

黄金比重み付け逐次比較近似 AD 変換器の比較器誤判定と デジタル出力値の関係

群馬大学 理工学部

電子情報理工学科

小辻澄人 荒船拓也

澁谷将平 新井宏崇 小林春夫

アウトライン

- 研究背景・概要
- 逐次比較近似 AD 変換器
- SARADC の冗長設計と補正能力
- フィボナッチ数列を用いた冗長設計
- 誤判定とデジタル出力値の関係
- まとめ

アウトライン

- 研究背景・概要
- 逐次比較近似 AD 変換器
- SARADC の冗長設計と補正能力
- フィボナッチ数列を用いた冗長設計
- 誤判定とデジタル出力値の関係
- まとめ

研究背景・概要

自動車に付加価値や競争力をつける
車載用エレクトロニクス技術に注目が集まる



著しい発展



車載用マイコンに組み合わせて利用する
AD変換器への要求が厳しい

研究目的

整数論を用いたAD変換器冗長性設計による
高性能化を目指す！

特にAD変換エラー時の補正力の定量化を検討

アウトライン

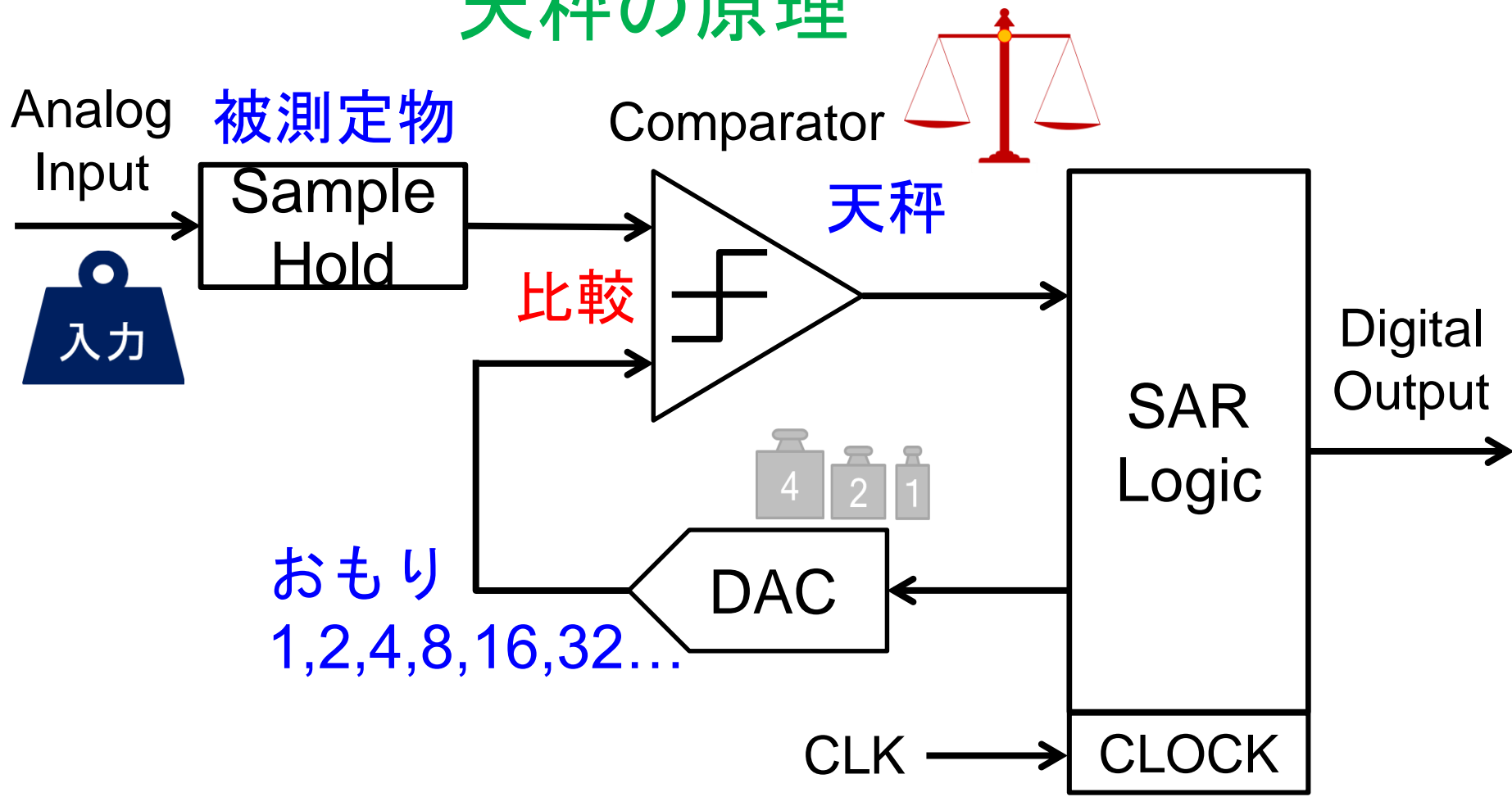
- 研究背景・概要
- 逐次比較近似 AD 変換器
- SARADC の冗長設計と補正能力
- フィボナッチ数列を用いた冗長設計
- 誤判定とデジタル出力値の関係
- まとめ

