

## 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)

### Examination of ADC histogram test time reduction method

Yujie Zhao\*, Yuanyang Du, Yuki Ozawa, Yuto Sasaki,  
Anna Kuwana, Haruo Kobayashi, Takayuki Nakatani, Kazumi Hatayama (Gunma University)  
Keno Sato, Takashi Ishida, Toshiyuki Okamoto, Tamotsu Ichikawa (ROHM Co., Ltd.)

キーワード : ADC, ヒストグラム法, 半導体試験  
(Analog-to-Digital Converter, Histogram, Semiconductor Test)

### 1. はじめに

チップの量産出荷時, 1 ドルのチップのテスト時間の上限は, 1 秒程度までが妥当とされている。しかしながら, 高分解能低速 ADC の線形性の試験には, (a)低速サンプリング, (b)高分解能という理由から, 長時間を要する<sup>[1]</sup>。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。

ADC 線形性テストでは, ヒストグラム法がよく用いられる。高分解能低速 ADC では, すべてのデジタル出力コードに対して十分な数のサンプリングを行うには, きわめて長い時間がかかる。そこで, 必要な範囲 (特定のコード) のみヒストグラムを集中することでテスト時間を短縮できる。これまでに, 以下二つのアプローチを提案してきた。それぞれ第 3 節で簡単に説明する。

- (1) サンプリングクロックの周波数と, 入力信号の初期位相を調整する方法<sup>[2]</sup>
- (2) 複数の正弦波を合成する方法<sup>[3]</sup>

本論文では(2)のアプローチに対して, より汎用的なアルゴリズムの作成を目指す。

### 2. 正弦波ヒストグラム法

正弦波ヒストグラム法では, 図 1 のように入力正弦波のサンプルを取り, 出力値に対応するデジタルコードを記憶する。そして, 図 2 のように各コードの発生度数を, コードの関数としてプロットする。低歪の純粋な正弦波はアナログフィルタを用いると比較的容易に作成できるのがメリットである<sup>[4]</sup>。しかし, 図 2 のようにコードの両端にヒストグラムが集中するため, コード中央のテストを行うのに時間

がかかるというデメリットがある。第 1 節で述べたように, AD 変換器の構成に応じた非線形性が生じやすい特定のコード近辺にヒストグラムを集中することができれば, このデメリットを解消することができる。

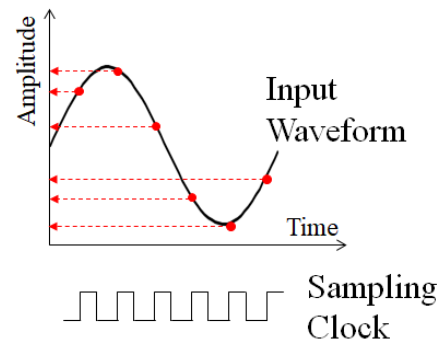


図 1 ヒストグラムの作成方法  
Fig. 1. Creation of histogram.

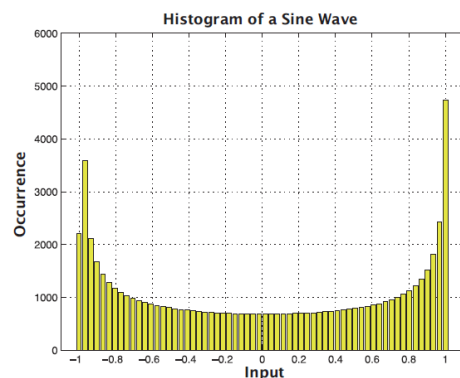


図 2 正弦波ヒストグラムの例  
Fig. 2. Sine wave histogram example.

