

令和元年6月17日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06318

研究課題名(和文) 初期視覚モデルの応用による時間デジタル変換回路の研究

研究課題名(英文) Research of time digital converter using early vision model

研究代表者

島 健 (Shima, Takeshi)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：50312088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：時間差を計測する時間デジタル変換回路(TDC)の変換精度を高めるため、鳥類の網膜に見られる神経回路の仕組みを利用する研究を行った。これには、各神経細胞の空間的配置とTDCに用いられる時間目盛りの役割を果たす多相発振回路の発振波形の順序とを対応づける必要があり、これを可能とする特定のモードで発振する回路を提案し、神経回路を模擬する回路と組み合わせた。これにより、神経回路の特徴を生かした発振周波数の揺らぎや、素子偏差、温度変動に強靱で高精度なTDCのための回路方式を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年外界情報のセンシング技術が注目されている。時間を計測する装置の高精度化は、自動車の自律走行運転や医療用イメージング装置等に代表されるセンシング技術の発展に不可欠である。本研究の成果は、自律走行運転においては外界をより精度よく認識することに役立ち、医療用イメージング装置においては、病変を初期段階で検出することが可能になるなど、我々の生活に大きな便益をもたらすと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a signal processing method in the early vision model of the retina is introduced to improve the measurement accuracy of the time-to-digital converter. Each oscillator output waveform of the multi-phase ring coupled oscillators (MPRCO) is considered as a photoreceptor cell output of the retina. The dynamic behavior of the MPRCO was analyzed to avoid the instability of the oscillation mode, and the circuit design technique and its startup procedure were proposed to realize an MPRCO that oscillates in a specific mode. In addition, a new output code robust against oscillation frequency perturbations was proposed, as well as a N-path notch filter to improve TDC time resolution. The results of this research will enable recognition of the external environment of an autonomous vehicle in more detail, and in medical imaging devices it will be possible to detect lesions at an early stage. Thus great benefits to our lives are anticipated.

研究分野：電子回路工学 集積回路工学

キーワード：初期視覚モデル 環状多相発振回路 フィルタ 発振モード

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

外界情報のセンシング技術の高度化は、IoT、人工知能技術や医療用イメージングに代表される未来技術に不可欠である。多様な外界情報の高度なセンシング技術の実現には、新たな信号処理回路技術の開発が必要となっている。集積化によるセンシング技術の高度化においては、微細化の進展により電源電圧が低下しているため電圧振幅ではなく時間領域での時間デジタル変換回路 (TDC) の利用が考えられているが、素子雑音や素子偏差による変換精度の向上に課題がある。

TDC は、1980 年代に日本人により提案されている[1]。TDC は、時間経過とともに遅延回路を伝搬する信号がどこまで到達したかをフリップフロップ回路に記憶する。アナログ情報である「時間経過」を離散化し、デジタル値としているので TDC と呼ばれている。時間領域での信号処理回路であり、微細化が進捗し電源電圧が低下している集積回路によるアナログ情報処理に適しており、様々な改善提案がなされている。