逐次比較近似AD変換器(SAR ADC)とは

アナログ入力と参照電圧を比較、結果に応じたデジタル出力

 (SAR = Successive Approximation Resister)

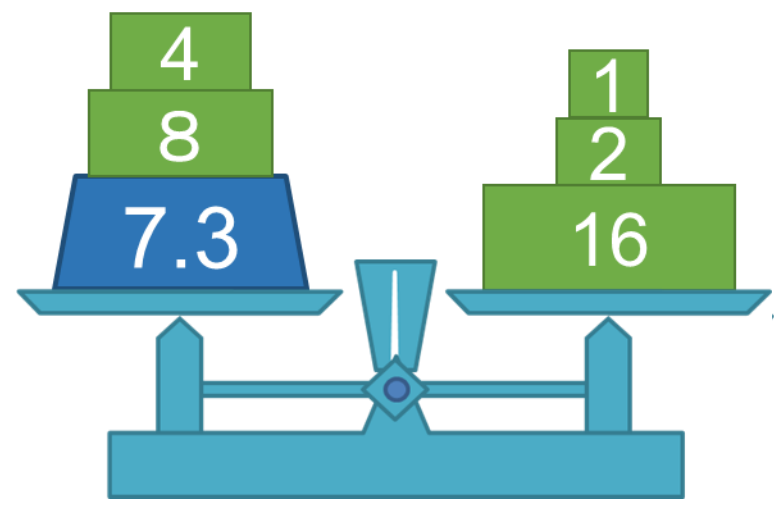
天秤の原理



二進探索SAR ADCの動作

5bit5step SAR ADC 変換動作

比較 (錘 : 16, 8, 4, 2, 1)



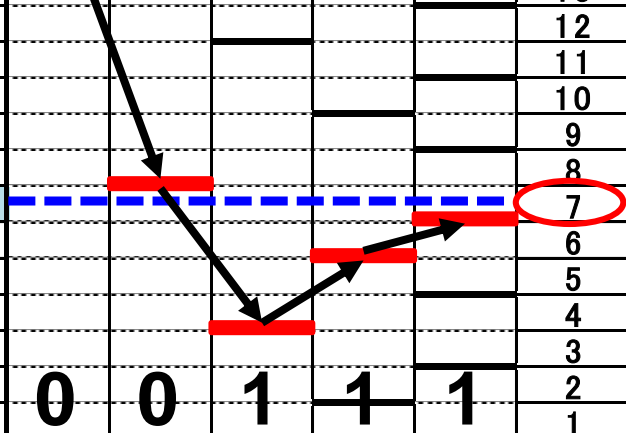
$7.3 \Rightarrow 7$

比較結果が...