### 3. 特定コードにヒストグラムを集中させる

#### 〈3-1〉 サンプリングクロックの周波数と、入力信号の初期位相を調整する方法

ランダムサンプリングは、入力信号と非同期なサンプリングクロックを使用する。入力信号が周期的で、位相ゼロからの各サンプリング時間が既知である場合、十分なサンプルを取得すると1周期の波形を再構築することができる。入力信号が正弦波の場合の例を、図3に示す。 $f_{CLK}$ と $f_{sig}$ の関係によって、入力信号波形の収集効率に差がでる。佐々木らは、高効率に波形を収集できる $f_{CLK}$ と $f_{sig}$ の周波数値の「黄金比」の関係を明らかにした<sup>[5]</sup>。

逆に、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。図4にいくつかの例を示し、 $f_{CLK} \cdot f_{sig} \cdot \theta$ の関係を考える。縦軸はサンプリングされたデータの数を表し、横軸はデジタル出力コードを表す。サンプル点の数はすべての図において10,000である。

図4(a)は「黄金比」を用いたサンプリング例で、すべてのコードに平均的にヒストグラムが分布する。図4(b)(c)(d)は、特定の二箇所ヒストグラムが集中する例である。 $\theta$ を変更することで、集中させる位置を制御することができる。図4(e)(f)(g)は、特定の一箇所ヒストグラムが集中する例である。

以上のように、本手法では入力正弦波の周波数( $f_{sig}$ )に対するサンプリング周波数( $f_{CLK}$ )を調整することでヒストグラムの集中度を、入力正弦波の初期位相 $\theta$ を制御することでヒストグラムを集中させる位置を調整する。しかし、実装にあたって、初期位相 $\theta$ を自由に制御することが難しいという問題がある。

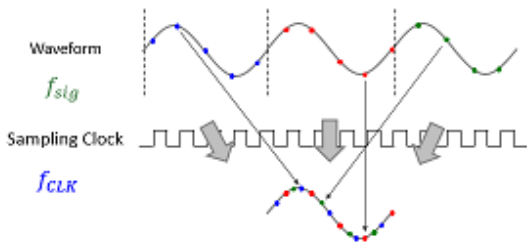
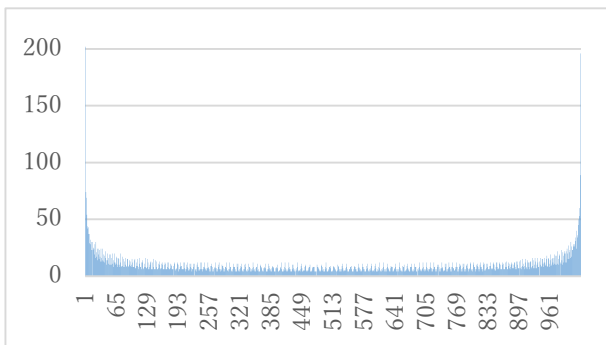
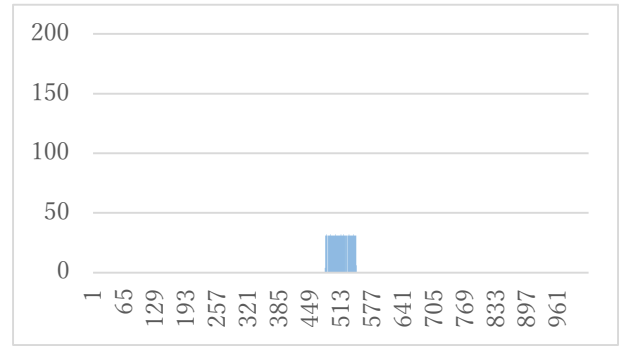


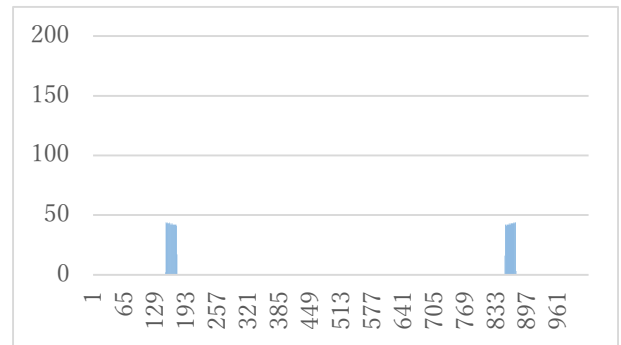
図3 ランダムサンプリング  
Fig. 3. Random sampling.



