

積分型時間デジタイザ回路と サンプリングクロックの検討

佐々木優斗、小林春夫

群馬大学 理工学部 電子情報理工学科

小林研究室 学部4年

佐々木 優斗

t14304053@gunma-u.ac.jp

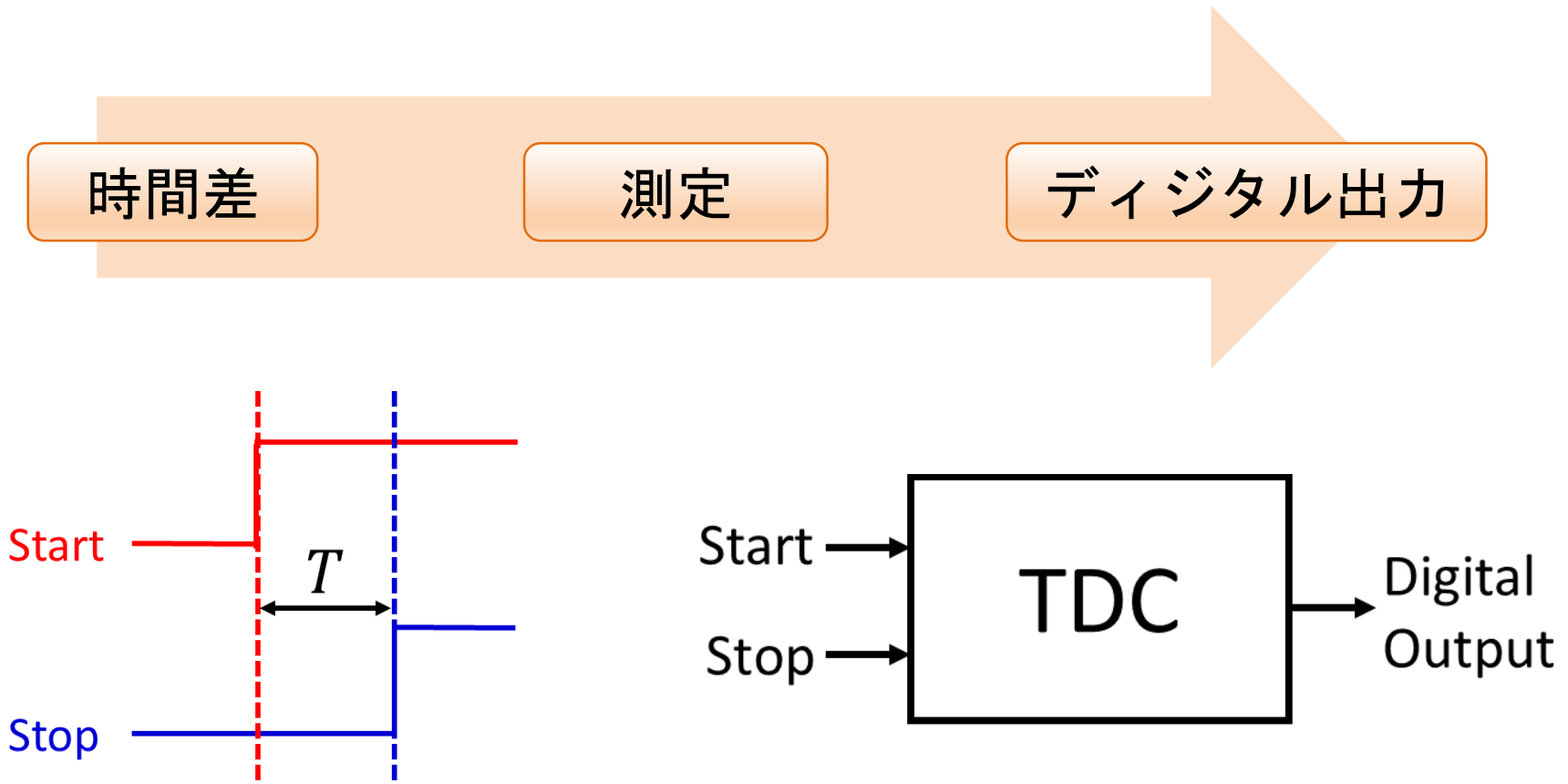
アウトライン

- 研究目的
- 積分型時間デジタイザ回路
- 効率的波形取得サンプリング周波数
- シミュレーションによる検証
- まとめと課題

アウトライン

- 研究目的
- 積分型時間デジタイザ回路
- 効率的波形取得サンプリング周波数
- シミュレーションによる検証
- まとめと課題

時間デジタイザ回路の役割



時間デジタイザ回路 (Time-to-Digital Converter、TDC) ;
タイミング信号の時間差を測定しデジタル出力

具体的な応用例



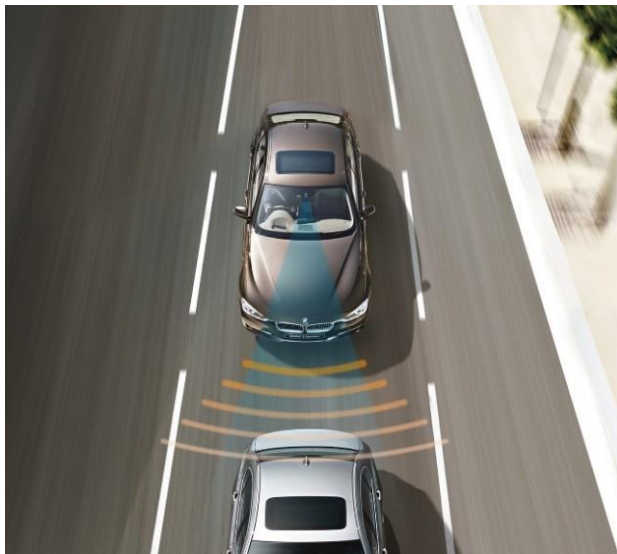
SIEMENS CO.,LTD.

放射線計測器

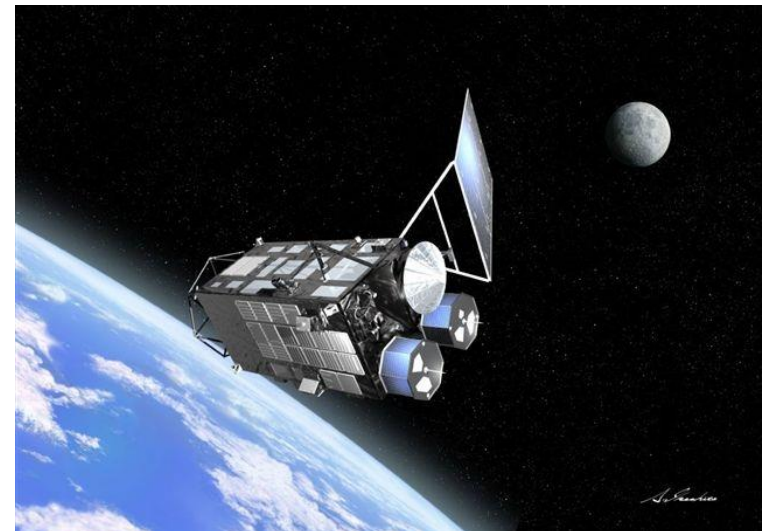
車間等の距離計測

イオン飛行時間分析

時間領域ADC 等



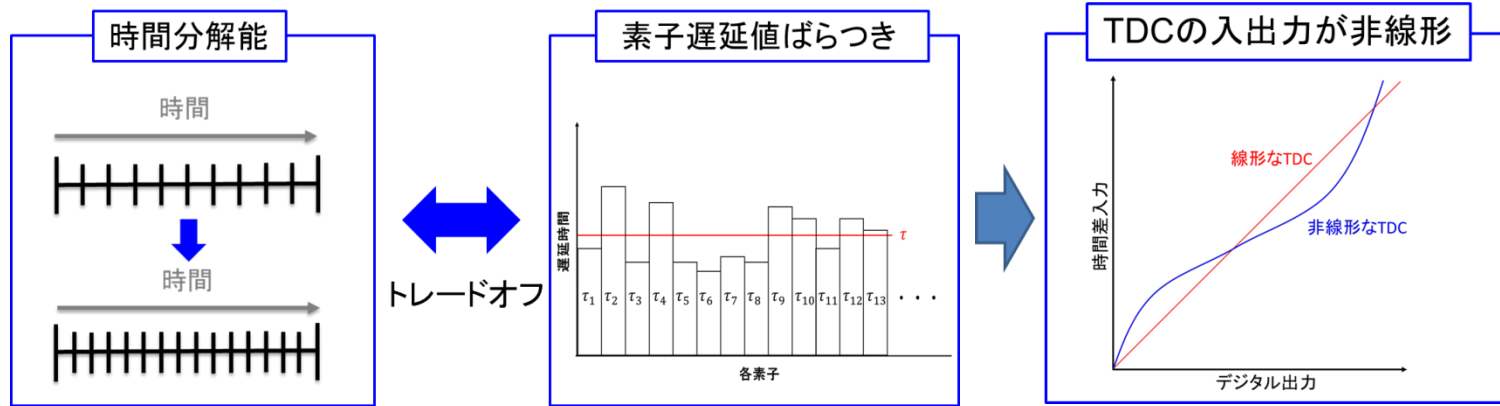
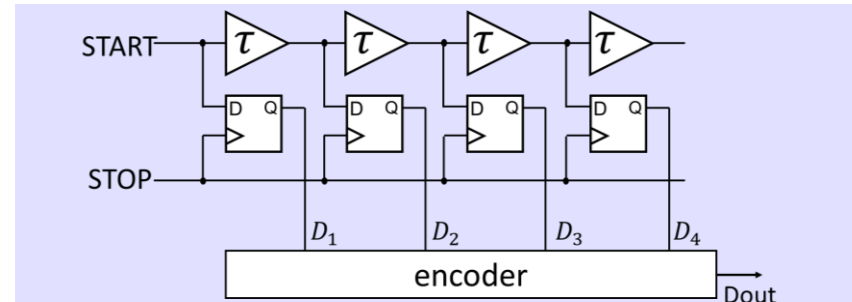
BMW AG CO.,LTD.