- 右が大きい \Rightarrow 0 (重い)
- 左が大きい \Rightarrow 1 (軽い)

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	output
Weight p(k)	16	8	4	2	1	
31						31
30						30
29						29
28						28
27						27
26						26
25						25
24						24
23						23
22						22
21						21
20						20
19						19
18						18
17						17
16						16
15						15
14						14
13						13
12						12
11						11
10						10
9						9
8						8
7						7
6						6
5						5
4						4
3						3
2	0	0	1	1	1	2
1						1
0						0

Level



二進探索SAR ADCの動作

SAR ADC変換例

二進重み利用

5bit5step ADC
input 7.3 [LSB]

十進数と二進数が一対一に対応

正: $7 \Rightarrow (00111)_2 \Rightarrow 7$

しかし

一回の判定誤りが
出力間違いの原因になる

誤: $7 \Rightarrow (01000)_2 \Rightarrow 8$

誤りの時の補正不可



冗長設計で改善

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	output
Weight p(k)	16	8	4	2	1	
31						31
30						30
29						29
28						28
27						27
26						26
25						25
24						24
23						23
22						22
21						21
20						20
19						19
18						18
17						17
16						16
15						15
14						14
13						13
12						12
11						11
10						10
9						9
8						8
7						7
6						6
5						5
4						4
3						3
2						2
1						1
0						0

Level

判定間違い

アウトライン

- 研究背景・概要
- 逐次比較近似 AD 変換器
- **SARADC の冗長設計と補正能力**
- フィボナッチ数列を用いた冗長設計
- 誤判定とデジタル出力値の関係
- まとめ

冗長性を持つSAR ADC


冗長：余分や余裕のこと



SAR ADCに適用

時間の冗長性を利用
判定ステップ数を増加

5step ⇒ 6step など

二進重み 1,2,4,8,16 

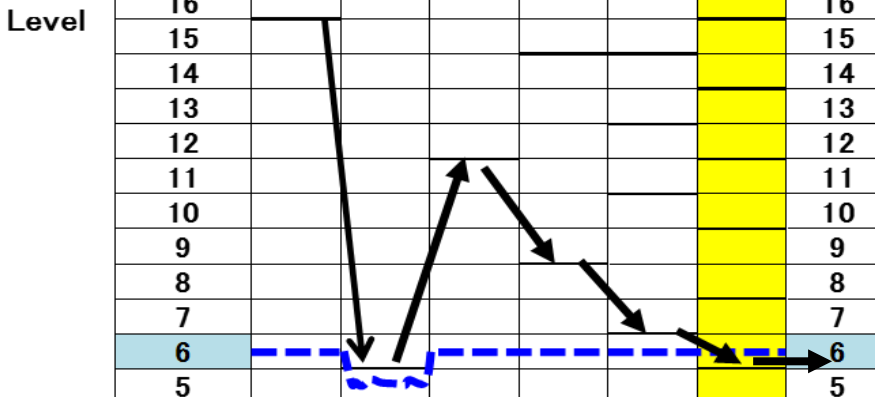
非二進重み 1,2,3,6,10,16

SAR ADC

誤り耐性向上
変換速度向上

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	output
Weight p(k)	16	10	6	3	2	1	
31							31
30							30
29							29
28							28
27							27
26							26
25							25
24							24
23							23
22							22
21							21
20							20
19							19
18							18
17							17
16							16
15							15
14							14
13							13
12							12
11							11
10							10
9							9
8							8
7							7
6							6
5							5
4							4
3							3
2							2
1							1
0							0

