

倒立振子ロボットと自律走行ロボットを用いた制御復帰実験による 電源断時の短時間リカバリに向けた不揮発性メモリ積層 LSI の性能試算

松尾 俊輝[†] 青柳 昌宏^{††} 大川 猛^{††}

[†]熊本大学大学院自然科学教育部 〒860-0862 熊本市中央区黒髪 2 丁目 39 番 1 号

^{††}熊本大学半導体・デジタル研究教育機構 〒860-0862 熊本市中央区黒髪 2 丁目 39 番 1 号

E-mail: [†]snk0225@icloud.com. ^{††}ohkawa-takeshi@kumamoto-u.ac.jp

あらまし ロボットや IoT デバイスの信頼性向上に向け、プロセッサと不揮発性メモリを TSV(シリコン貫通電極)で接続する三次元積層 LSI 構成を提案する。実機検証として倒立振子ロボットおよび自律走行ロボットを用いた制御復帰実験を実施した。さらに、提案する三次元積層 LSI を想定した性能試算を行い、本手法のデータ退避・復元時間の短縮効果や、退避時の消費エネルギーの低減効果について報告する。

キーワード 三次元積層 LSI、不揮発性メモリ、ロボット制御、短時間リカバリ

1. はじめに

近年、ロボットや IoT デバイスの活用が急速に進む一方で[1][2], 予期せぬ電源遮断のリスクが課題となっている[3][4]。DRAM や SRAM などの従来の揮発性メモリを用いたシステムでは、電源遮断時にデータが消失し、再起動や初期化に時間を要する。特に姿勢制御を伴う二足歩行ロボットやロボットアームにおいて、再起動の待ち時間にバランスを失うことは転倒による機器の破損や二次被害を招く致命的な問題である。

一方で半導体分野では、微細化の物理的限界を解決するアプローチとして、チップを TSV (Through Silicon Via) で垂直に積層する三次元積層技術が注目されている。本技術は配線長を短縮し、広帯域・低遅延かつ低消費電力なデータ転送を実現する次世代の実装技術である[5]。

以上の背景から、プロセッサと不揮発メモリを垂直方向に積層することでデータの高速な退避・復元が可能となり、電源遮断からの迅速なシステム復旧の実現が期待される。

2. 研究目的

本研究の目的は、三次元積層技術により不揮発性メモリを積層化したプロセッサ構成を提案し、ロボット制御における電源断からの短時間リカバリの実現可能性を検証することである。具体的には、姿勢制御に厳しいリアルタイム性が求められる倒立振子と自律走行ロボットであるマイクロマウスを評価対象とする。

電源遮断から復帰までの一連の動作において、積層メモリへのデータ退避・復元に要する時間と、ロボットが転倒に至るまでの猶予時間を比較・試算し、本提案手法によってロボット IoT システムにおいて電源断からの短時間リカバリへの有効性を評価する。

最終的に、本研究の成果は、不安定な電源環境下で

も自律的に動作を継続できる、高信頼かつ高可用な次世代ロボット IoT システムの基盤技術構築に貢献することを目指す。

3. 提案システムの全体構成

本研究で提案する、TSV 技術により次世代メモリを三次元積層する超並列バスモデルの概念図を図 1 に示し、全体構成について説明する。

三次元積層の核となる技術が TSV (Through-Silicon Via: シリコン貫通配線) である。TSV は、シリコンチップの内部を垂直に貫通する微細な配線であり、積層されたチップ同士を最短距離で接続する役割を果たす。従来の積層手法 (ワイヤボンディング) では、チップの端から外部へ配線を引き出す必要があったため、配線長が数 mm 以上と長くなる傾向があった。TSV を用いる場合、チップの任意の位置から垂直に信号を入出力できるため、配線長をワイヤボンディングと比較して 1/100 から 1/1000 以下に短縮することが可能である [5] 。

また、EEPROM や Flash メモリなどの従来の不揮発メモリは、低価格で高集積化に適する反面、データの書き換え時には消去動作を必要とすることや、書き換え回数に上限があるという課題がある。これに対し、データを電荷ではなく、磁気や強誘電体の分極といった現象を利用する MRAM や FRAM などは高速動作が可能であり、消去動作を必要とせずに上書きが可能であるため、実用化が進んでいる。

提案構成は、プロセッサの直上に MRAM や FRAM といった高速な読み書きが可能な次世代不揮発メモリを配置し、TSV を用いて接続する三次元積層構造である。本構成では、物理的な配線距離の短縮により、従来の基板上での配線と比較してデータ転送を高速化し、この TSV による通信と次世代不揮発メモリの高速性

