

[招待講演] デルタシグマ変調技術を用いた時間デジタル変換回路 —時間領域アナログ回路のキーコンポーネント—

小林 春夫

群馬大学 理工学府電子情報部門 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1

E-mail: k_haruo@el.gunma-u.ac.jp

あらまし

(1) 日本発の2つの技術 “デルタシグマ変調技術” (東大・早大名誉教授 安田靖彦先生) と “時間デジタル変換回路” (高エネルギー加速器研究機構 新井康夫先生) を融合した表題の回路について、講演者の研究室で研究開発を行っているアルゴリズム、原理、回路、アプリケーション等をわかりやすく解説する。

(2) 次の世代を担っていかれる若手研究者・技術者の皆様へ、ささやかなメッセージも添える。

キーワード デルタシグマ変調、時間デジタル変換回路、時間領域アナログ回路

[Invited Talk] Time-to-Digital Converters with Delta-Sigma Modulation — Key Components of Time-Domain Analog Circuitry —

Haruo KOBAYASHI

Graduate School of Science and Technology, Gunma University 1-5-1 Tenjin-cho Kiryu-shi Gunma 376-8515 Japan

E-mail: k_haruo@el.gunma-u.ac.jp

Abstract This paper presents the research results of delta-sigma time-to-digital converters (TDCs) performed at the author's laboratory. Their algorithm, principle, circuits and applications are introduced. We remark that delta-sigma TDCs are based on two technologies invented by two Japanese researchers (Profs. Yasuhiko Yasuda and Yasuo Arai). Also some messages to young researchers are provided.

Keywords Delta-Sigma Modulation, Time-to-Digital Converter, Time Domain Analog Circuit

1. 時間領域アナログ回路

集積回路微細化に伴い、分解能を電圧振幅ではなく時間軸で得る回路技術が関心を集めている。これは時間領域アナログ回路と呼ばれ、そのキーコンポーネントであるフラッシュ型時間デジタル回路 (Time-to-Digital Converter : TDC) は日本人の発明である [1]。一方、AD/DA 変換器に良く用いられている $\Delta\Sigma$ 変調技術も日本人の発明である [2]。

筆者の研究室では両者を組み合わせたデルタシグマ TDC 回路 [3] について研究を行い、新たなアルゴリズムを導出してアナログ FPGA 等で動作・有効性を検証している [4-20]。簡単な回路で測定時間を相対的に長くすれば細かい時間分解能が得られ、線形性も良い。位相ノイズ測定 [15-20]、完全デジタル PLL 回路 [21] 等今後ますます応用が広がることが期待できる。

筆者は、様々なところでデルタシグマ変調器を用いると上手くいく、工夫した回路構成を考えてもデルタシグマ変調器に帰着することが多いということを経験している。

2. 若手研究者・技術者へのメッセージ

筆者が心に残った言葉を書きとめ、講義等で学生に話をしているものを紹介する。

2.1. 新時代を築くのは若者

新しい時代を切り開く主役は若者である。歴史を振り返ると明治維新等の新しい時代を切り開いてきたのは20代の若者ということがわかる。

「新しきぶどう酒は新しき皮袋に入れよ」(新約聖書)
「後生畏るべし。いづくんぞ来者の今に如かざるを知らんや。」(論語)

2.2. 大学で学ぶこと

大学で学ぶことは「知識」「良識」「見識」である。

知識： 深い専門知識、広い一般教養

良識： 倫理、人格、品格、修養

見識： 先見性、創造力、ビジョン、リーダーシップ
夢、志、よい技術を見抜く力

また、大学教育に2つの要素が必要である。

「東洋の道徳、西洋の芸」

(佐久間象山、江戸時代後期の思想家)

西洋の芸：

これは役に立つ知識を得る、科学、工学、医学、経営学、語学、近年では産学連携、インターンシップ、国際交流、実践的教育、語学研修、技術経営等である。職を得る・自立するために有用であり、近年の大学教育では急速に充実してきている。

東洋の道徳：

これは良識、見識、人間修養、帝王学等であり、とくにある年代になると重要性を認識する。幕末、明治維新期の日本人は英語ができなくても先端技術がなくても海外の人たちの尊敬を集めた。江戸時代までの教育は人間修養中心であったようである。