Level



冗長性を持つSAR ADC


冗長：余分や余裕のこと



SAR ADCに適用

時間の冗長性を利用
判定ステップ数を増加

5step ⇒ 6step など

二進重み 1,2,4,8,16 

非二進重み 1,2,3,6,10,16

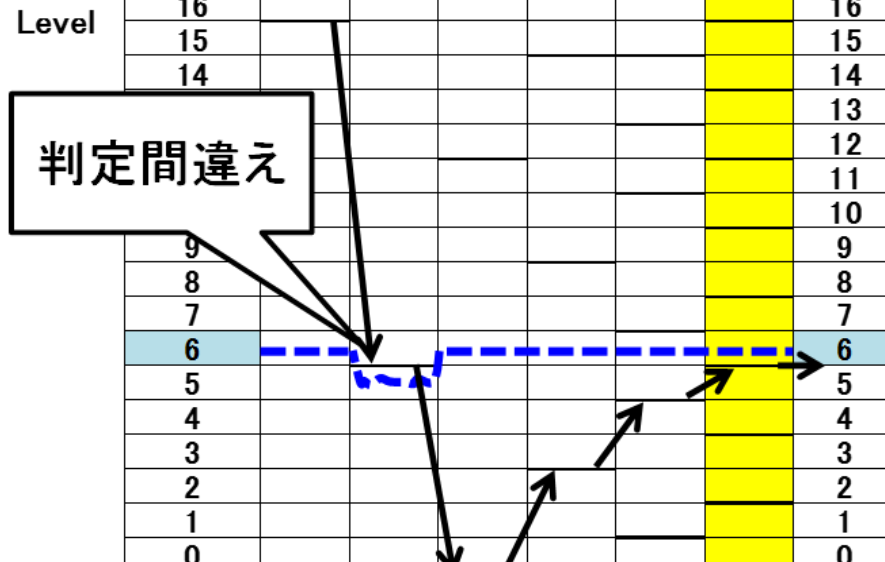
SAR ADC

誤り耐性向上
変換速度向上

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	output
Weight p(k)	16	10	6	3	2	1	
31							31
30							30
29							29
28							28
27							27
26							26
25							25
24							24
23							23
22							22
21							21
20							20
19							19
18							18
17							17
16							16
15							15
14							14
13							13
12							12
11							11
10							10
9							9
8							8
7							7
6							6
5							5
4							4
3							3
2							2
1							1
0							0

Level

判定間違い



比較電圧重み $p(k)$ の決定(従来手法)

$$\text{補正力 } q(k) = -p(k+1) + 1 + \sum_{i=k+2}^M p(i)$$

従来手法

① 基数radixから決定する $\Rightarrow p(k) = r^{M-k}$ (ただし $1 < r < 2$)

- 適切な基数の決定が難しい
- $p(k)$ は必ず小数になる(単位項による実現困難)

② 条件を定めて総当たり法

- 全パターン検討に膨大な時間がかかる
- 最適なパターン検出が難しい
- 条件の小さな変化に対応しづらい

③ 最も適当な重みを補正力 $q(k)$ で決定する

- 適切な効果を得づらい
- 決定が難しく設計時間を増加させる

従来手法の問題点

5bit6step ADC

冗長設計手法①

radix=1.80

比較電圧重み $p(k)$

$$p(1) = 2^{5-1} = 16$$

$$p(2) = 1.8^4 \cong 10$$

$$p(3) = 1.8^3 \cong 6$$

$$p(4) = 1.8^2 \cong 3$$

$$p(5) = 1.8^1 \cong 2$$

$$p(6) = 1.8^0 = 1$$

原理的に補正不可能な
入力範囲が存在
冗長設計効果の劣化



適切な $p(k)$ 選択が重要

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	output
Weight $p(k)$	16	10	6	3	2	1	
31			↓				31
30							30
29							29
28							28
27							27
26		↕	▲ $q(2)$				26
25							25
24							24
23							23
22							22
21							21
20			↕	▲ $q(3)$			20
19							19
18	↕	▲ $q(1)$					18
17							17
16							16
15							15
14							14
13	↕						13
12			↕				12
11							11
10							10
9							9
8							8
7							7
6		↕					6
5							5
4							4
3							3
2							2
1							1
0			↑				0

アウトライン

- 研究背景・概要
- 逐次比較近似 AD 変換器
- SARADC の冗長設計と補正能力
- **フィボナッチ数列を用いた冗長設計**
- 誤判定とデジタル出力値の関係
- まとめ

フィボナッチ数列とは？

フィボナッチ数列

$$F_0 = 0$$

$$F_1 = 1$$

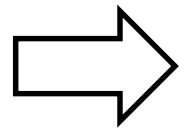
$$F_{n+2} = F_n + F_{n+1}$$

初項から計算していくと、

0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233...

