「環境適応エネルギー・データ統合管理 IoT 基盤」 研究期間:2020年11月~2024年3月 研究者:新津 葵一

1. 研究のねらい

公開

本研究の狙いは、自身が置かれた環境に適応してエネルギーとデータを統合的に管理できる IoTの基盤技術を構築することである。具体的には、環境からのエネルギー収穫可能性を自律的 に判断し、データの保存・処理・暗号化などを最適に管理する技術の構築を目指す。

さらに、研究開発を通じて、環境発電からの電力のみで自立動作可能な IoT 基盤を構築し、それらを活用したユースケースを提案することで、カーボンニュートラル社会の実現に貢献することを目指す。提案する IoT 基盤技術を、実際の半導体集積回路上に実装し、実集積回路デバイス上での有効性実証を行う。

具体的な研究開発目標は、CPU コア(中央演算処理装置中核コア回路、Central Processing Unit Core)に頼らないエネルギー・データ統合管理 IoT 基盤技術の構築である。スマートフォン向けのアプリケーションプロセッサなどにおいては、使用しない要素回路ブロックの待機電力を減らすために CPU から制御信号が送られている。これは、いわゆる中央集権型のエネルギー管理方式である。

+分な性能の CPU コアや十分な計算リソースを有さない IoT においては、使用しない要素回 路ブロックの待機電力を削減することは困難であった。そこで、本研究においては中央集権型で はなく、独立分散型でのエネルギー管理方式の確立を目指す。

2. 研究成果

(1)概要

環境からのエネルギー収穫可能性に応じて、自律的に動作する、環境適応エネルギー管理 IoT 基盤集積回路ならびに環境適応エネルギー・データ統合管理 IoT 基盤集積回路の開発に 成功した。

環境適応エネルギー管理 IoT 基盤集積回路においては、環境光に応じて電源管理回路の 動作を最適する回路技術の開発に成功した。

環境適応エネルギー・データ統合管理 IoT 基盤集積回路においては、入力電源電圧に応じ て要素回路ブロックが自律的に活性化/不活性化されるため、消費電力の入力電源電圧依存性 を高めることに成功し、低入力電源電圧時に低消費電力化を達成した。

(2)詳細

環境適応エネルギー管理 IoT 基盤集積回路

図1において、提案する環境光からのエネルギー収穫を「環境光強度に応じて最適化」する 技術を示す。エネルギー収穫回路において、消費電力と収穫性能を可変にすることが可能なス ケーラブル動的リーク抑制回路技術を適用した。環境光の強度を検出して、検出結果を基にエ



ネルギー収穫回路の性能を最適化する。

環境光強度を検出用フォトダイオードで検出し、その検出結果を基に、SOVD(Self Oscillating Voltage Doubler:自己発振型電圧昇圧回路 *環境光からの出力の 0.4V のま までは、一般的な IoT 要素回路の駆動が難しいため、2倍程度の電圧に昇圧する回路を搭載 する)の制御電圧を最適化する。



図 1 提案した環境適応型エネルギー収穫回路

図2と図3において、具体的な実装回路図を示す。図2がSoVD回路、図3がSoVD回路を 構成するインバータ回路である。SoVD回路は、インバータ回路と遅延ブロック回路、キャパ シタから構成される。

環境光発電素子からの出力電流(図3における I_solar)に応じて、SDLS logic inverter (Scalable Dynamic Leakage Suppression inverter)の制御電圧を最適化する。







図 3 提案する環境光適応インバータ回路

図4において、そのシミュレーション結果を示す。TSMC 22nm 超低リーク電流 CMOS プロ セスで回路を構成して、シミュレーションを実施した。環境光に応じて制御電圧が最適化さ れることを確認した。研究成果を IEEE 主催の国際会議 LASCAS において発表した。