例えば、ノギスの仕組みを利用して、遅延時間が  $\tau_1$  の遅延回路 (主尺) の他に、遅延時間が僅かに短い  $\tau_2$  の遅延回路 (副尺) により、時間分解能を  $\tau_1 - \tau_2$  に高める工夫や、RS フリップフロップの準安定状態の保持時間が、準安定状態に入る直前の 2 入力の時間差に依存するという性質を利用し、僅かな時間差を増幅 (Time Amplify) することで見掛け上の精度を向上させるという工夫も知られている。素子偏差による精度劣化に対する改善提案も報告されている。例えば、遅延素子の遅延時間偏差 (微分非直線性) による遅延回路全体に与える影響 (積分非直線性) は、遅延回路の段数の平方根に比例することから、PLL 回路により遅延回路初段の入力と最終段の出力位相を一致させることで積分非直線性を改善する工夫が報告されている。PLL 回路なしで積分非直線性を改善する工夫として、遅延回路を環状接続する工夫が提案されている。一方、発振回路を環状接続した環状多相発振回路が提案され、その動的振る舞いに関して多くの研究がなされている。環状多相発振回路を TDC の時間目盛りとして利用できると、変換速度、時間分解能が改善することが期待される。環状多相発振回路の各発振回路の選択に関しては、進行波の利用や、配列型発振回路の利用等が報告されている。また、フリッカー雑音に起因する位相雑音に関する研究や、位相雑音とジッタとの関係に関する研究等が行われている。しかしながら、環状多相発振回路を TDC へ応用する場合、高時間分解能化のためには、発振回路の位相雑音や発振モードの不安定性等の影響を軽減する必要がある。フリップフロップ回路での、素子雑音や素子偏差に起因する観測時間の偏差も軽減する必要がある。

[1]Y. Arai, T. Baba, IEEE Symposium on VLSI Circuits, 1988.

### 2. 研究の目的

素子偏差や雑音は、発振波形間の位相差を時間目盛りとする時間デジタル変換回路 TDC への応用では時間分解能の下限を与える。初期視覚モデルを応用した空間信号処理により時間分解能等の向上を図ることで、多様で高度なセンシング技術の実現が期待される。例えば、医療用イメージングのひとつである Time-of-Flight PET では、体内に取り込まれた放射性薬剤から発生する対消滅放射線を利用して、検出器への到達時間差により、放射性薬剤の位置を特定するが、進行方向に僅かな揺動があるため、PET 画像の解像度は 1mm が限界と言われていたが、次世代 PET の研究では、低ノイズで綺麗な画像を得るため、光検出器の時間分解能の改善について研究が始まっている。時間差計測に用いる TDC では、100 フェムト秒の時間分解能を実現する必要があり、画像解像度 0.1mm 以下に相当する放射線の到達時間差の時間分解能を有する次世代 PET の実現に寄与できるものと考えられる。本研究は神経細胞の応答のばらつきを許容する網膜の信号処理モデルである初期視覚モデルを応用し、TDC の回路要素を環状多相発振回路として、高速変換機能、高い時間分解能を有する高速時間デジタル変換回路の実現により、外界情報のセンシング技術を高度化する時間計測の手段を提供することを目的とする。

### 3. 研究の方法

初期視覚モデルのひとつである鳥類の網膜における神経回路は、左右の方向からの信号に対して異なった応答をする信号処理モデルの一つである。この初期視覚モデルを時間デジタル変換回路 TDC に応用するためには、TDC の構成要素である環状多相発振回路の各発振器の発振波形と神経細胞の空間的配置との対応づけが必要である。環状多相発振回路には、LC 発振回路をトランスコンダクタンス回路により結合した環状 LC 発振回路、分布定数線路を環状接続した進行波発振回路、遅延回路を環状接続した発振回路、遅延回路を環状接続した複数の発振回路を 2 次元配列し隣接した発振回路間が方向性結合されている発振回路、及び研究代表者等の提案しているデジタル回路で発振器を構成することのできる ORIGAMI 発振回路等がある。環状多相発振回路には様々な発振モードが存在するため、種々の環状多相発振回路について、発振の伝搬方向、発振モード等の動的振る舞いに関する考察およびシミュレーション実験を行い、特定の発振モードで発振する環状多相発振回路を考案する。次に、神経回路の特徴を生かした発振周波数の揺らぎや、素子偏差、温度変動に強靱で高精度な TDC のための信号処理方式を考案する。環状多相発振回路の各発振回路の瞬時出力値を神経細胞の活動度と見立てると、それぞれの発振回路の活動度は、位相差を一定に保ちながら循環しており、観測時刻を、活動度の最大値の位置である重心値とする信号処理の方法を鳥類の網膜における神経回路の動きを参考