隣り合う2項の比率は**黄金比**に収束

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F_n}{F_{n-1}} = 1.618033988749895 = \varphi (\text{約} \mathbf{1.6} \text{進数})$$



フィボナッチ数列を錘の大きさに適用！



Leonardo Fibonacci
(伊:1170~1250年頃)

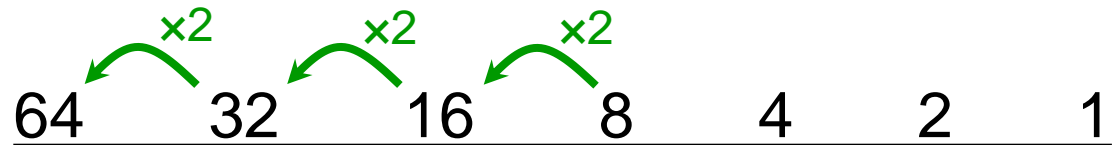
比較電圧重み $p(k)$ の決定(提案手法)

N bit 全 M step 中 k step 目の比較重み $p(k)$ を決定 (ただし $p(1) = 2^{N-1}$)

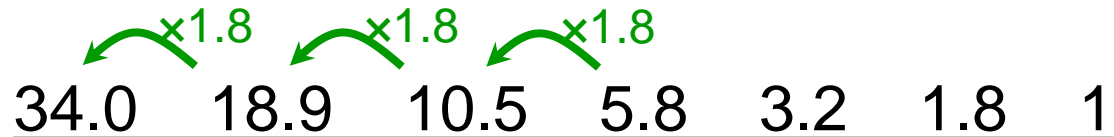
提案手法

フィボナッチ数を $p(k)$ として利用する $\Rightarrow p(k) = F_{M-k+1}$

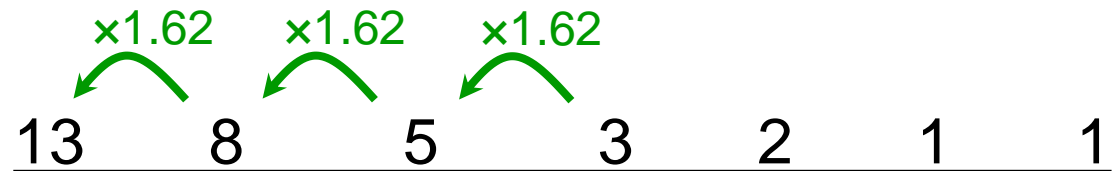
Binary Weight
二進数



Radix1.8 Weight
1.8進数



Fibonacci Weight
約1.62進数



隣り合う項の比率が黄金比 ϕ に収束する性質

\Rightarrow 整数のみで約1.62進数($radix = 1.62$)を実現できる!

フィボナッチ冗長設計の補正力

フィボナッチ数列SAR ADC

3点の性質を発見！

- ① 許容値 $q(k)$ は必ずフィボナッチ数
- ② 許容できる範囲が必ず接する
- ③ 内部DA変換器出力の不完全整定を考慮すると最速のSAR ADCになる