「少にして学べば壮にして為すあり。
壮にして学べば老いて衰えず。
老いて学べば死して朽ちず。」
江戸後期の儒学者・佐藤一斎（1772～1859）
「言志晩録」第60条

人をあざむくために学問をしない。
人とあらそうために学問をしない。
人をそしめるために学問をしない。
人の邪魔をするために学問をしない。
自分を自慢をするために学問をしない。
名を売るために学問をしない。
利をむさぼるために学問をしない。
足代弘訓（江戸時代後期の国学者）

自分のために学ぶことが重要である。
「いにしへの学者は己の為にし、
今の学者は人の為にす。」（論語）
「およそ学をなすの要は己が為にするあり。
己が為にするは君子の学なり。

人の為にするは小人の学なり。」（吉田松陰）
昔の学者は己が徳を得るために学問をしたが、今の学者は他人に知られるためにしている。学問はまず自分を高めるためにするのであって人に認められる（地位と名声を得る）ためではない。

「人間力」を鍛えることが重要であると思う。
「死と向かいあった捕虜の世界では、皆平等である。実社会で威張っていた人物ほど、極限状態に置かれたらだらしのないのをずいぶん見たものだ。いまだに肩書きや学歴を鼻にかける人間が信用できないのは、このときのあまりにも大きな落差を知っているからである。」（シベリア抑留経験、再建王 坪内寿夫）

大きな仕事をするためには人間修養が必要である。

「徳あれば人あり、人あれば土（ど）あり。
土あれば財あり、財あれば用あり。」（大学）
徳があれば人が集まり、人が集まってくれば国土を保つことができる。そうなれば財物・資材も集まり、それらを用いて業績を上げることができる。

自立、独立自尊の気概が必要である。
「独立自尊、国を支えて国に頼らず」（福沢諭吉）

“Ask not what your country can do for you.
Ask what you can do for your country.”

国家が諸君のために
何をしてくれるかを問うのではなく、
諸君が国家に何をなしうるかを考えよ。

(J. F Kennedy 1960年 第35代米国大統領就任演説)

2.3. 大学の役割

大学では研究を通して学生を教育するのが特徴である。下記の大学の研究教育でのフンボルトの大学の理念は今も生きている。

「知識は発展している、作り出されている、進歩している。大学は学問をいまだに完全には解決されていない問題として、たえず研究されつつあるものとして扱うことに特色がある。」

下記はトーマス・エジソンの大学教育が役に立たないということに対するアルバート・アインシュタインの反論である。

「大学の教育の価値は、事実を数多く学ぶことではない。教科書からは学べないことを考えるよう、頭を鍛えることである。」

「学校で学んだことを一切忘れてしまった時に、なお残っているもの、それこそ教育だ。」

次の言葉も心に残っている。

「大学は専門的な知識を成果に結びつける、そのやり方を教えるところである。」

「大学はさまざまな専門分野の知識を集めて成果に結びつけるところである。」

(経営学者 ピーター・ドラッカー)

知識・情報の活用を考える。
「知識の奴隷になるのではなく、知識を縦横無尽に使いこなす。」（松下幸之助）

「知識」は本の中にはない。本の中にあるのは「情報」である。「知識」とはそれらの「情報」を仕事や成果に結び付ける能力である。」（ドラッカー）

「即戦力教育」、「実利」だけでは大学に人は集まらないことも事実である。

「この地上で大学ほど美しいものは、そう多くはない。なぜなら、そこには無知でありたくない人たちが真理探究のために集まり、真理を知った人たちが、それを広めようとしているからである。」
(英国 教育者、ジョン・メイスフィールド)

2.4. 大学での教育

大学院生には外部発表させると教育効果がある。

「知識労働者は自らが教えるときに最もよく学ぶ。花形セールスマンの生産性をさらに向上させる最善の道は、セールスマン大会で成功の秘訣を語らせることである。外科医の成果を向上させる最善の道は、地域の医者を集まりで自らの仕事について語らせることである。情報化社会においては、いかなる組織も学ぶ組織にならねばならない。同時に教える組織にもならなければならない。」(ドラッカー)

「アイデアは「人に話して」発展する。」
(カーネギーメロン大学 金出武雄教授)