にして考案する。

#### 4. 研究成果

(1) 種々の環状多相発振回路について、発振の伝搬方向、発振モード等のダイナミクスに関する考察およびシミュレーション実験を行い、TDC への応用に適した回路方式として、集積化に適した ORIGAMI 発振回路に着目した。この回路は、デジタル回路で発振回路を構成することが出来るが、発振波形の伝搬は双方向となっている。このままでは、発振モードの制御が困難となることが予想されたため、伝搬方向が一方向となるように回路を工夫した(図1)。

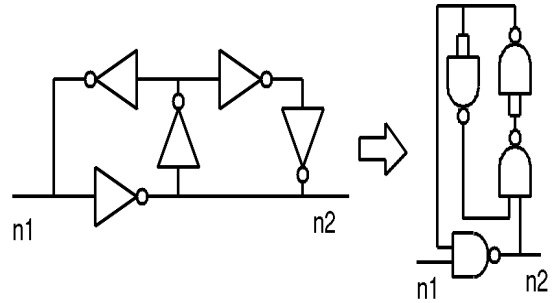


図1. ORIGAMI の単位回路とその改良回路

改良回路は接点 n1 に注入された前段回路の

信号に同期して発振をし、発振波形は、接点 n2 より後に続く回路への注入信号となるため、発振波形の伝搬方向は一方向性となる。この回路は、2重の3段の反転ゲートからなるリング発振器を構成しており、発振周波数は3段のリング発振器により決まるので極めて高い周波数で発振をし、かつこの回路をN個環状に接続しても注入同期の現象により発振周波数は低下しないため、TDCへの応用では高精度化が可能となる。なお、この回路は2つのゲートの出力を接続することがワイヤードORを構成していることから発想を得たもので、過大電流の防止の効果も付与されている。

(2) 初期視覚モデルは、網膜の情報処理の回路モデルであり、空間的な側方結合を通じて視細胞の応答を修飾している。図2に鳥類の網膜の神経回路の模式図を示す[2]。Bは双極細胞、Aはアマクリン細胞、Gは神経節細胞である。図のように回路の構造を左右の対称性を崩すことで、餌となるハチが左から近づいたときのみ認識できるようにすることができる。この仕組みを環状多相発振回路に応用するには、発振回路の空間的配置と、発振波形の順序を関連づける必要がある。N個の発振回路を環状に接続した環状多相発振回路は、発振の一周期の中にN個の波形が、少しずつ位相をずらして観測される。各発振回路の配置順序と、発振波形の生起順を発振モードと呼び、電源を投入時などの初期条件により発振のモードは変化する。そこで、発振モードの安定性に関する解析を行い、特定のモードで発振する方法を提案した。これにより、環状多相発振回路によるTDCに初期視覚モデルを応用することが可能となった。

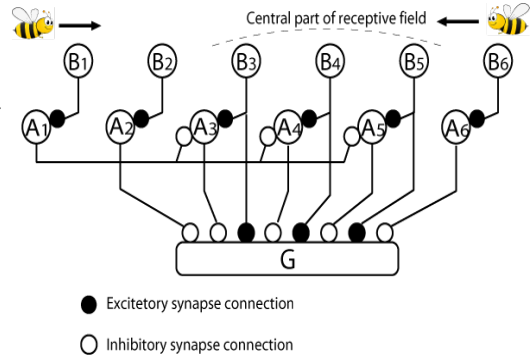


図2. 鳥類の網膜の神経回路

Correct data



Erroneous data



図3. 揺らぎや偏差による誤動作

(3) 環状多相発振回路のTDCへの応用では、各発振回路の発振波形の計測時刻での値を閾値電圧で○ と離散化し記憶するためのフリップフロップが備えられているが、計測時刻や発振波形の揺らぎ、閾値電圧の偏差等による影響を受ける。図3に揺らぎや偏差の影響がない場合とない場合の比較を示す。正しいデータでは○ の数の比は常に同じであり、また○ はそれぞれ連続して生起しているという先験的知識により、計測時刻の精度を向上させることができる。また、図4で示すように、鳥類の網膜の神経回路を模擬することで、閾値を高い電位から低い電位に遷移する場合と、低い電位から高い電位に遷移する場合を区別することができるので、偏差等の影響を緩和させることができる。