接する境界で
すべての入力範囲をもれなく
カバーすることになる



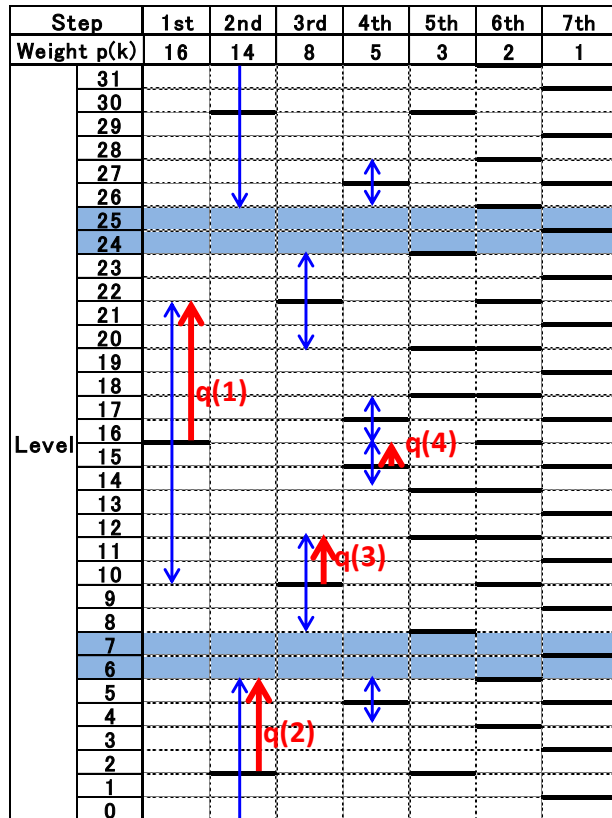
黄金比 ϕ を使うことで
無駄なステップがない
最も効率のよい設計が可能

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
Weight $p(k)$	16	8	5	3	2	1	1
33					↓		
32				↕			
31				↕			
30			↕		↕		
29			↕		↕		
28			↕		↕		
27			↕		↕		
26		↕		↕			
25		↕		↕			
24		↕		↕			
23		↕		↕			
22		↕		↕			
21		↕		↕			
20	↕	↕	↕	↕	↕		
19	↕	↕	↕	↕	↕		
18	↕	↕	↕	↕	↕		
17	↕	↕	↕	↕	↕		
16	↕	↕	↕	↕	↕		
15	↕	↕	↕	↕	↕		
14	↕	↕	↕	↕	↕		
13	↕	↕	↕	↕	↕		
12	↕	↕	↕	↕	↕		
11	↕	↕	↕	↕	↕		
10	↕	↕	↕	↕	↕		
9	↕	↕	↕	↕	↕		
8	↕	↕	↕	↕	↕		
7	↕	↕	↕	↕	↕		
6	↕	↕	↕	↕	↕		
5	↕	↕	↕	↕	↕		
4	↕	↕	↕	↕	↕		
3	↕	↕	↕	↕	↕		
2	↕	↕	↕	↕	↕		
1	↕	↕	↕	↕	↕		
0	↕	↕	↕	↕	↕		
-1	↕	↕	↕	↕	↕		
-2	↕	↕	↕	↕	↕		

従来手法との比較(5bit ADC)