JAXA Digital Archives

研究目的

基本フラッシュ型TDC



TDC特性 → 線形に校正必要

校正不要で線形な細かい時間分解能のTDC

アウトライン

- 研究目的
- 積分型時間デジタイザ回路
- 効率的波形取得サンプリング周波数
- シミュレーションによる検証
- まとめと課題

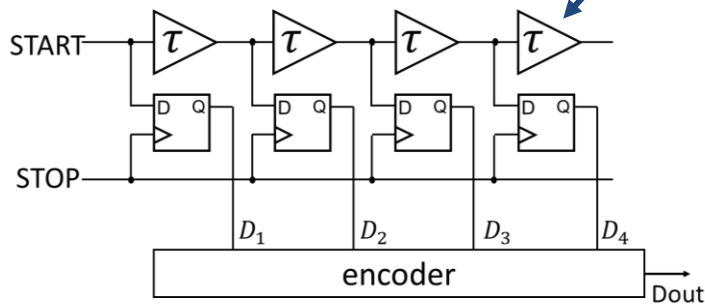
従来のTDCとの比較

遅延素子

プロセス, 温度, 電源電圧変動

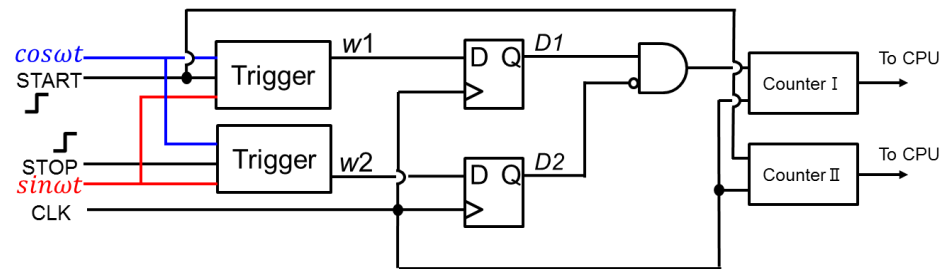
影響大

あり



従来のTDC

なし



提案TDC

積分型時間デジタイザ回路の特徴

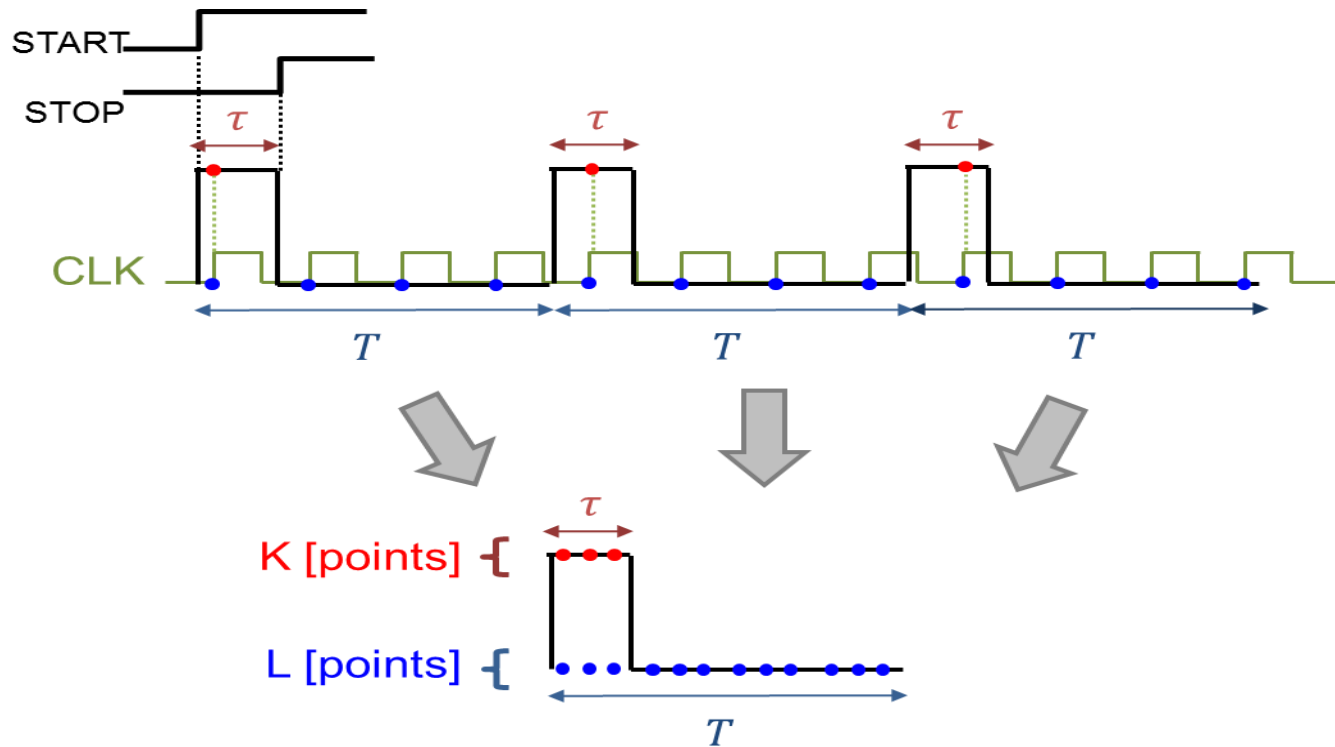
長所

- 遅延線なし → プロセス・温度・電源電圧変動 影響小
- 測定時間 長 → 時間分解能 細
- 線形性を自己校正なしで確保
- 時間の絶対値を自己校正なしで測定

短所

- トリガ回路 → アナログ回路必要
- 非同期発振回路2つ必要
- インジェクションロッキングに注意

積分型時間デジタイザ回路の原理

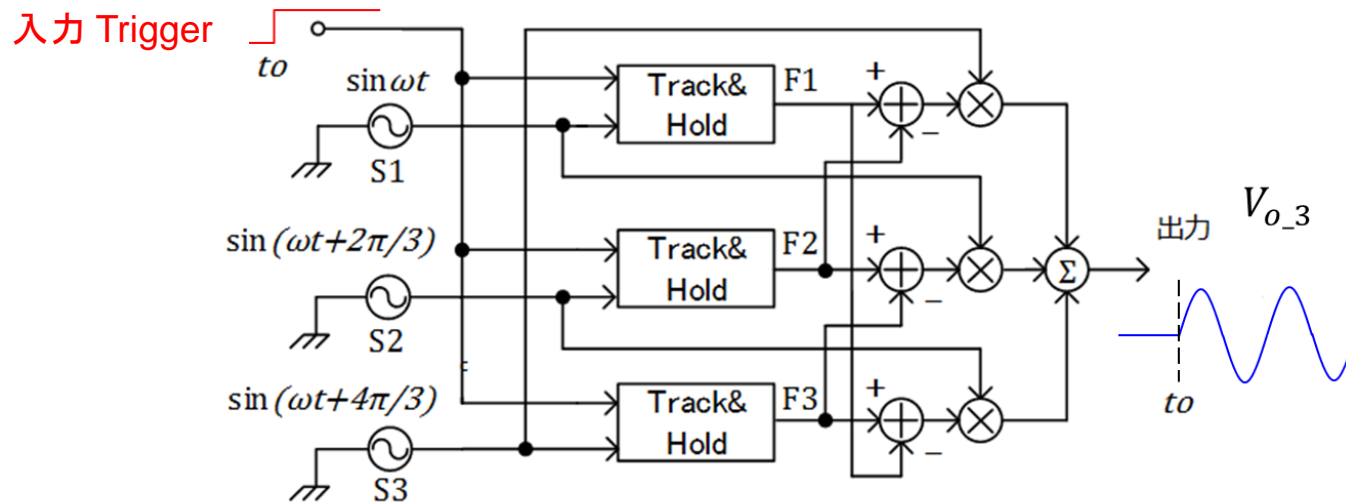
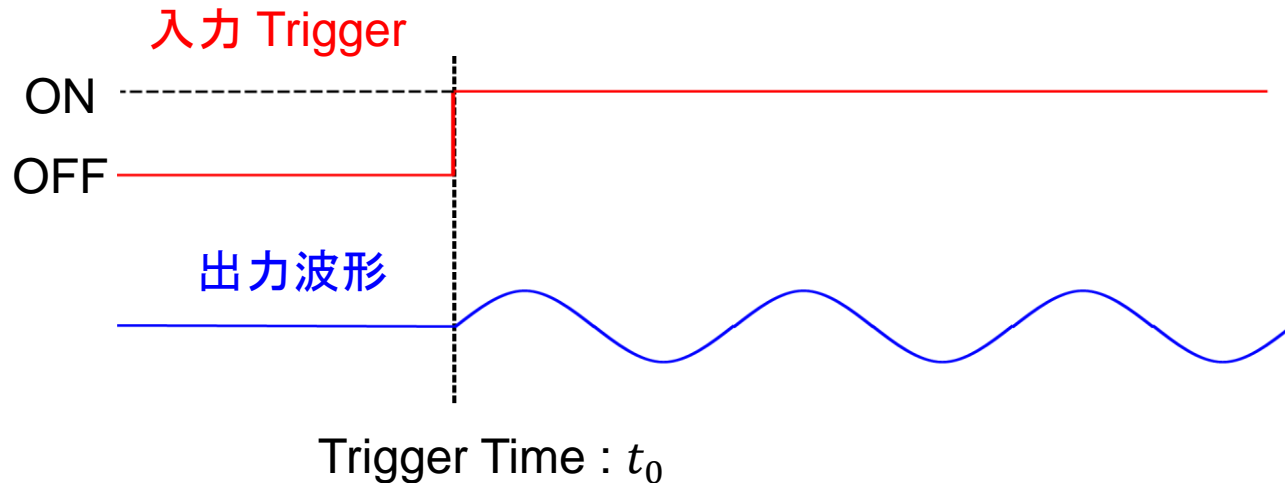


