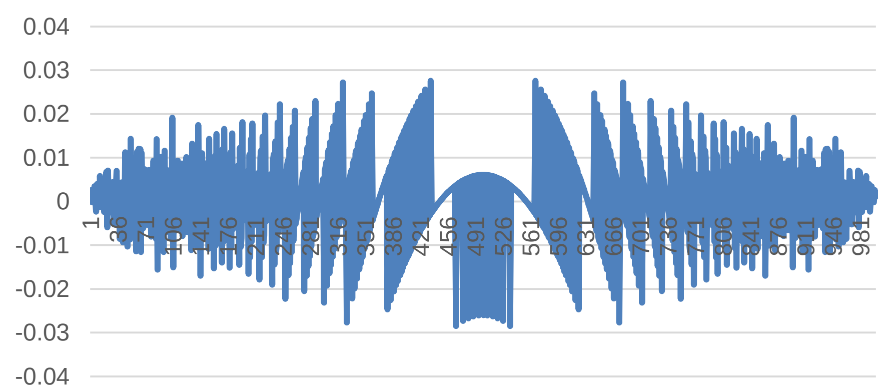
$f(t) = \sin \omega t$ の例



(b)アルゴリズム1により（数学的に）得られたヒストグラムと(a)の比較



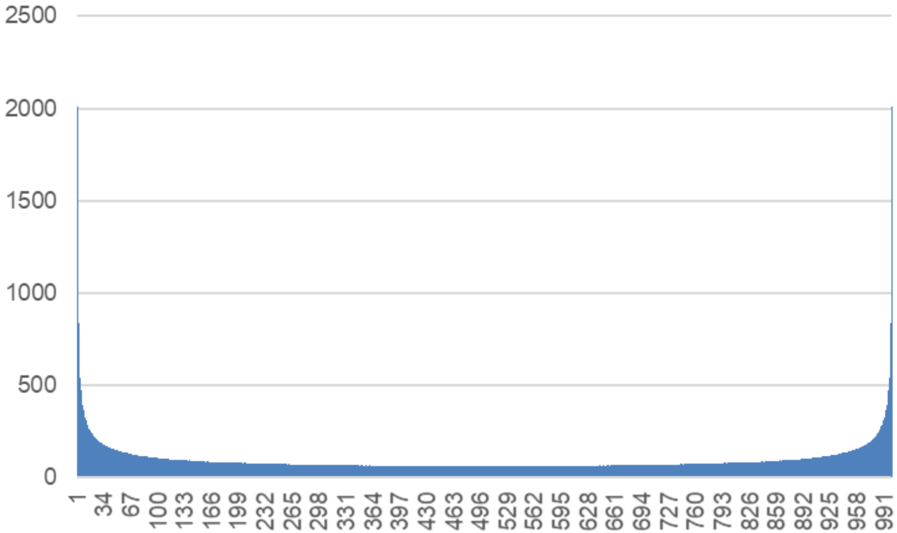
(a)(b)の差：
最大2.84%
平均0.77%
程度のずれ



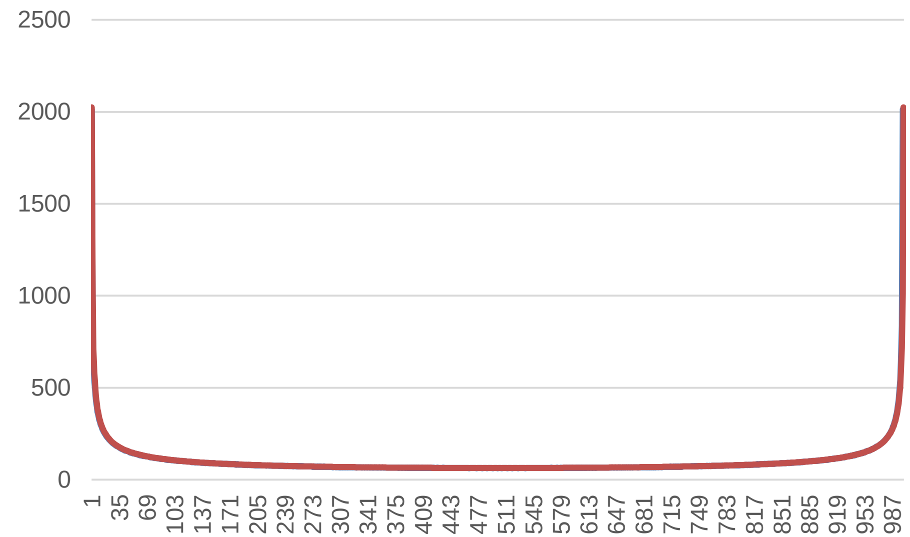
シミュレーション検証（アルゴリズム2）

(a)サンプリングにより得られたヒストグラム

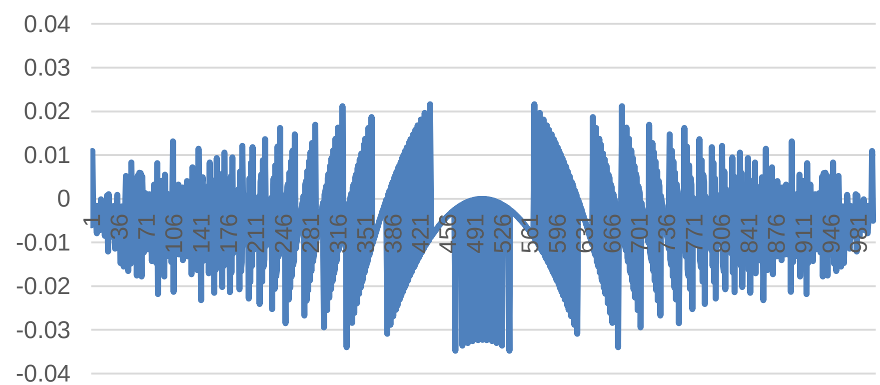
$f(t) = \sin \omega t$ の例



(b)アルゴリズム2により（数学的に）得られたヒストグラムと(a)の比較



(a)(b)の差：
最大3.47%
平均0.88%
程度のずれ



OUTLINE

- 研究目的
- 正弦波ヒストグラム法
- 時間短縮のためのアプローチ
  - 等価時間サンプリング
  - 複数の正弦波を合成
- 入力波とヒストグラム形の関係の定式化
- **結論**

結論

目的:

- LSIの線形性テストにかかる時間を減らす。

アプローチ:

- 特定コードにヒストグラムを集中させる。
- 任意形のヒストグラムを作成するための入力関数を得る。

本研究では、その第一段階として

- ヒストグラムの形を、入力関数から数学的に求めるアルゴリズムを2つ考案した。
- 単一正弦波に対して検証を行い、アルゴリズムの妥当性を示す良い結果を得た。

定式化のメリット

済みませんが，もう少し
わかり易く抽象的に
説明して頂けませんか

東大数学科　吉田耕作氏

$y = -x + 9$

$y = 2x$

$y = 3x + 1$

$y = \frac{1}{5}x - 4$

$y = -7x$

$(-1,0), (0,1), (1,2), (2,3), \cdots$

定式化 → $y = ax + b$

ご清聴ありがとうございました