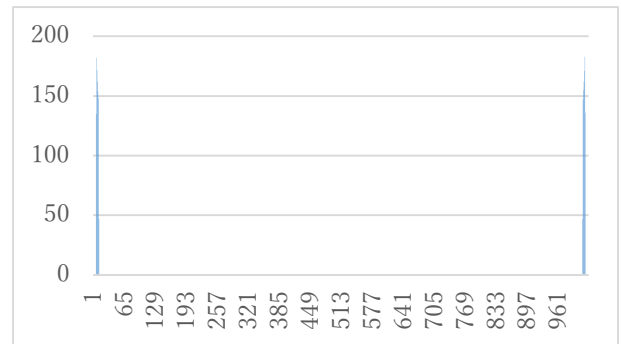
(a) 「黄金比」を利用



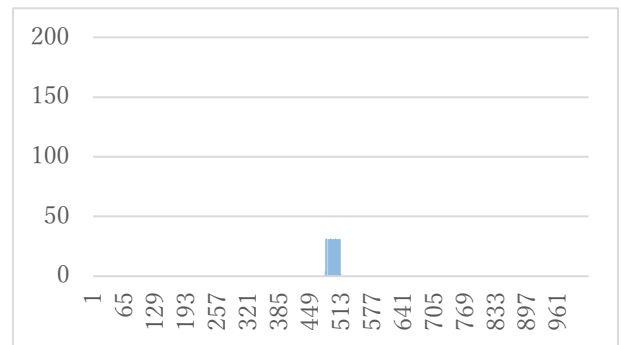
(b)  $f_{CLK} = f_{sig} \times \frac{2 \times (1 + 1000000)}{1000000}$   $\theta = 0$



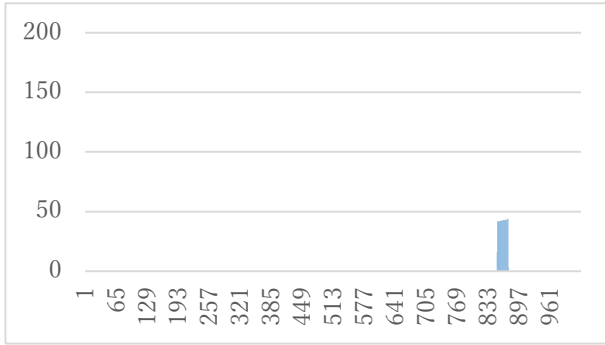
(c)  $f_{CLK} = f_{sig} \times \frac{2 \times (1 + 1000000)}{1000000}$   $\theta = \pi/2 \times 0.5$



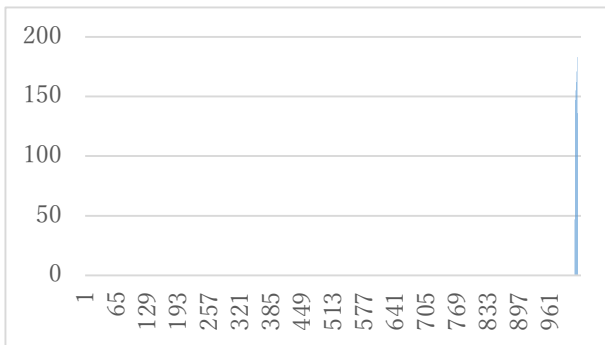
(d)  $f_{CLK} = f_{sig} \times \frac{2 \times (1 + 1000000)}{1000000}$   $\theta = \pi/2 \times 0.9$



(e)  $f_{CLK} = f_{sig} \times \frac{1 + 1000000}{1000000}$   $\theta = 0$



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



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

図4  $f_{CLK} \cdot f_{sig} \cdot \theta$  の関係とヒストグラムの例

Fig. 4. Relationship of  $f_{CLK} \cdot f_{sig} \cdot \theta$  and Histogram Example.