若手のモチベーションの向上を考える。
「世界一の研究開発、世界初の製品開発ということが、若手技術者をやる気にさせる。そのような環境をつくるのが重要。」(大手半導体メーカーマネージャー)

大学院博士課程の講義では個別専門分野の講義だけではなく研究方法論の講義が必要である。

「大学院博士課程ではメタ研究論、メタ研究方法論の講義が必要である。」(東大名誉教授 北森俊行先生)

また、博士課程の学生は研究者を育てる能力も求められる。研究者再生産ループの構築が必要である。

2.5. 大学での研究開発

国内電子産業が厳しい現在、「理念」を再考することが重要と思う。

その事業を何のために行うのか。(企業理念)
自分は何のために生きるのか。(人生の目的)
将来の社会のビジョンを描き電子産業・技術のあるべき姿を考えることが重要である。

「戦術・戦略も大事。しかしそれ以上に大事なことがある。」(松下幸之助 氏)

工学理念を考える。

「技術で世の中に喜びを提供する」

「研究所は技術ではなくどういうものが人に好かれるかを研究するところである。」(本田宗一郎)

「大学は哲学を創出し発信するのが使命」
(群馬大学教授 稲村實先生)

研究・産学連携では小さな出会いから始めることが重要である。大きなプロジェクトを計画して実行するよりも小さな出会いからのほうが良い成果が生まれることを何回も経験している。

「大河の流れも小さな湧水から」
「大木を育てるには小さな種をまく必要がある。小さなことから始めよ。小さなことを大切にせよ。」
(リチャード W. ハミング、ベル研究所)

研究では少数派であることを恐れないことが肝要である。少数派が新しい時代を切り開く。研究開発では誰もやっていないので少数派であり、成功して認められると多数派になる。

気軽にどんどんアイデアを出していくと、良いアイデアがでてくる。

「特許出願に千三つの法則あり。千個アイデアをだしてモノになるのは三つ。どんどん新しいアイデアをだそう。」(メーカーの特許関係者)

何(what)を作るか・開発するかが重要である・
「企画に経験ある優秀な人をもってくる」
(半導体メーカー マネージャー)

「プロの製品企画者はお客さんへのアンケート結果だけに基づいて次の製品を企画するわけではない。お客さんのまだ気が付いていない新しいコンセプトのものを企画することが重要」(中堅メーカー 経営者)

「お客さんの言うとおりのものを作るのはカスタムメイドである。カスタマーオリエンテッドとはお客さんが口には表現できないがその意を汲み取り満足するものを作ることである。」(ソニー 盛田昭夫氏)

「新製品は不況下でも売れる。継続して新製品を開発してほしい。」(メーカー営業関係者)

2.6. 研究成果の発表

「研究成果を公表する」ことはアカデミズムの世界では重要である。新しい知見・研究結果を公開・発表してはじめて意味をもち成果として認められる。

論文、特許、学会発表、著書等の「書いたもの」は、10年、20年後にも自分にとって残っているものになる。

大学での教員評価は（筆者が知る限り）世界中で研究論文業績中心であるが、（問題もあるが ある程度）正しい。ガリレオは命懸けで著書を記す。現在もその知の財産が直接継承できる。

一方、メーカー技術者は関与した製品が世の中に出回り広く使われることが生きがい・やりがいであろう。

2.7. 工学を考える

「科学（理学、Science）」と「技術（工学、Technology）」は似ているが異なる。

「理学」が真理を追究するのを目的である。

「工学」は役に立つこと（「ものづくり」だけでなく「環境問題」等も含めて）を目的とした実学である。

「工学」は社会性をもった学問である。

工学は新しい社会を創造できる「もの作り」だけではない。「新しい社会作り」ができる。

イノベーションとは新しい技術もとに、社会的意義のある新たな価値を創造し、社会的に大きな変化をもたらす変革である。例えば蒸気機関の発明は輸送手段を馬車から鉄道にし、社会を大きく変えた。