モンテカルロ法

非同期的なCLKで時間差波形を繰り返しサンプリング

$$\frac{K}{L} = \frac{\text{入力時間差 } \tau}{\text{基準周期 } T}$$

オシロスコープ・トリガ回路

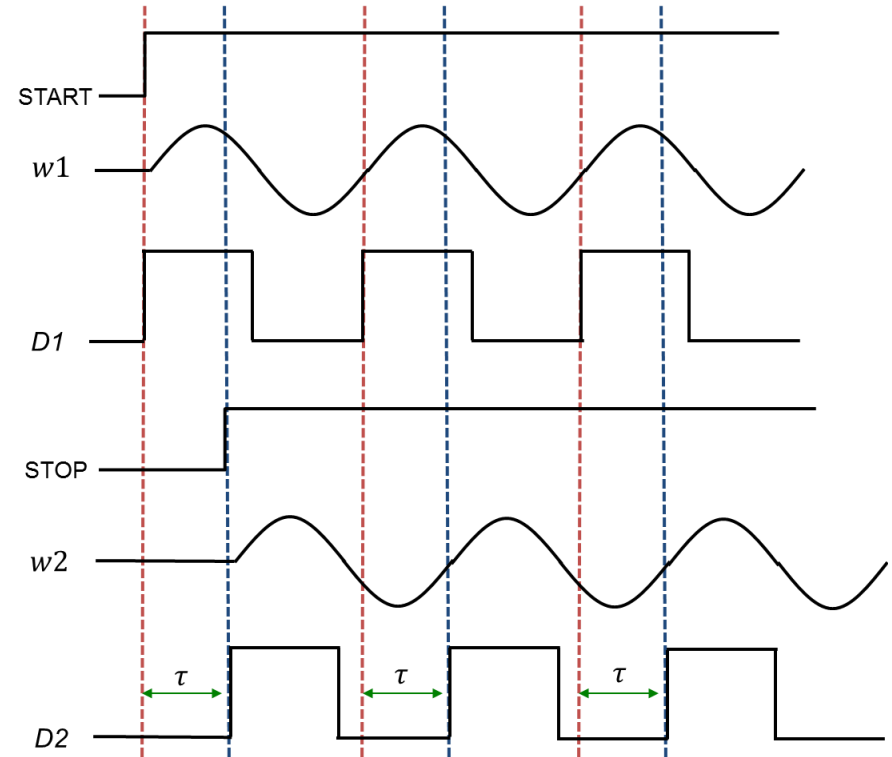


トリガ回路を用いた単発タイミング測定

Start、Stop信号を入力



入力のタイミングから
位相0で発振を開始

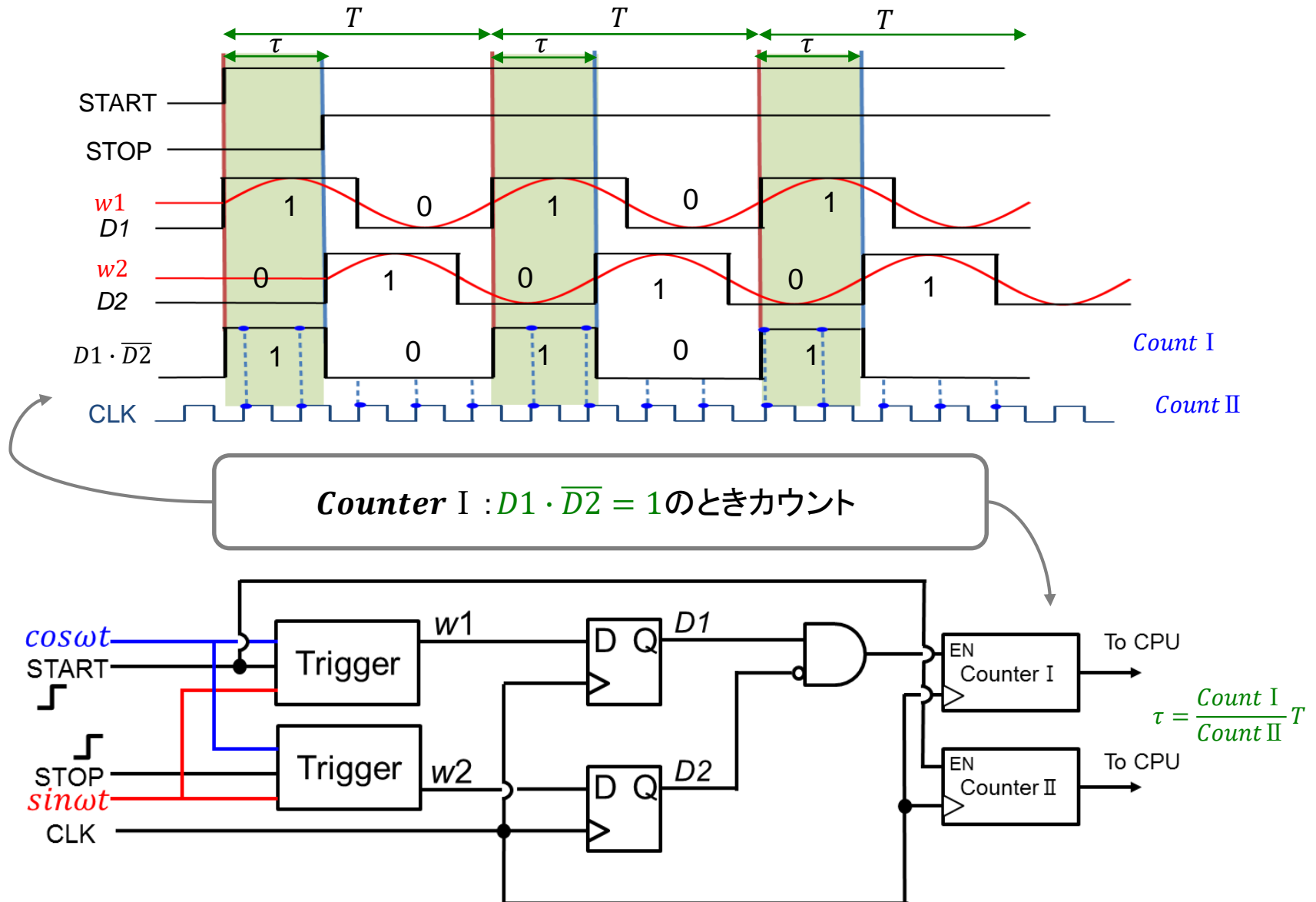


二つのトリガ回路を使用



入力時間差を保持

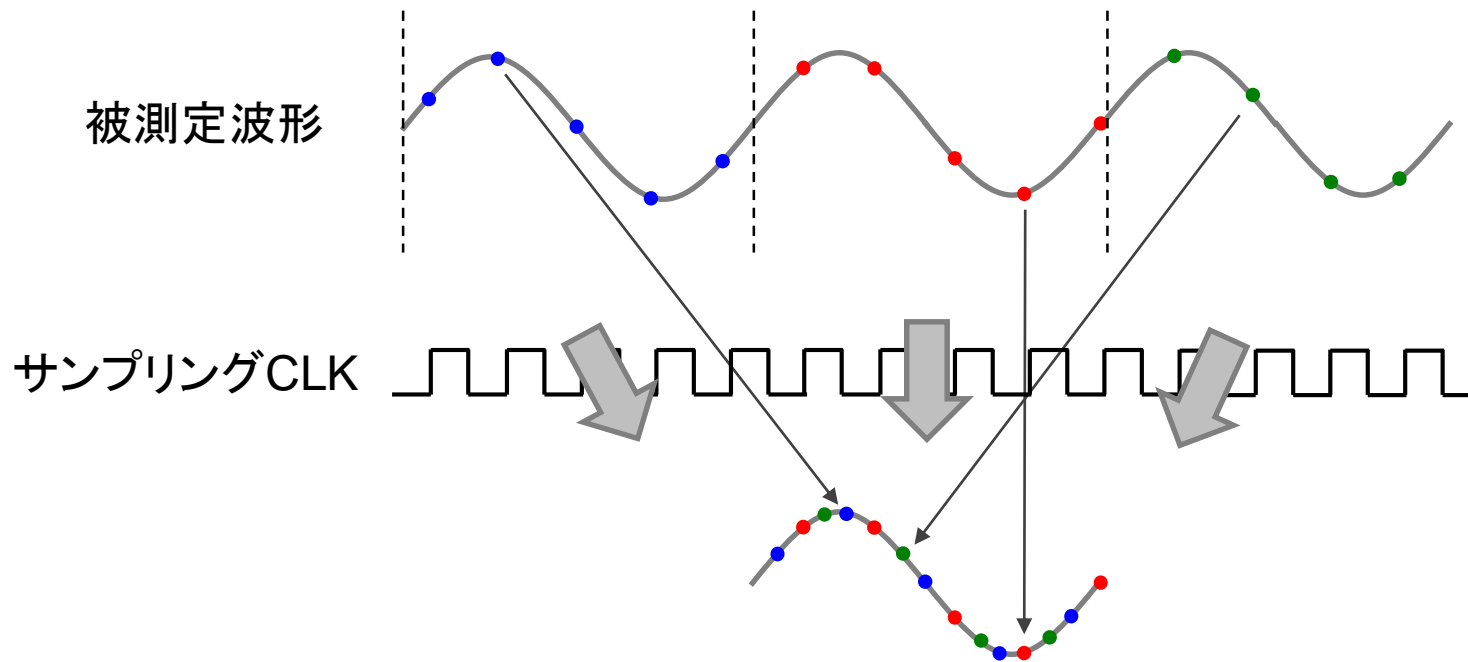
積分型デジタイザ回路の構成と動作



アウトライン

- 研究目的
- 積分型時間デジタイザ回路
- 効率的波形取得サンプリング周波数
- シミュレーションによる検証
- まとめと課題

等価時間サンプリングの原理



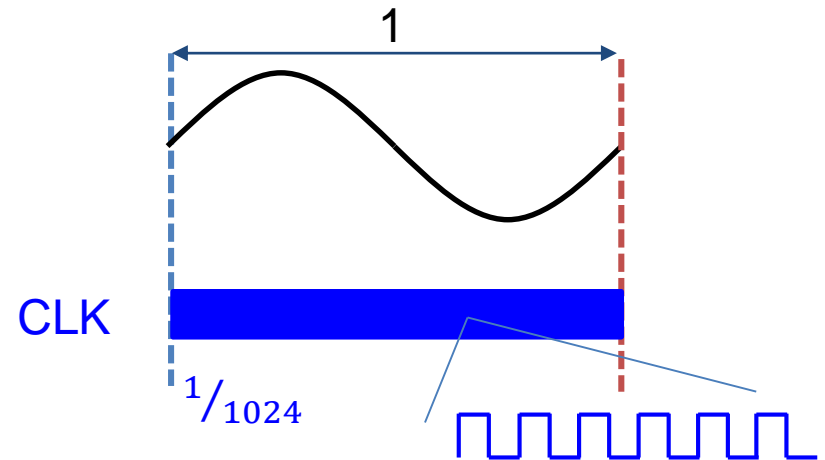
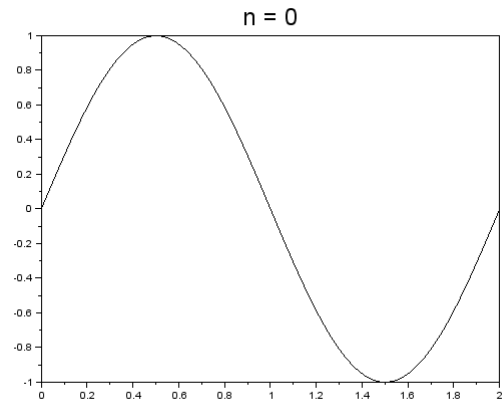
繰り返し波形を非同期CLKでサンプリング → 単波形を構成