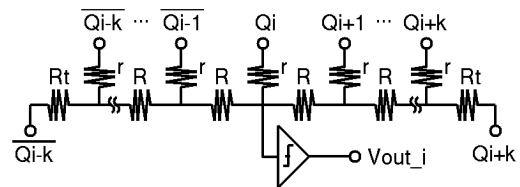


図4. 鳥類の網膜を模した回路

(4) 多相リング結合型発振回路の回路に差動インバータを導入することで、偶数段での発振が可能となった。これにより段数を様々な実用的応用を考慮した2のべき乗段とすることができる。解析によれば、この回路の結合行列の固有値の実部はすべて負値であるため、これまでの成果を適用することで、特定のモードで発振する回路とすることができた。図5にその回路を示す。

(5) 多相発振回路の応用として、N-path フィルタを用いたノッチフィルタを設計し、生体信号計測時問題となる商用電源混入などの同相雑音の影響を低減した。図6に提案回路を示す。提案回路の有用性を確認するために個別部品を用いた試作を行った試作品の評価結果から、提案回路では従来回路に比べておよそ30dB(約3.2倍)の商用電源雑音抑圧の改善が確

認できた。この成果によって、微小信号のより正確な計測が期待できる。

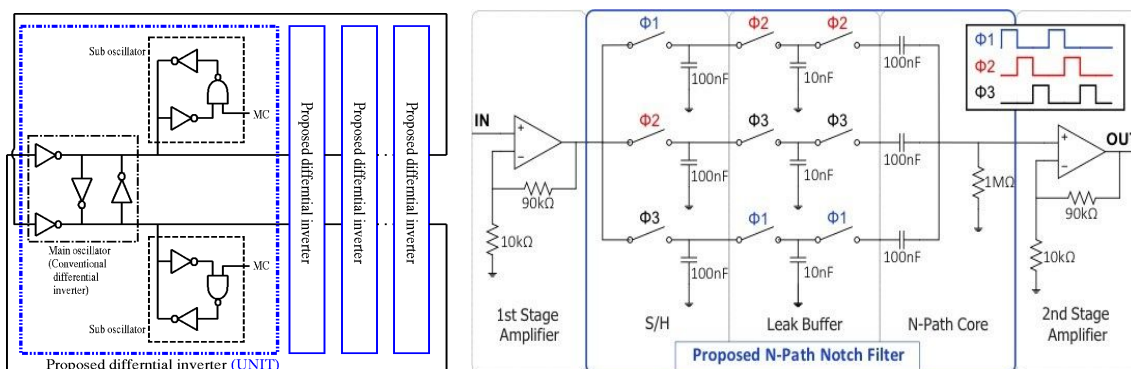


図5 .差動インバータ多相リング発振回路 図6 .同相雑音を低減するN-path ノッチフィルタ

[2] R. G. Runge, et al., "Electronic synthesis of the avian retina," IEEE Trans. BME, Vol.15, No.3, pp.98-103, July 1968.

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. 井出 凌太, 島 健, ニコデムス レディアン, "任意の整数比を有するスイッチトキャパシタ DC-DC コンバータの寄生容量電荷の再利用に関する実験報告", 電気学会論文誌 C, Vol.139, No.1, pp.36-42, 2019, 査読有, <https://doi.org/10.1541/ieejeiss.139.36>
2. Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, "Power Line Noise Reduction for Bio-sensing Applications using N-path Notch Filter", IEICE Trans. on Fundamentals, Vol.E100.A, Issue 2, pp.541-544, 2017, 査読有, <https://doi.org/10.1587/transfun.E100.A.541>