科学のアプローチ

「美しいものは真理。真理は美しい。」

（数学者 藤原正彦先生）

「宇宙は神が数学の言葉で書いた聖書だ。

神が書いたのだから美しくないはずがない。」

（アイザック・ニュートン）

工学のアプローチ

「机上の空論ではなく、実際に“現場”で

“現物”を観察し、“現実”を認識した上で

問題解決を図る。」（三現主義）

工学をささえる科学

「天を以って得るものは固く、人を以って得るものは脆し。」（佐藤一斎、江戸時代国学者）

自然の法則によって得たものは強固であり、人の知恵によって得たものは脆い。

工学における考え方を学ぶ。

思考力・創造力の向上のために

- 数学の定理を教え、証明してみせるよりも、定理を発見する気持ちを教える。

- 物理法則を教えるよりも、物理法則を見つけ出そうという気持ちを教える。
- 出来上がった理論を教えるよりも、理論を創る気持ちを教える。

（東大名誉教授 北森俊行先生）

工学は産業と密接にかかわる

- 産業界との共同研究による技術導入、教育支援、資金援助が得られる。
- 特許を取得しライセンスをうけることができる。
- 自ら起業する

学生「講義内容が実際にどのように役立つかを理解したい。」

教員「理科に関心を持たせる。

ものづくりの面白さを教える。」

もう一歩踏み込み、その研究・技術でどんな産業が起こせるか、産業界で活用してもらえるか、特許が取れるかを考える、「産業の匂い」を知る。

- 工学部のレベル向上には産学連携は必須。
- 大学院では 専門性の深さとともに幅の広さをもつ人材育成が重要。
- 実践的研究教育は時代の要請。
- 「すぐに役に立つ学問はすぐに役に立たなくなる」の側面もある。が、結果として米国流はうまくいっている。

2.8. 大学教員

工学部の大学教員は製造業（第2次産業）の要素をもったサービス業（第3次産業）に従事している。

また研究面では「新しい学問分野を切り開くのが一流の大学教授の証」である。

教師像を考える。

The mediocre teacher tells.

The good teacher explains.

The superior teacher demonstrates.

The great teacher inspires.

凡庸な教師は指示をする。

良い教師は説明をする。

優れた教師は範となる。

偉大な教師は内なる心を揺り動かす。

（教育学者 ウィリアム・アーサー・ワード）

大学の講義

「“わかる人にはわかる”、“わからない人にはわからない”のではなく“わからない人をわからせる”のが良い講義」(東大名誉教授 原宏先生)

大学教員の強みはその立場にある。研究室では意思決定は早い。教員の地位、給与は保証されているので、思いきったリスクの高い研究をすぐに着手でき、「利益を得る」ことに縛られない。図書館等 大学のインフラを活用でき、学生との協力も可能である。

一般に大学教員は TV、新聞、雑誌等のマスコミ関係に名前を出してもらったり、また学会の委員、国・地方公共団体の委員等の公的な立場の仕事が回ってくるのが比較的多い。これは「その大学教員個人の能力のため」ということもあるが、「大学教員であるという役職・立場」に力があるからということも認識すべきであろう。(大学教員はこれを「全く自分の実力」と思うと「裸の王様」になりかねないであろう。)逆にこのことを積極的に利用し「国立大学の教授・准教授の名刺をもっていけばどこにでも入っていける。

民間企業や国立の研究所もよく対応してくれるので、そのようなことを利用すれば情報を集め人脈を築き、その分野のリーダーになれる」とアドバイスしてくれる人もいる。

2.9. 技術者・研究者

エンジニア (Engineer) の語源の説の一つ。

15世紀のレオナルド・ダビンチなどの天才などを「才能を与えられし者: en (者) + genius(天才)」を呼んだことにより「創意工夫し、文化・文明を創造する人」の意。エンジンを操る人が語源との説もある。

産学連携と朱子学 (王陽明)

「知行合一」 学問と事業の一致。大学での工学研究教育産業界とベクトルを同じくする

技術者は総合力で勝負

- 技術力、基礎学力
- 問題発見能力、問題解決能力
- 語学力
- 雑学
- コミュニケーション能力
- プレゼンテーション能力
- 人脈
- 体力 等

技術者には幅の広さが重要である。

「ハードウェア技術者にとって最も重要なものはソフ

トウェア技術。ハードウェアとソフトウェアの接点部分に大きなビジネスチャンスがある。」

(三洋電機 小山博氏)

工学はトレードオフ (妥協) の考え方が重要である。「時間が足りない、マンパワーが足りない、予算が足りない、情報が足りない、…」

全てが満ち足りているわけではない環境下で (100%でなくても) かなりのことをやってしまう、かなりのものを開発してしまうのがエンジニアリング・工学的センスである。