波形抜け(1/3)

$$f_{CLK} \gg f_{sin}$$



位相が
少しずつしか
進まない



波形抜けが発生

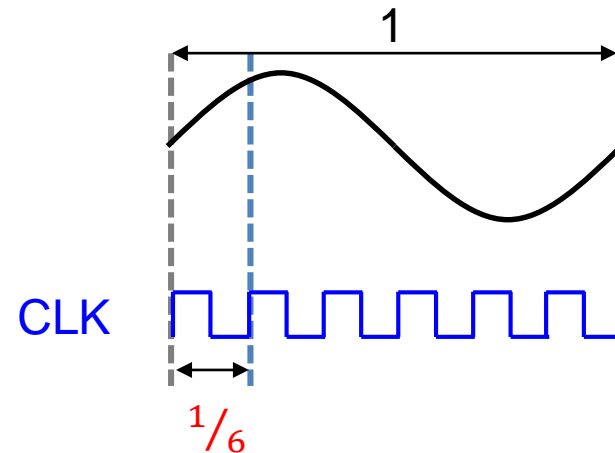
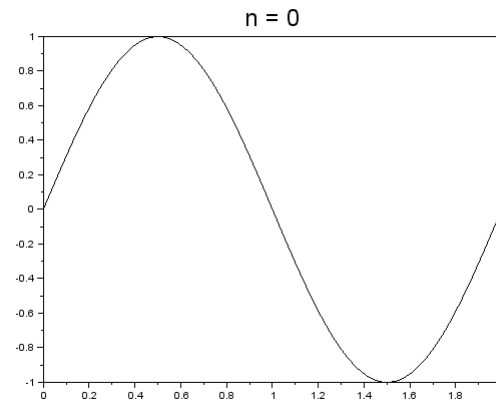
波形抜け(2/3)

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

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



周期毎に位相が
あまりずれない



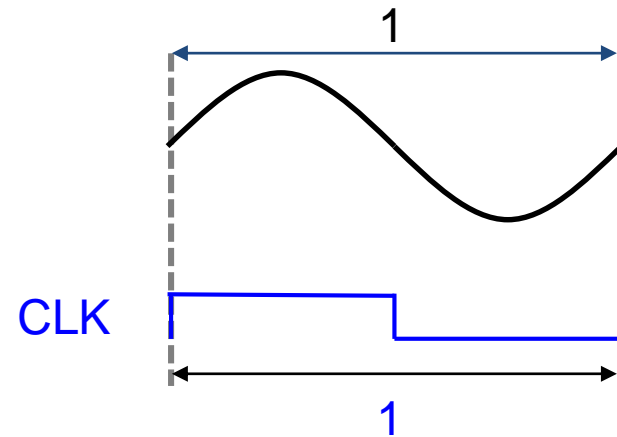
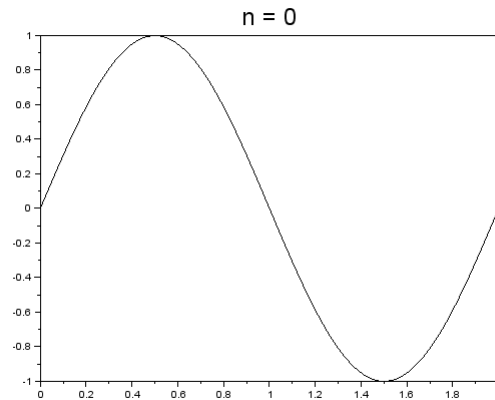
波形抜けが発生

波形抜け(3/3)

$$f_{CLK} \approx f_{sin}$$



周期毎に位相が
あまりずれない



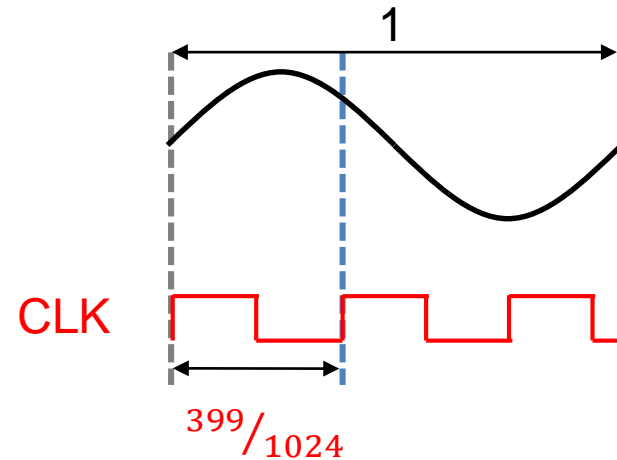
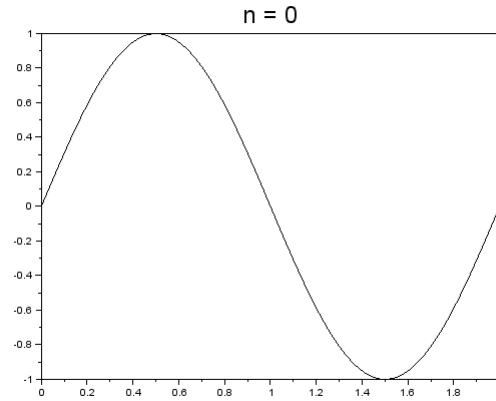
波形抜けが発生