〔学会発表〕(計 21 件)

1. Tamiki Ohtsuka, Shun Kozuki, Takeshi Shima and Nicodimus Retdian, "Multi-phase ring-coupled oscillator for TDC using differential inverter", 3rd International Nordic-Mediterranean Workshop on Time-to-Digital Converters and Applications NoMe-TDC 2019, 2019
2. 岩田英知, 島 健, "LNA における周波数特性を含めた雑音除去性能の改善に関する研究", 電気学会電子回路研究会, 2018 年
3. Muhammad Arijal, Khilda Afifah, Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, "50-dB Hum Noise Suppression using 3-phase N-path Filter", 平成30年電気学会全国大会, 2018 年
4. Khilda Afifah, Muhammad Arijal, Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, "Investigation on 10-phase N-path Filter for Hum Noise Suppression", 平成30年電気学会全国大会, 2018 年
5. Khilda Afifah, Muhammad Arijal, Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, "Experiment on Hum Noise Suppression using N-path Notch Filter", IEEE Int. Symp. on Intelligent Signal Processing and Communication System, 2018
6. Khilda Afifah, Muhammad Arijal, Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, "Second-order N-path Notch Filter for Hum Noise Suppression", IEEE Int. Symp. on Electronics and Smart Devices, 2018
7. Khilda Afifah, Muhammad Arijal, Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, "Design of 10-phase and 3-phase N-path Filter for Hum Noise Suppression", 2018 Int. Conf. on Analog VLSI Circuits, 2018
8. Khilda Afifah, Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, "Analysis on the Effect of Charge Leakage on N-path Notch Filter", 平成30年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2018 年
9. ニコデムス レディアン, ムハマド アリジャル, キルダ アフィファ, "スイッチトキャパシタ回路を用いたハム雑音除去回路に関する研究", 平成30年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2018 年
10. Takeshi Shima, Shun Kozuki, Nicodimus Retdian, "Multiphase TDC inspired by the Early Vision Model", 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2018
11. Khilda Afifah, Muhammad Arijal, Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, "Investigation on 10-phase N-path Filter for Hum Noise Suppression", 電気学会電子回路研究会, 2018 年
12. Shun Kozuki, Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, "Experimental study of the oscillation mode of the coupled oscillator ORIGAMI for TDC", 2017 MIXDES - 24th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 2017
13. Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, "Compensation circuit using time-mode capacitance scaling", IEEE Int. Symp. On Electronics and Smart Devices, 2017
14. 上月 駿, 島 健, "ORIGAMI 発振回路の発振モードに関する実験報告", 電気学会電子回路研

研究会, 2017 年

15. ニコデムス レディアン, 島 健, “広い電源電圧範囲に適したバンドギャップリファレンス回路に関する検討”, 電気学会電子回路研究会, 2017 年
16. ニコデムス レディアン, “N-path フィルタを用いたノッチフィルタの一構成”, 電気学会電子回路研究会, 2017 年
17. ニコデムス レディアン, 渡邊 茂樹, 島 健, “CMOS 温度センサを用いた参照電圧源回路の検討”, 電気学会電子回路研究会, 2016 年
18. ニコデムス レディアン, 島 健, “N-path ノッチフィルタの解析および性能改善の検討”, 電気学会電子回路研究会, 2016 年
19. Nicodimus Retdian, Kousuke Ooi, Takeshi Shima, “Time-Mode Miller Compensation Circuit Using an Operational Transconductance Amplifier”, Int. Conf. on Analog VLSI Circuits, 2016
20. Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, “Power line noise suppression using N-path notch filter for EEG”, 2016 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 2016
21. Nicodimus Retdian, Takeshi Shima, “N-path notch filter with a 43-dB notch depth improvement for power line noise suppression”, 2016 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), 2016

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：ニコデムス レディアン

ローマ字氏名：Nicodimus Retdian

所属研究機関名：芝浦工業大学

部局名：国際理工学専攻

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：90401538

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。