2.10. 技術者・研究者倫理

富と徳の両立に関してよい言葉が残されている。

「義を先にして利を後にする者は栄える。」

(義利合一、論語、孟子)

「論語と算盤、士魂商才」(渋沢栄一)

「徳を忘れた経済は罪悪、

経済を忘れた徳は寝言」(二宮尊徳)

「悪しき専門家」になるな。新しいことをやろうとする、トラブルに対処する提案をすると、悪しき専門家はできないという理由をすぐ5つあげる。

A winner finds solutions, a loser finds excuses.

解決策を見つける人は勝者となり、

言い訳を見つける人は敗者となる。

「仕事の報酬は仕事」(実業家 藤原銀次郎)

良い仕事をすれば次にも良い仕事が回ってくる。

2.11. 国際交流

英語、語学には2つの役割がある。

(1)「情報」を得るために学ぶ。歴史的に明治維新期等で欧米の先端技術を得るため。

(2)世界の人とコミュニケーションするために学ぶ。

なぜ米国から新しいものが生まれるか。ソニー創業者の盛田昭夫氏の次の言葉が印象に残っている。

「米国では different であることを好む。

日本では uniform であることを好む。」

米国は多民族国家であり、多様性が特徴である。

公平性(Fairness)、オープン性を重要視。

「米国で一番」ということは「世界で一番であることである」との言葉が記憶に残っている。

よい国際会議に参加・発表する。多くの情報が得られ人脈が得られる。最も効果的な海外留学である。

留学生を受け入れることはその国に費用がかかる。が、米国では長期的に自国に益をもたらすことを経験的に知っている。仕事・勉強・遊びを問わず。米国に一度行くことを勧める。

2.12. 最後に

「幸福になるためには学ばなければならない。
自分で作る幸福は学ぶことであり、知れば知るほど
学びができるようになる。学びが進んだだけ楽しみが
増えるのだ。」(アリストテレス)
「人間は意欲し、創造することによってのみ幸福である。」(アラン 幸福論)

文 献

最初のフラッシュ型 TDC 回路の発表

- [1] Y. Arai, T. Baba, "A CMOS Time to Digital Converter VLSI for High-Energy Physics", IEEE Symposium on VLSI Circuits (1988).

安田先生のデルタシグマ変調技術の発明回顧録

- [2] 安田靖彦「技術の生みの親・育ての親」郵政研究所月報 巻頭言(2001年7月).

最初ノデルタシグマ TDC 回路の発表

- [3] B. Young, K. Sunwoo A. Elshazly, P. K. Hanumolu, "A 2.4ps Resolution 2.1mW Second-order Noise-shaped Time-to-Digital Converter with 3.2ns Range in 1MHz Bandwidth," IEEE Custom Integrated Circuits, San Jose (Sept. 2010)

ナノ CMOS 時代のアナログ技術のレビュー

- [4] H. Kobayashi, H. Aoki, K. Katoh C. Li, "Analog/Mixed-Signal Circuit Design in Nano CMOS Era", IEICE Electronics Express, vol.11 no.3, pp.1-15 (2014)

フラッシュ型 TDC とヒストラム法自己校正

- [5] K. Katoh, Y. Kobayashi, T. Chujo, J. Wang, E. Li, C. Li, H. Kobayashi, "A Small Chip Area Stochastic Calibration for TDC Using Ring Oscillator", Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, Springer (Dec. 2014).
- [6] T. Chujo, D. Hirabayashi, K. Kentaroh, C. Li, Y. Kobayashi, J. Wang, K. Sato, H. Kobayashi, "Experimental Verification of Timing Measurement Circuit With Self-Calibration", IEEE International Mixed-Signals, Sensors and Systems Test Workshop (IMS3TW'14), Porto Alegre, Brazil (Sept. 2014).
- [7] K. Katoh, Y. Doi, S. Ito, H. Kobayashi, E. Li, N. Takai, O. Kobayashi, "An Analysis of Stochastic Self-Calibration of TDC Using Two Ring Oscillators", IEEE 22nd Asian Test Symposium, Yilan, Taiwan, (Nov. 2013).
- [8] S. Ito, S. Nishimura, H. Kobayashi, S. Uemori, Y. Tan, N. Takai, Takahiro J. Yamaguchi, Kiichi Niitsu, "Stochastic TDC Architecture with Self-Calibration," IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Kuala Lumpur, Malaysia (Dec. 2010).