効率的波形取得

適切なCLK



周期毎に位相が
少しずつずれたデータ



波形抜けなし

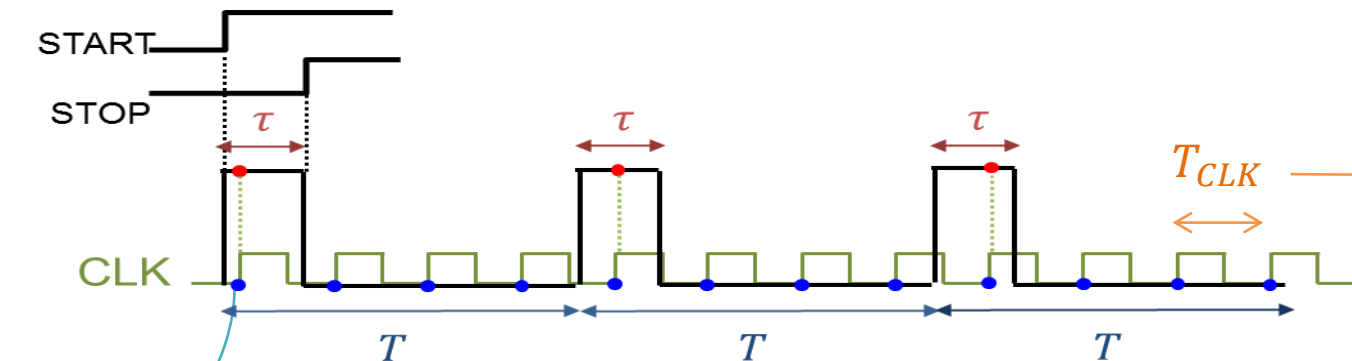
アウトライン

- 研究目的
- 積分型時間デジタイザ回路
- 効率的波形取得サンプリング周波数
- シミュレーションによる検証
- まとめと課題

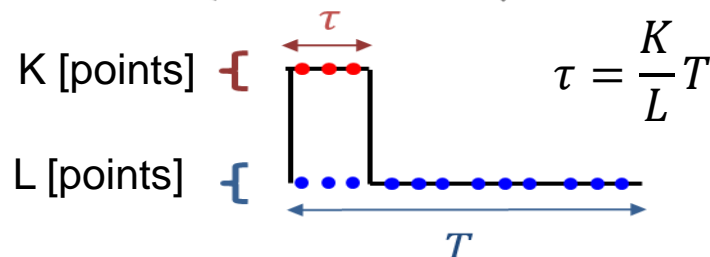
シミュレーション条件

Scilabによる数値シミュレーション

正弦波の周期 T	: 2 [ns]
入力時間差 τ	: 0 ~ 1 [ns] (256 [points])
サンプリング周期 T_{CLK}	: $(M/1024) \times 2$ [ns]
サンプリング開始点	: $T_{CLK}/2$ [ns]



$$\frac{T_{CLK}}{2}$$



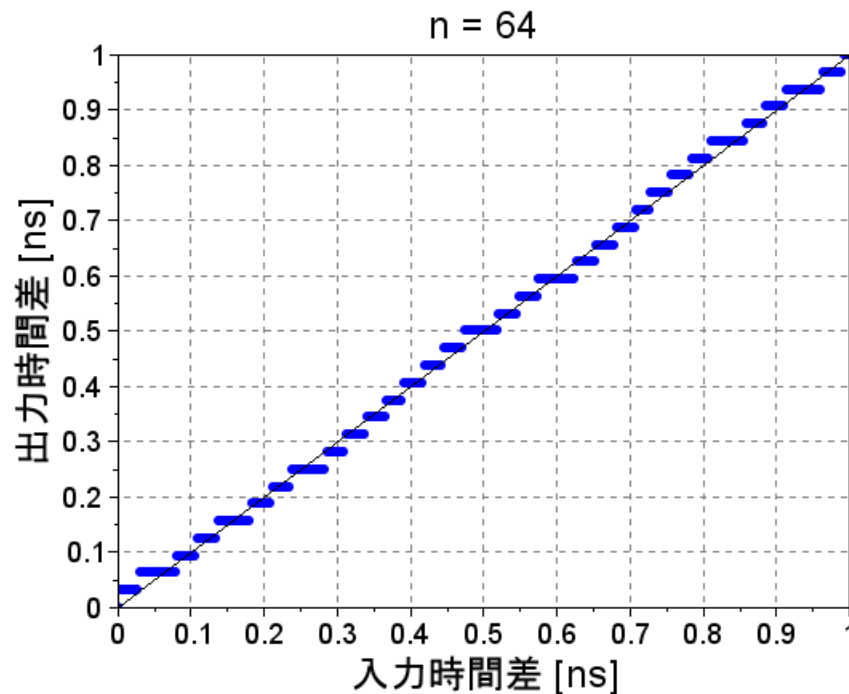
$$T_{CLK} = \frac{M}{N} \times T$$

(NとMは互いに素)

積分型時間デジタイザ回路の出力

波形抜けのないクロック

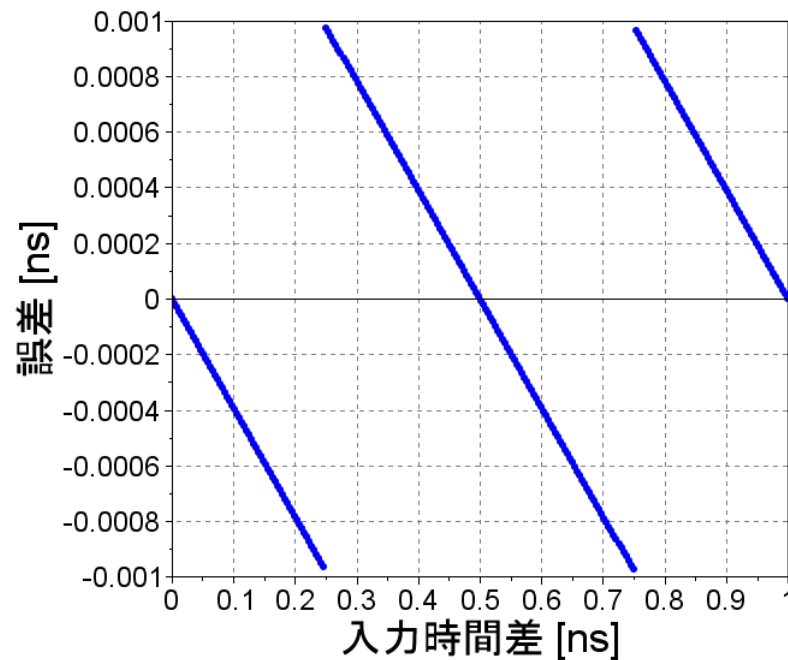
$$f_{CLK} = \frac{1024}{399} \times f_{sin}$$



測定時間をかけるほど細かい時間分解能

積分型時間デジタイザ回路の誤差

測定点数 1024 [points]



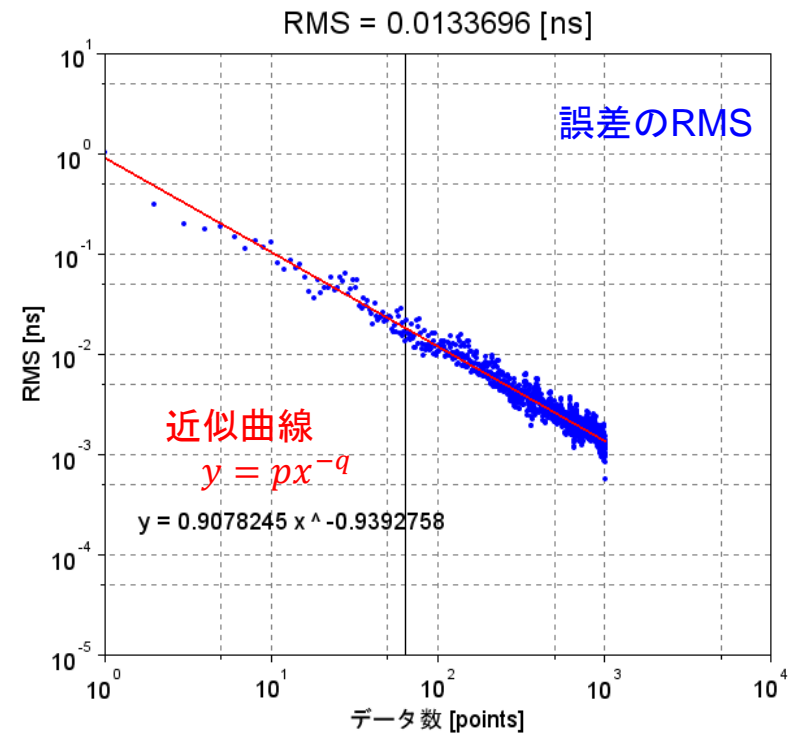
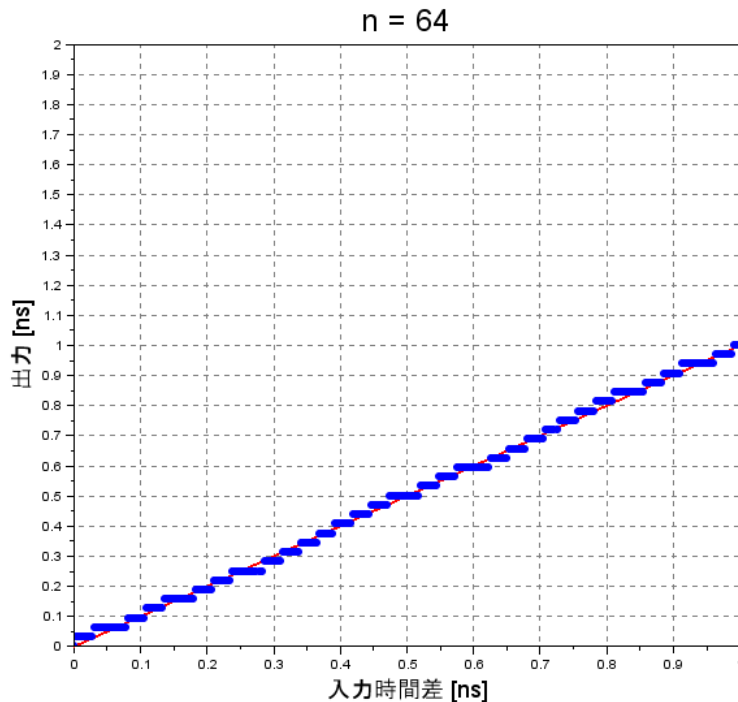
量子化誤差