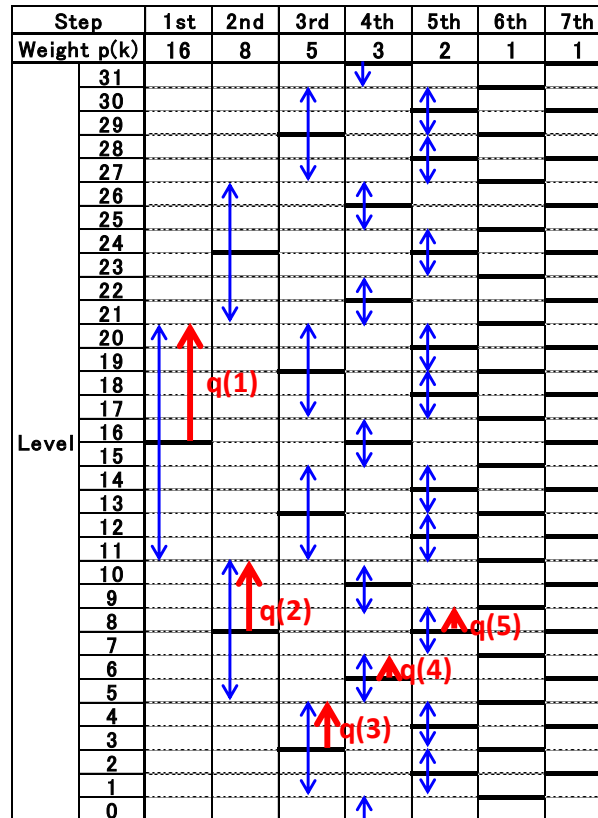
従来手法

1.70進数



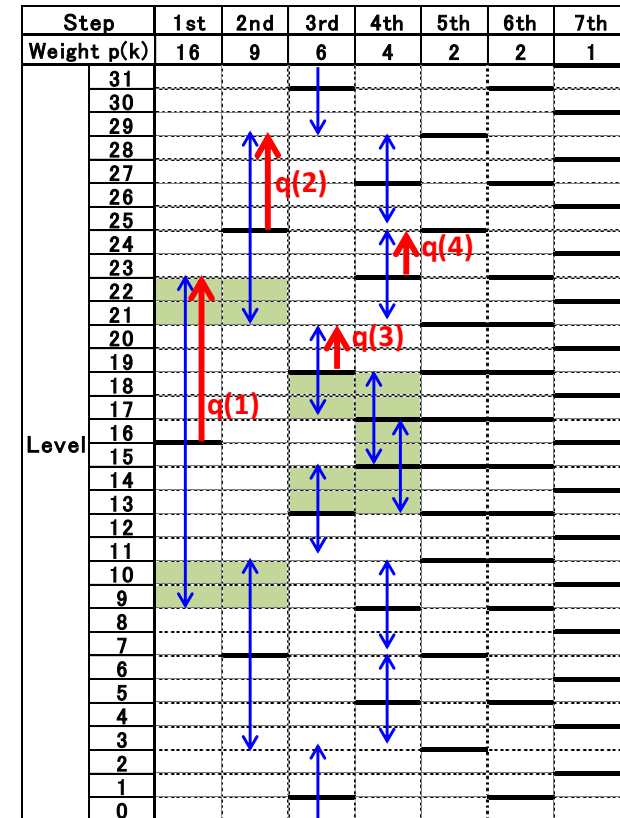
提案手法

1.62進数



従来手法

1.55進数



フィボナッチ数列冗長手法

冗長基数の境界条件
効率の良い基準重み

アウトライン

- 研究背景・概要
- 逐次比較近似 AD 変換器
- SARADC の冗長設計と補正能力
- フィボナッチ数列を用いた冗長設計
- 誤判定とデジタル出力値の関係
- まとめ

Step1で判定間違いがあったときの結果の比較 21/27

二進探索冗長SAR ADCの場合

誤差の値：9 (入力は7.3)

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	output
Weight p(k)	16	8	4	2	1	
31						31
30						30
29						29
28						28
27						27
26						26
25						25
24						24
23						23
22						22
21						21
20						20
19						19
18						18
17						17
16						16
15						15
14						14
13						13
12						12
11						11
10						10
9						9
8						8
7						7
6						6
5						5
4						4
3						3
2						2
1						1
0						0

フィボナッチ数列SAR ADCの場合

誤差の値：4

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	output
Weight p(k)	16	8	5	3	2	1	1	
31								31
30								30
29								29
28								28
27								27
26								26
25								25
24								24
23								23
22								22
21								21
20								20
19								19
18								18
17								17
16								16
15								15
14								14
13								13
12								12
11								11
10								10
9								9
8								8
7								7
6								6
5								5
4								4
3								3
2								2
1								1
0								0

Step2で判定間違いがあったときの結果の比較

二進探索冗長SAR ADCの場合

誤差の値：1 (入力は7.3)

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	output
Weight p(k)	16	8	4	2	1	
31						31
30						30
29						29
28						28
27						27
26						26
25						25
24						24
23						23
22						22
21						21
20						20
19						19
18						18
17						17
16						16
15						15
14						14
13						13
12						12
11						11
10						10
9						9
8						8
7						7
6						6
5						5
4						4
3						3
2						2
1						1
0						0

フィボナッチ数列SAR ADCの場合

誤差の値：0

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	output
Weight p(k)	16	8	5	3	2	1	1	
31								31
30								30
29								29
28								28
27								27
26								26
25								25
24								24
23								23
22								22
21								21
20								20
19								19
18								18
17								17
16								16
15								15
14								14
13								13
12								12
11								11
10								10
9								9
8								8
7								7
6								6
5								5
4								4
3								3
2								2
1								1
0								0

Step3で判定間違いがあったときの結果の比較

二進探索冗長SAR ADCの場合

誤差の値：4 (入力は7.3)

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	output
Weight p(k)	16	8	4	2	1	
31						31
30						30
29						29
28						28
27						27
26						26
25						25
24						24
23						23
22						22
21						21
20						20
19						19
18						18
17						17
16						16
15						15
14						14
13						13
12						12
11						11
10						10
9						9
8						8
7						7
6						6
5						5
4						4
3						3
2						2
1						1
0						0

フィボナッチ数列SAR ADCの場合

誤差の値：3

Step	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	output
Weight p(k)	16	8	5	3	2	1	1	
31								31
30								30
29								29
28								28
27								27
26								26
25								25
24								24
23								23
22								22
21								21
20								20
19								19
18								18
17								17
16								16
15								15
14								14
13								13
12								12
11								11
10								10
9								9
8								8
7								7
6								6
5								5
4								4
3								3
2								2
1								1
0								0