デルタシグマ TDC 回路

- [9] S. Uemori, M. Ishii, H. Kobayashi, et. al., "Multi-bit Sigma-Delta TDC Architecture with Improved Linearity," Journal of Electronic Testing: Theory and

Applications, Springer, vol. 29, no. 6, pp.879-892 (Dec. 2013).

- [10] S. Uemori, M. Ishii, H. Kobayashi, et. al., "Multi-bit Sigma-Delta TDC Architecture for Digital Signal Timing Measurement", IEEE International Mixed-Signals, Sensors, and Systems Test Workshop, Taipei, Taiwan (May 2012).
- [11] S. Uemori, M. Ishii, H. Kobayashi, et. al., "Multi-bit Sigma-Delta TDC Architecture with Self-Calibration", IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Kaohsiung, Taiwan (Dec. 2012).
- [12] Y. Arakawa, Y. Osawa, H. Kobayashi, O. Kobayashi, "Linearity Improvement Technique of Multi-bit Sigma-Delta TDC for Timing Measurement", IEEE 3rd International Workshop on Test and Validation of High-Speed Analog Circuits, Anaheim, CA (Sept. 2013)
- [13] 平林 大樹、荒川 雄太、河内智、石井 正道、上森 聡史、佐藤 幸志、小林 春夫、新津 葵一、高井伸和「デジタル信号タイミング試験用 BOST の検討」電気学会 電子回路研究会、熊本 (2012年10月)
- [14] T. Chujo, D. Hirabayashi, M. Tsuji, K. Sato, H. Kobayashi, "Multi-bit Delta-Sigma TDC BOST for Timing Test", IEEE International Test Conference, Poster Session, Seattle, WA (Oct. 2014).
- [15] 中條剛志、平林大樹、荒船拓也、佐藤幸志、小林春夫、"マルチビットデルタシグマ型タイムデジタル回路の FPGA 実現・測定検証", 電気学会 電子回路研究会、秋田 (2014年10月)

デルタシグマ TDC 回路の位相ノイズ測定への応用

- [16] D. Hirabayashi, Y. Osawa, N. Harigai, H. Kobayashi et. al., "Phase Noise Measurement with Sigma-Delta TDC", IEEE International Test Conference, Poster Session, Anaheim, CA (Sept. 2013).
- [17] 大澤優介、平林大樹、針谷 尚裕、小林春夫、新津葵一、小林修「デルタシグマ TDC を用いた位相ノイズ測定」電気学会 電子回路研究会 島根 (2014年7月)
- [18] Y. Osawa, D. Hirabayashi, N. Harigai, H. Kobayashi, K. Niitsu, O. Kobayashi, "Phase Noise Measurement Techniques Using Delta-Sigma TDC", IEEE International Mixed-Signals, Sensors and Systems Test Workshop (IMS3TW'14), Porto Alegre, Brazil (Sept. 2014).
- [19] Y. Osawa, D. Hirabayashi, N. Harigai, H. Kobayashi, O. Kobayashi, "Phase Noise Measurement and Testing with Delta-Sigma TDC," The 4th IEICE International Conference on Integrated Circuits Design and Verification, Ho Chi Minh City, Vietnam (Nov. 2013).
- [20] 小林春夫「デルタシグマ型タイムデジタル回路のアルゴリズム・回路設計とアナログ FPGA 実現」アナログ・ミックスドシグナルにおけるシステム設計セミナー 半導体開発におけるシステム設計の成功の秘訣とは？, MathWorks 社セミナー、横浜 (2014年6月)

完全デジタル PLL 回路と TDC 回路

- [21] 湯本哲也, 村上健, 西村繁幸, 田邊朋之, 壇徹, 高橋伸夫, 内藤智洋, 北村真一, 坂田浩司, 小林春夫, 高井伸和, 新津葵一「TV チューナ用完全デジタル PLL 回路 - システムの観点から」電気学会電子回路研究会, ECT-11-089, 長崎 (2011年10月)