誤差のRMS 約0.56 [ps] ↔ 時間差間隔 約3.92 [ps]

誤差のRMSの推移(1/4)

波形抜けのないクロック

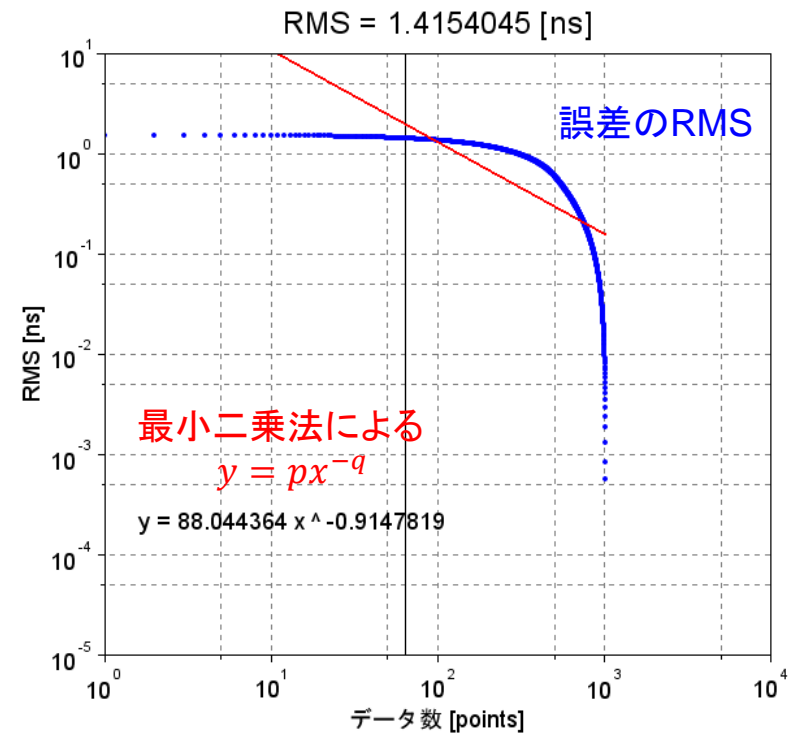
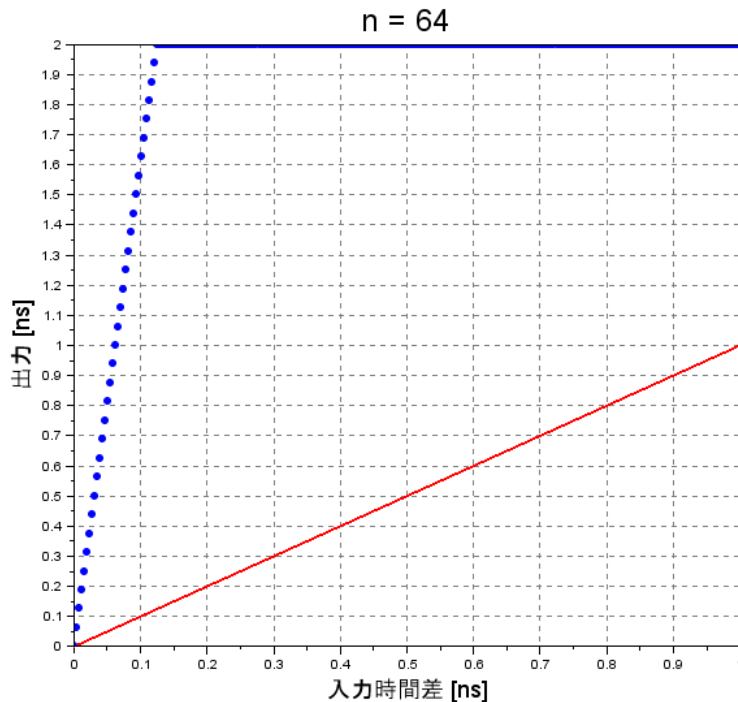
$$f_{CLK} = \frac{1024}{399} \times f_{sin}$$



誤差のRMSの推移(2/4)

$$f_{CLK} \gg f_{sin}$$

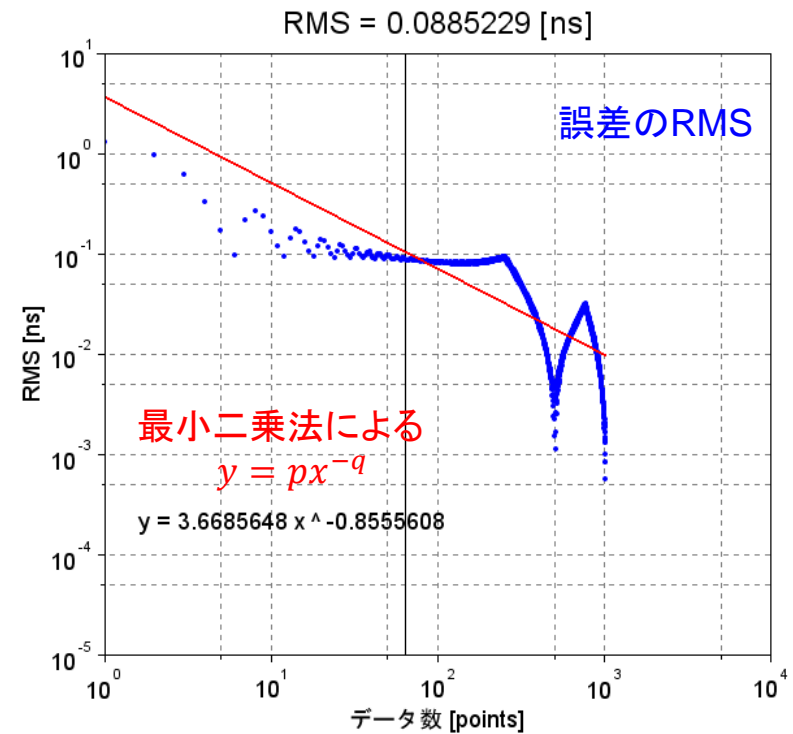
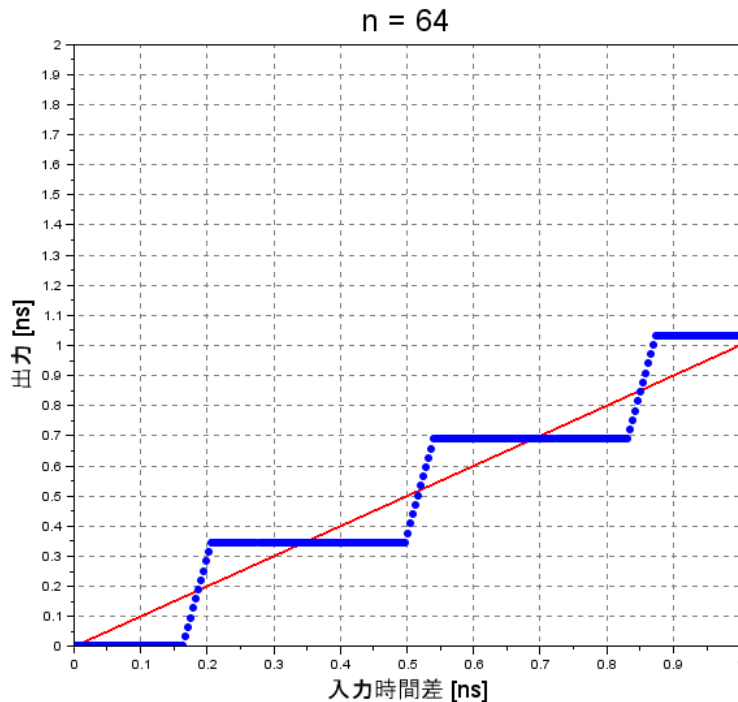
$$f_{CLK} = 1024 \times f_{sin}$$