図 4 環境適応型エネルギー収穫回路技術の評価結果



環境適応エネルギー・データ統合管理 IoT 基盤集積回路

図5において、環境適応エネルギー・データ統合管理 IoT 基盤集積回路の回路アーキテクチャ図を示す。

エネルギー収穫対象とセンシングデータ取得対象が同一のシステム(発電とセンシングを一体 化して行うシステム)において、入力信号となる電源電圧の高低に応じて動作させる要素回路ブ ロックを自律的に最適化し、低電力化に寄与する手法を開発した。22nm CMOS プロセスでの 実半導体集積回路デバイスにおいて、有効性を実証した。



図 5 環境適応型エネルギー・データ統合管理 IoT 基盤集積回路の回路図

図6に試作した 22nm CMOS プロトタイプ半導体集積回路チップの写真と回路のマスクレイ アウトイメージを示す。小面積での実装に成功した。



図 6 22nm CMOS プロトタイプ半導体集積回路チップの写真と回路のマスクレイアウトイメージ



図7に半導体集積回路チップの評価結果を示す。電源電圧をデジタル値に変換する動作を 確認した。



図 5 環境適応型エネルギー・データ統合管理 IoT 基盤集積回路の実集積回路評価結果

	ISSCC'18	TBioCAS'19		BioCAS'19	This work	
Technology	180-nm Bulk CMOS	55-nm DDC CMOS	65-nm Bulk CMOS	180-nm Bulk CMOS	22-nm Bulk CMOS (Ultra Low Leakage, TGO Tr.)	
Topology	Delta-Sigma	Dual-Oscill	ators-Based	Burst Pulse Counting	SDAB & Probabilistic counter	SDAB & Thermo-binary encoder
Output	60dB SNDR	8-bit Code	9-bit Code	9-bit Code	9-bit Code	2-bit Code
Input Voltage Range	0.3 V	0.75-1 V	0.225-0.525 V	0.18-0.35 V	0.1-0.25 V (Simulation)	0.1-0.25 V
Footprint (mm²)	0.1 mm² (w/ I/O Pads)	0.0047 mm ²	0.0032 mm ²	0.018 mm²	0.0069 mm ² Osc.: 0.00024 mm ² SDAB: 0.0036 mm ² Counter: 0.00306 mm ²	0.00028 mm ² Osc.: 0.00024 mm ² SDAB: 0.000018 mm ² Encoder: 0.000022 mm ²
Footprint (F ²)	3,090,000 F ²	1,550,000 F ²	757,000 F ²	556,000 F ²	14,300,000 F ²	579,000 F ²
Conversion Time	N/A	6.2 s @ 0.75V	2.9 s @ 0.25V	117-673 ms @0.18-0.35 V	510 ms @ 0.175V (Simulation)	2.13 ms @ 0.175V (Simulation)
Power Consumption	180 nW @ 0.3 V	30.2 nW @ 0.75 V	32.8 nW @ 0.25 V	4.5 nW @ 0.3 V	122.5 – 426.1 pW Osc.: 0.5-1.1 pW SDAB: 34-170 pW Counter: 88-255 pW @0.1-0.25 V (Simulation)	0.9 – 2.6 pW Osc.: 0.5-1.1 pW SDAB: 0.2-1.0 pW Encoder: 0.2-0.5 pW @0.1-0.25 V
Necessary Glucose-Fuel- Cell Area (Tear)	18,000 mm²	3,020 mm²	3,280 mm ²	450 mm²	42.6 mm ² (Accommodable in contact lens)	0.26 mm ² (Accommodable in contact lens)
Application	Glucose- powered skin- patch-type	Light-powered CGM contact	Light-powered CGM contact	Light -powered CGM contact	Glucose-powered- and-sensed CGM contact	Glucose-powered- and-sensed CGM contact
or color of the ter (a) of t						