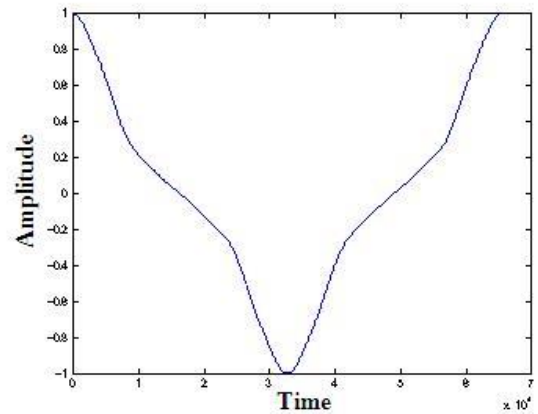
### 〈3・2〉 複数の正弦波を合成する方法

先行研究<sup>[3]</sup>では、式(1)のように正弦波を合成することで、図5(a)のような形状の三角波を作成した。図5(a)を入力波とすると、ヒストグラムは図5(b)のようになり、Output Code 1500~2500 付近にコードを集中することができる。

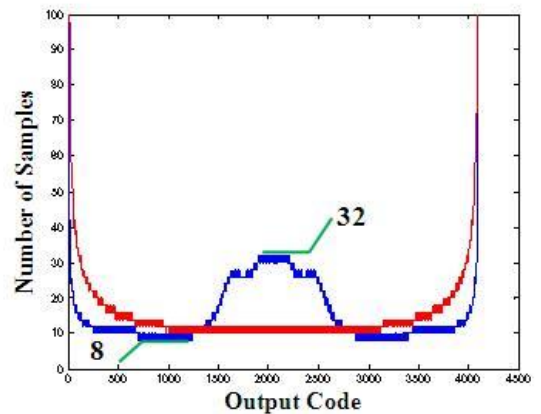
$$f(t) = A(W_1 + 2.6 \cdot W_2 + 1.8 \cdot W_3 + 1.4 \cdot W_6 + 1.2 \cdot W_7) + V_{OS}$$

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

先行研究では、式(1)の係数を試行錯誤の末に決定していた。本研究では、 $f(t)$ を機械的に決定するためのアルゴリズムの作成を目指す。



(a) 式(1)により生成される信号 $f(t)$



(b) ヒストグラム (赤線: 正弦波を入力信号とした場合, 青線: (a)を入力波とした場合)

図5 複数の正弦波を合成する方法

Fig.5. Combined multiple sine waves.

## 4. 汎用的なアルゴリズム生成

### 〈4・1〉 定式化アルゴリズム

最終目標は、テストしたいコードにのみヒストグラムを集中させることである。言い換えると、図6のように入力関数を $x = f(t)$ 、ヒストグラムの形状を $H(\text{code}(x))$ とするならば、「任意の $H(\text{code}(x))$ を作成する $f(t)$ を得る」ことである。

本研究ではその第一段階として、ヒストグラムの形状 $H(\text{code}(x))$ を、入力関数 $f(t)$ から数学的に求めるアルゴリズムを考案し、簡単な関数に対して検証を行った。

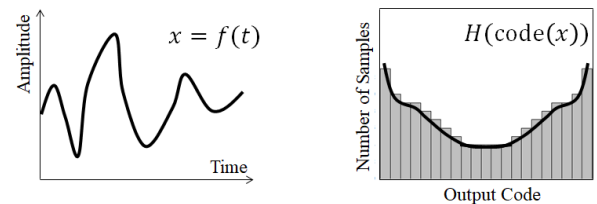


図6 入力波とヒストグラム形状の関係

Fig. 6. Relationship between input wave and histogram shape.

幾何学的に、あるコードcode( $x_i$ )におけるヒストグラム  
の傾き $\frac{\Delta H(\text{code}(x_i))}{\Delta \text{code}(x_i)}$ 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。この考えを元に、アルゴリズムを  
作成する。

ヒストグラムを数学的に得る方法として、次の2つを提  
案する。

アルゴリズム1 (逆関数 $f^{-1}(x)$ を使う) :

$$H(\text{code}(x_i)) = \left. \frac{df^{-1}(x)}{dx} \right|_{x=x_i} - H(\text{code}(x_{i-1})) \dots (2)$$

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) :

$$H(\text{code}(x_i)) = 1/\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_i} \times \Delta x_i \dots (3)$$