誤差のRMSの推移 (3/4)

$$f_{CLK} \approx 6 \times f_{sin}$$

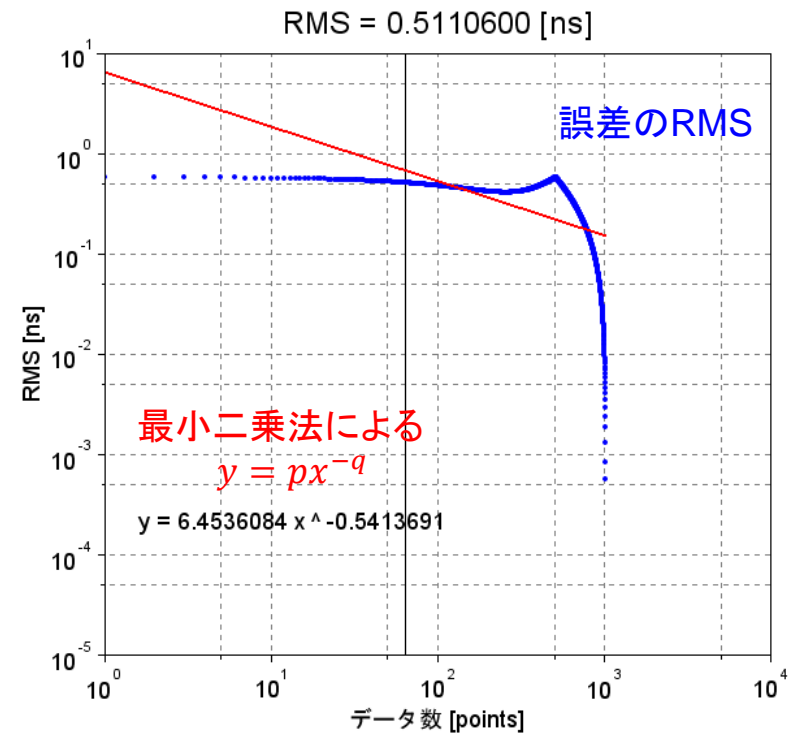
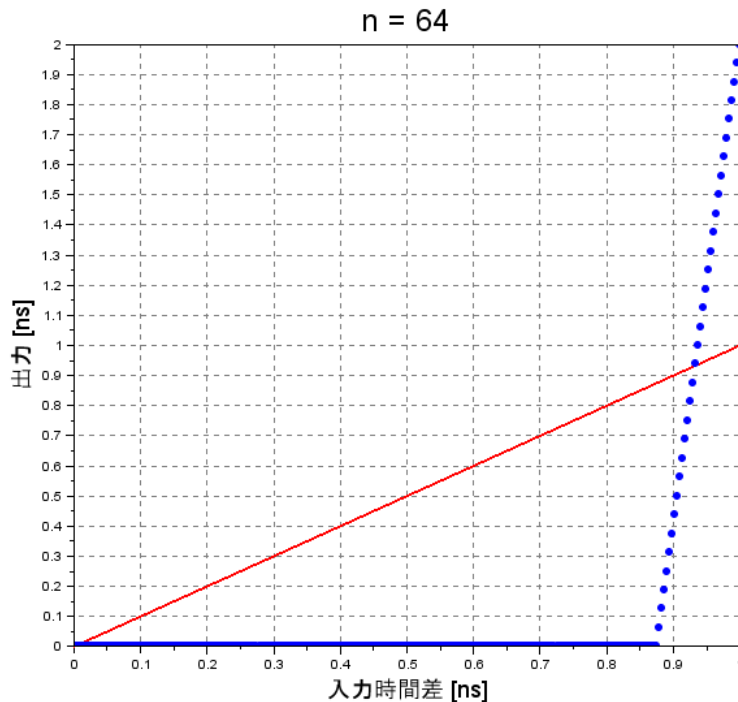
$$f_{CLK} = \frac{1024}{171} \times f_{sin}$$



誤差のRMSの推移 (4/4)

$$f_{CLK} \approx f_{sin}$$

$$f_{CLK} = \frac{1024}{1023} \times f_{sin}$$



ランダムクロックの場合

乱数クロック

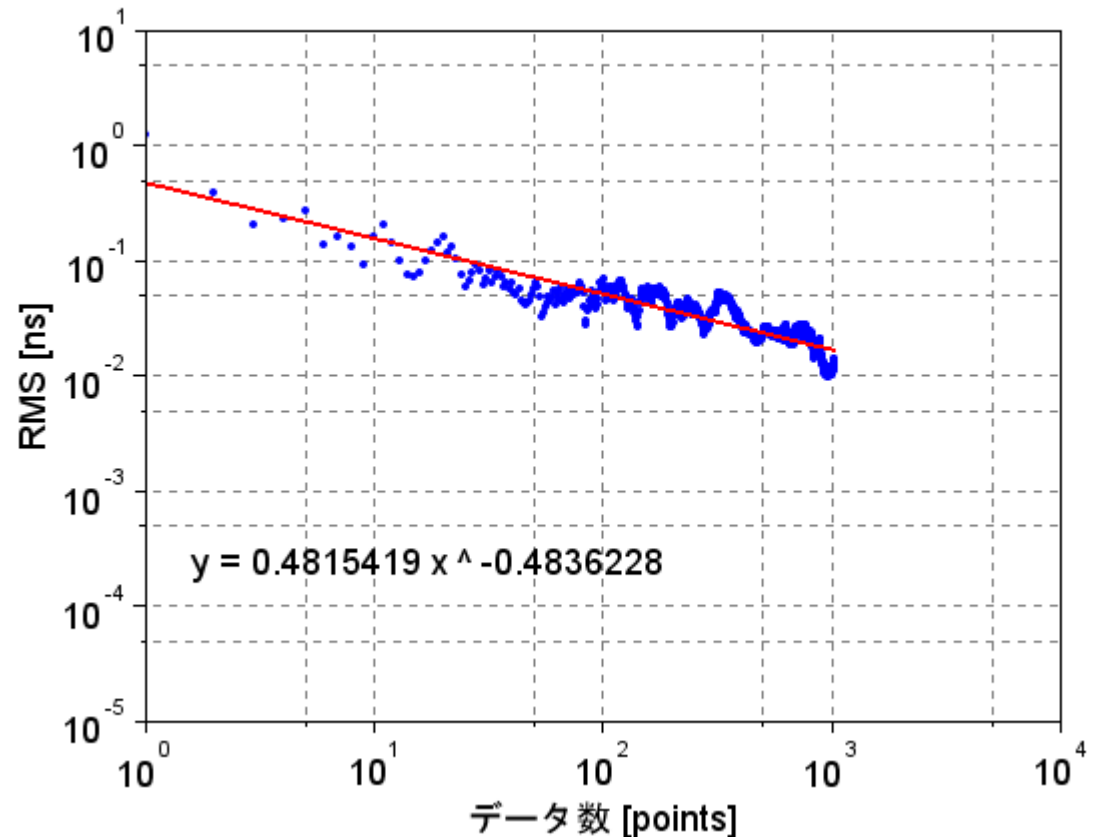
T_{sin} の範囲で
サンプリング点を
乱数で生成



近似曲線

傾き 小

分散 小



分散小 → ランダム

傾き大 → 均一

Mの値と近似曲線からの分散

$$T_{CLK} = \frac{M}{1024} T$$

$$\approx \frac{1}{6} T$$

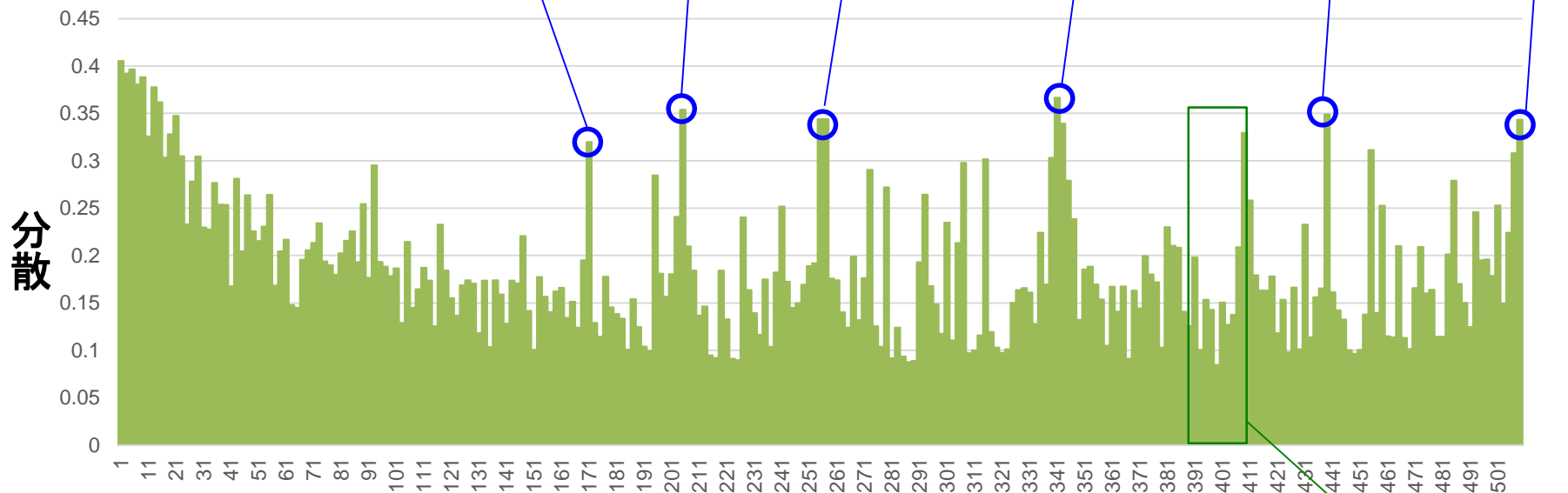
$$\approx \frac{1}{5} T$$

$$\approx \frac{1}{4} T$$

$$\approx \frac{1}{3} T$$

$$\approx \frac{3}{7} T$$

$$\approx \frac{1}{2} T$$



$$(1 - 0.3896484)$$

$$= 0.6103516$$

黄金比 ?