表1に、性能比較を示す。従来技術に比べて、大幅な電力削減・小面積化を達成した。



3. 今後の展開

今後は、本さきがけで開発した IoT 基盤技術を基盤技術としてさらに発展させていき、低電力化 技術における1分野を築くことを目指す。

さらに、IoT 基盤技術を活用した IoT プラットフォーム・サービスを実証することを目指していく。 具体的なアプリケーションとしては、持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズや、体内センシ ング機能付きのデジタル錠剤、体内モニタリング機能付きのスマートステントなどの特定の応用に 向けて、IoT 基盤技術を活用してその有効性を実証していく。

4. 自己評価

研究開発において、当初の目標である環境に適応して動作を最適化する技術の開発に成功することができた。研究開発を通じて、先端半導体集積回路プロセスへのアクセスに成功し、12nm FinFET CMOS や 22nm CMOS プロセスでの設計・試作を行うことができた。今後、知的財産の取得並びに、セキュリティ性についても加味した研究開発を進めていくことが必要であると考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1)代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 33件

H. Kitaike, M. Inada, M. Terauchi, H. Tagawa, R. Nagai, S. Xu, R. Zhang, K. Liu, and K. Niitsu, "A 0.9-2.6pW 0.1-0.25V 22nm 2-bit Supply-to-Digital Converter Using Always-Activated Supply-Controlled Oscillator and Supply-Dependent-Activation Buffers for Bio-Fuel-Cell-Powered-and-Sensed Time-Stamped Bio-Recording", IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits (VLSI), pp. 1-2, Jun. 2024.

エネルギー収穫対象とセンシングデータ取得対象が同一のシステム(発電とセンシングを 一体化して行うシステム)において、入力信号となる電源電圧の高低に応じて動作させる要 素回路ブロックを自律的に最適化し、低電力化に寄与する手法を開発した。22nm CMOS プロセスでの実半導体集積回路デバイスにおいて、有効性を実証した。

2. G. Chen, Y. Wang, T. M. Quan, N. Matsuyama, T. Tsujimura and K. Niitsu, "A 0.5 mm² Solar Cell-Powered Biofuel Cell-Input Biosensing System with LED Driving for Stand-Alone RF-Less Continuous Glucose Monitoring Contact Lens", IEEE Solid-State Circuits Letters (SSC-L), vol. 5, pp. 41–44, Feb. 2022.

電源収穫可能性の高い、室内光が得られる環境において自立動作する IoT 基盤の開発を 行った。室内光から得られる電力を蓄積して、LED を駆動することに成功した。

3. X. Chen, G. Chen, X. Yu, Y. Wang and K. Niitsu, "A 52.3% Peak Efficiency 22nm CMOS Low-Power Light-Adaptive Self-Oscillating Voltage Doubler Using Scalable Dynamic Leakage-Suppression Logic," IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS 2022), Mar. 2022.

環境光からのエネルギー収穫を「環境光強度に応じて最適化」する技術を提案した。エネル



ギー収穫回路において、消費電力と収穫性能を可変にすることが可能なスケーラブル動的リ ーク抑制回路技術を適用した。環境光の強度を検出して、検出結果を基にエネルギー収穫回 路の性能を最適化する。

(2)特許出願

研究期間全出願件数:0件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. IEEE Circuits and Systems Society, ISCAS 2023 Best Paper Recognition, "A Battery-Less 0.37 V 126 nW 0.29 mm2 65-nm CMOS Biofuel-Cell-Modulated Biosensing System Featuring an FSK-PIM-Combined 2.4 GHz Transmitter for Continuous Glucose Monitoring Contact Lenses", May 2023.

2. 第 10 回京都 SMI 中辻賞(特定非営利活動法人 京都 SMI)、「バイオ発電と 省電力半導体集積回路を用いた電力自立ヘルスケア IoT」、2023 年 1 月

3. ASP-DAC 2022 Best Design Award, "A 0.5 mm2 Ambient Light-Driven Solar Cell-Powered Biofuel Cell-Input Biosensing System with LED Driving for Stand-Alone RF-Less Continuous Glucose Monitoring Contact Lens", Jan. 20, 2022.