誤作動時の出力値の比較

二進探索冗長SAR ADC		
間違えた段階	出力	誤差
Step1	14	9
Step2	6	1
Step3	12	4

フィボナッチ数列SAR ADC		
間違えた段階	出力	誤差
Step1	12	4
Step2	8	0
step3	4	3

大

誤差

小

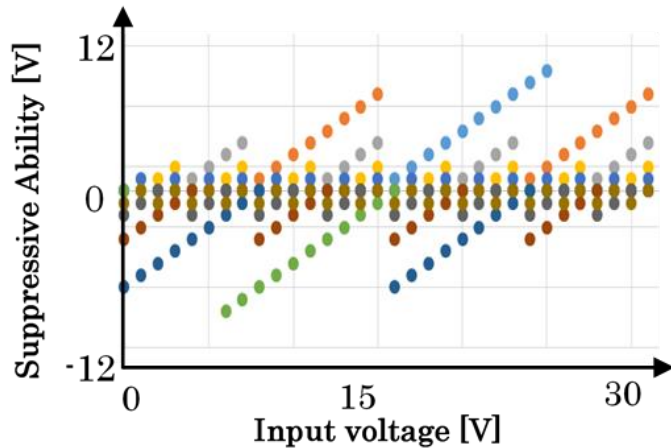
つまり

小

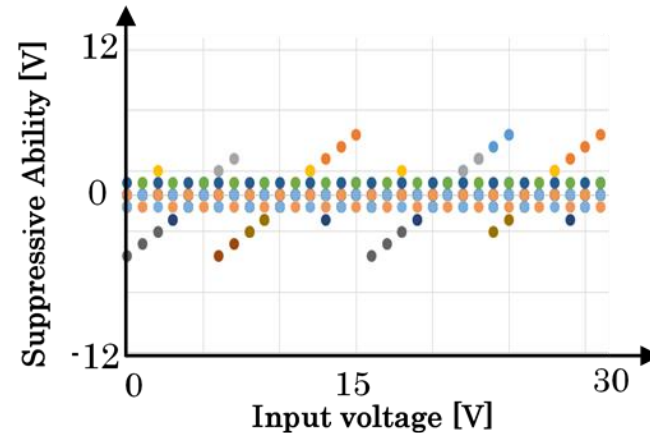
補正力

大

シミュレーション条件



二進探索アルゴリズムの抑制力.



黄金比探索アルゴリズムの抑制力.

<シミュレーション条件>

- ・二進探索法と黄金比探索法の抑制力をExcelで数値計算
- ・入力電圧は刻み幅1V 0~31Vの範囲で入力、ノイズ段は1stepのみ設け、そこにノイズ成分-10V,10Vをそれぞれ重畳



<結果>

- ・二進探索法より黄金比探索法の方が、最大入出力電圧差が $\pm 6V$ 程小さい
- ・これは校正不可時でもエラー電圧を入力電圧付近まで近づけていることを示唆

黄金比探索法は二進探索法よりエラーを抑制できる！

アウトライン

- 研究背景・概要
- 逐次比較近似 AD 変換器
- SARADC の冗長設計と補正能力
- フィボナッチ数列を用いた冗長設計
- 誤判定とデジタル出力値の関係
- まとめ

まとめ

フィボナッチ数列SAR ADCの利点

- ・誤差補正範囲の強化
 - 従来の二進探索SAR ADCより信頼性が高い
- ・基数の選定
 - フィボナッチ数に従って基数を選べばよい

今後の課題 . . . 従来の冗長設計SAR ADCと比較する

Q&A

Q. 誤差のところがオリジナリティー、具体的にどのような誤りがあった場合を想定しているか？

A. 今回は判定ステップ時に比較を間違えてしまった時を想定している。

Q. 原稿に書かれている数値計算を行ったものか？

A. はい。

Q. 10Vのノイズ成分を重畳する場合はありえるのか？

A. 今回は誤判定があった場合を想定しているので、あえて大きい数値で重畳する場合を考えている

Q. P25の図の見方、どこを見ればノイズがすくないことがわかるのか？

A. 縦軸は入出力の差分をとっているなので、その幅を見ればノイズがすくないことがわかる