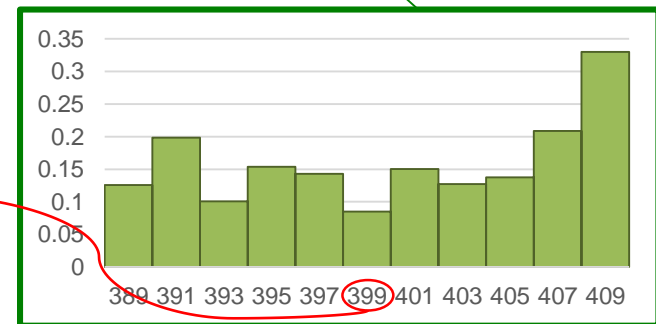
M



$$\frac{399}{1024} T$$

(= 0.3896484T)

best RMS
when N = 1024



黄金比クロックの場合(1/2)

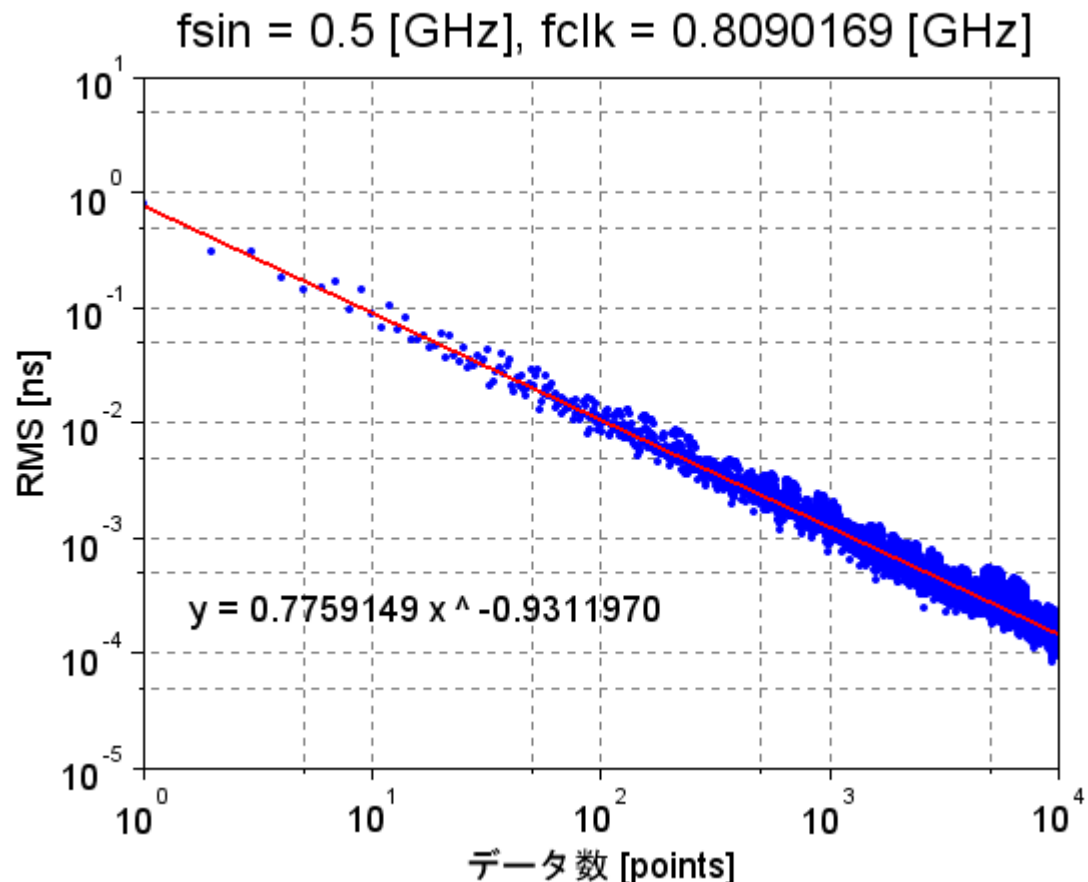
黄金比

1 : 1.6180339



傾き 大
分散 小

効率的
波形取得



効率良 & 最大計測可能点数大

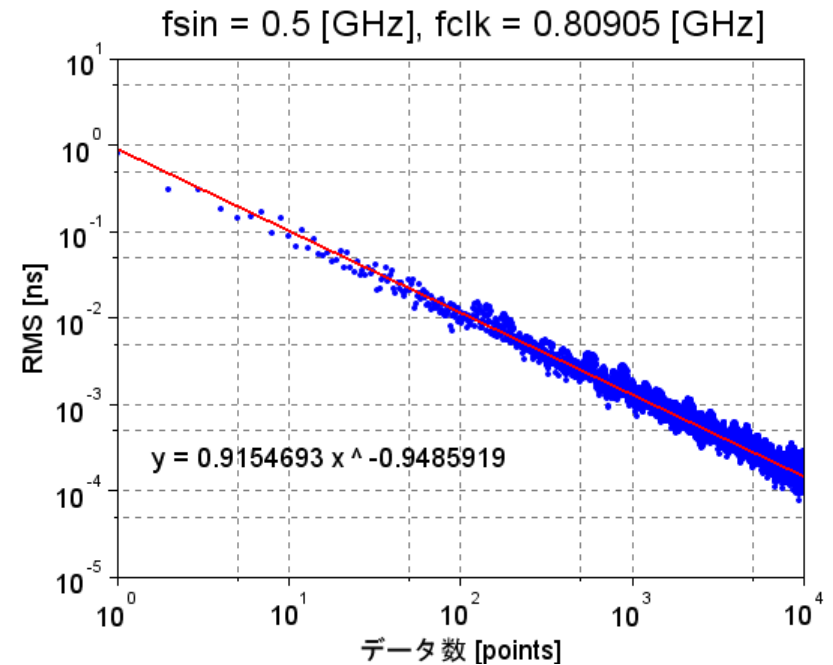
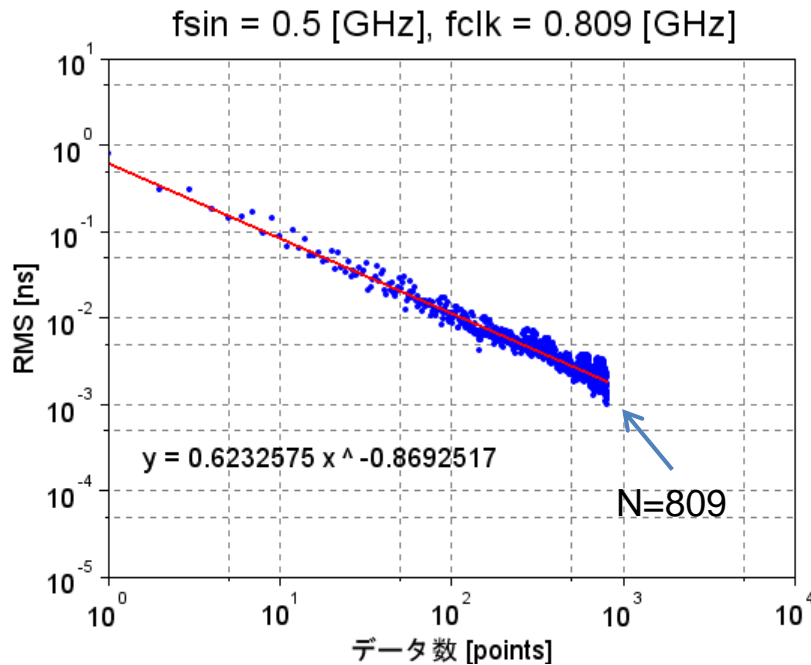
黄金比クロックの場合(2/2)

黄金比

1 : 1.6180339

相対誤差 0.02%

相対誤差 0.04%



1 : 1.618

1桁増

測定点数増

1 : 1.6181

アウトライン

- 研究目的
- 積分型時間デジタイザ回路
- 効率的波形取得サンプリング周波数
- シミュレーションによる検証
- **まとめと課題**

まとめ

- ✓ 遅延素子を用いない積分型時間デジタイザ回路を提案
- ✓ 測定時間をかけるほど時間分解能向上
- ✓ 効率的波形取得サンプリング周波数を検討
- ✓ 被測定波形とサンプリング周波数の比を黄金比にすると効率的にサンプリングできることを発見

今後の課題

- 回路レベルでのシミュレーションおよび
試作・実機検証



質疑応答

- 不明な周波数を測定するのにどうやって黄金比にするのか？
 - 測定するのは周波数ではなく入力時間差。
内部で発振する基準波とサンプリング周波数を黄金比にして、外部から入力された時間差を測定する。
- サンプリングにはナイキスト周波数を考慮しているか？
 - 等価時間サンプリングなのでナイキスト周波数以下でも問題ない
- 黄金比を用いるとなぜ良い？
 - 今回はシミュレーションで結果が出ただけ。
今後黄金分割探索との近似性からアプローチしたいと思う。