を組み合わせることで、ロボットのセンサデータや制御計算データを瞬時に退避、復元し、システムの短時間リカバリを実現することを目指す。

なお、このシステムには電源断検知回路とバックアップ電源の存在を想定する。

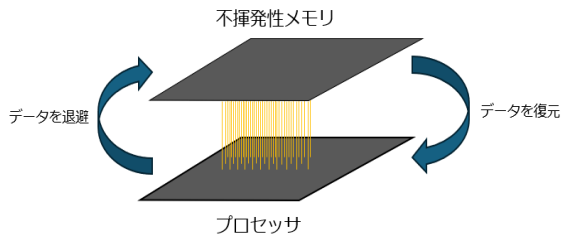


図1 提案する超並列バスモデルの概念図

4. 倒立振り子ロボットと自律走行ロボットを用いた制御復帰実験

4.1 疑似電源断システムの構築

本研究では二輪倒立振り子型ロボットであるヴィストン社製の Beauto Balancer2 [6]と自律走行ロボットであるアールティ社製のマイクロマウス Pi:Co Classic3[7]を用いた。なお、動作中のロボットに対して意図的な電源断が起きた状況を再現するため、ソフトウェア制御による疑似電源断システムを構築した。

本研究における疑似電源断とは、実際に電源供給を遮断するものではなく、モータ制御を停止させることで制御不能状態を模擬するものである。以下に倒立振り子ロボットとマイクロマウスについて実装手法を説明する。

4.2 倒立振り子ロボット

使用した倒立振り子ロボット(Beauto Balancer2)を図2に示す。



図2 Beauto Balancer2

構築した疑似電源断システムは Beauto Balancer2 の開発環境に含まれるヘッダーファイル Balancer2.h 内で定義されている関数を利用した。具体的には、指定した時間だけ待ち状態にする Wait 関数と、モータへの電流制御を無効にする CurrentControlDisable 関数を使用した。図3に実装した疑似電源断システムのプログラムを示す。

```
While(1){
    uint8_t updateVS_C3 = CycleProc();
    unsigned short current_pad_btn =
        memmap.values.PAD_BTN;
    if( ((current_pad_btn & 0x020 != 0)
        && ((old_pad_btn & 0x0020) == 0) ){
        CurrentControlDisable();
        CycleProc();
        Wait(98);
        CurrentControlEnable();
    }
    else{
        Control();
    }
    old_pad_btn = current_pad_btn;
```

図3 疑似電源断のプログラム

図3のプログラムについて説明する。構築したシステムは、通常の倒立制御中に専用のコントローラのボタンを押すことによって疑似電源断が起きるようにした。ボタンを押す間、連続して疑似電源断処理が実行されないように現在のボタンの状態 current_pad_btn と1周期前のボタンの状態 old_pad_btn を比較し、前回は押されておらず、今回は押されている状態のみを検出することによって、ボタンを押した瞬間だけ疑似電源断処理が実行されるようにした。

トリガを検知した場合、CurrentControlDisable によってモータへの電流制御を無効にする。次に CycleProc 関数を実行し、PC へ振子の角度や角速度などの情報を送信し、疑似電源断直前の振子の状態をログで確認できるようにした。CycleProc 関数は 2ms ごとに値を返す関数であり、センサ情報の取得や PC へのログ送信などの処理を実行する。その後、Wait 関数でモータへの電流制御が無効になった状態のまま待ち状態に入る。図2では Wait (98) となっているが、CycleProc で 2ms モータが停止するので、合計で 100ms だけモータを停止させることができる。Wait 関数による待ち時間が経過した後は CurrentControlEnable 関数を実行し、モータへの電流制御を再開させ、通常の倒立制御に戻る仕組みになっている。

なお、オシロスコープを用いて電源断時間の測定を行い、精度を確認した。

4.3 マイクロマウス

本研究で使用したマイクロマウス用の迷路を図4に示す。



図4 使用した迷路

本研究では4×4の迷路を使用した．なお，ロボットの状態や迷路情報をPC上で確認するためのROS 2用可視化ツールであるRViz2を使用した．

本システムはマイクロマウス(Pi:Co Classic3)，Wi-Fiネットワーク，およびROS 2環境を構築したPCによって構成され，マイクロマウスのマイコンでは，micro-ROSが動作する．迷路を走行中，マイクロマウスは自身の位置，車輪の回転量や探索によって得られた壁や柱などの迷路情報をトピックとしてパブリッシュする．PC側で起動する可視化ツールのRViz2は，サブスクリバとしてこれらのトピックを受信し，画面上にロボットの軌跡や迷路の3Dオブジェクトを同期して表示する仕組みとなっている．迷路の探索手法には足立法を用いた．