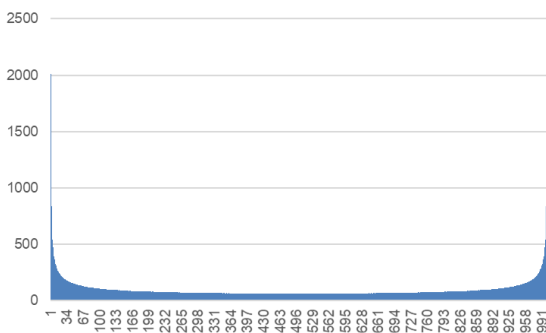
入力関数の逆関数が得られる場合、アルゴリズム1の方が  
正確にヒストグラムの形状を算出できる。しかし、逆関数が  
数学的に得られない場合、アルゴリズム2を使う必要があ  
る。

#### 〈4.2〉検証

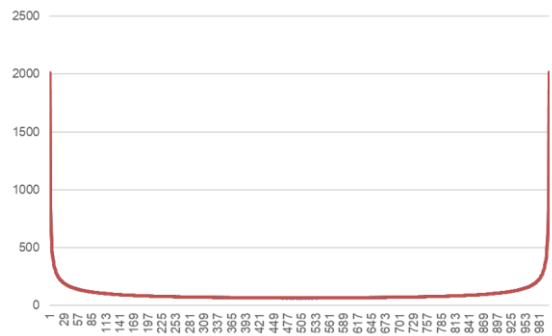
入力関数 $f(t) = \sin 2\pi t$ に対して検証を行った。まず、第  
2章で述べた通常の方法で作成したヒストグラムを図7(a)  
に示す。サンプル数は100,000である。これと、4.1節で述  
べた2つのアルゴリズムで得られるヒストグラムの形状を  
比較し、アルゴリズムの検証を行った。なお、比例定数は、  
アルゴリズム1・2ともに、 $\sum H(\text{code}(x_i)) = 100000$ となる  
ように決定した。

図7(b)(c)に、アルゴリズム1で作成したヒストグラムと  
図7(a)とを比較した結果を示す。図7(b)は、ヒストグラムを  
重ねて描画したもので、ヒストグラム形状がほぼ一致する  
ことを確認できた。図7(c)は(a)と(b)の差をとったもので、  
最大2.84%、平均0.77%程度のずれがある。

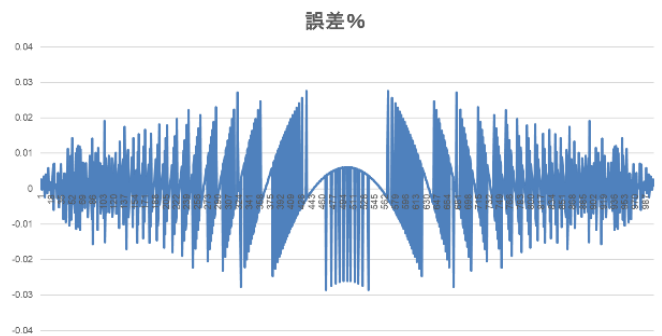
アルゴリズム2で作成したヒストグラムは、紙面の都合  
上、図示は割愛する。図7(a)との差をとると、最大3.48%、  
平均0.88%程度のずれが出た。



(a) 通常の方法で得られるヒストグラム (比較用)



(b) アルゴリズム1で作成したヒストグラムと(a)の比較



(c) アルゴリズム1で作成したヒストグラムと(a)の差

図7 シミュレーション検証

Fig. 7. Simulation verification.

## 5. まとめ

本論文では、任意形状のヒストグラムを作成する入力関  
数を得るためのアルゴリズムの作成の第一段階として、ヒ  
ストグラムの形状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。単一の正弦波に対して検証を行い、  
導出アルゴリズムの妥当性を示す良い結果を得た。

## 文 献

- (1) Gordon Roberts, Friedrich Taenzler, Mark Burns, "An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering)", Oxford Univ Press, (2011).
- (2) Yujie Zhao, Yuto Sasaki, Yuki Ozawa, Riho Aoki, Anna Kuwana and Haruo Kobayashi, "ADC Histogram Test for Specific Codes", 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, (Dec. 2018).
- (3) 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).
- (4) Franco Maloberti, Data Converter, Dordrecht, The Netherlands, Springer, P409-416 (2007)
- (5) 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)