なお，本研究ではこの足立法による探索動作を元に疑似電源断システムを構築した．前半と後半に分けて説明する．図6に構築したシステムの前半部分のフローチャートを，図7に後半部分のフローチャートを示す．

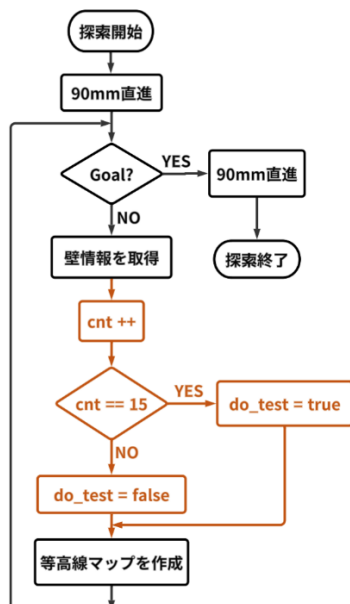


図6 構築したシステムの前半部分のフローチャート

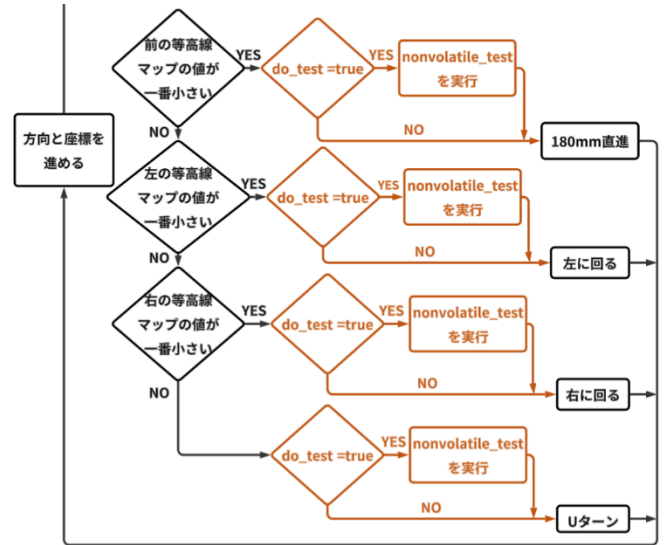


図7 構築したシステムの後半部分のフローチャート

図6，図7において，本研究において新たに構築した部分に色を付けた．

図6について説明する．疑似電源断のトリガとして，走行区画数を計測するカウンタを実装した．マウスが1区画進むごとにカウンタを増加させ，値が15に達した時点でdo_testをtrueにする．次に図6について説明する．等高線マップを更新した後にdo_testがtrueだった場合に疑似電源断処理(nonvolatile_test)へ移行する．それまでは通常の足立法に基づく迷路探索を実行する．

疑似電源断処理(nonvolatile_test)での処理内容について説明する．まずモータおよびタイマの動作を停止させ，探索によって構築した地図情報をマイコン内のFlashメモリへ退避する．データの退避完了後，リセット関数を用いてシステム上の地図情報を初期化する．この関数では，ループ処理を用いて迷路全体の壁情報をすべて未知状態で上書きする．

続いて，消去された壁情報をPC上で確認するため，迷路サイズに基づく2重ループ処理を用いて全区画の壁情報を読み取り，RViz2へ送信する．その後，Flashメモリから退避した地図情報を復元し，同様の送信プログラムを用いて復元後の壁情報を再度RViz2へ送信する．これにより，地図データの消失と復元の過程をRViz2上で可視化する．最後にモータの駆動を再開し，探索動作へ復帰する．

5. 評価

5.1 評価目的

本研究の目的は，提案する不揮発性メモリ積層LSIを用いた短時間リカバリシステムの有効性を定量的に評価することである．本評価では，要件の異なる2つのロボットを用いた事例検証と，三次元積層メモリモ

デルでの試算を行った。

倒立振子ロボットを用いた実験は、常に姿勢制御が求められるシステムを想定し、疑似的な電源断時間を変化させることで転倒せずに制御復帰が可能な電源断時間を明らかにすることを目的とした。

マイクロマウスを用いた実験は、自律移動とマップデータ等の内部状態保持が求められるシステムを想定し、疑似的な電源遮断後も迷路探索タスクが継続可能であるかを検証することを目的とした。

さらに、三次元積層メモリモデルでの試算を行った。具体的には、不揮発性メモリへのデータの退避・復元時間、およびその際の消費電力量について従来手法と比較した。これらの評価を通して、提案手法がリカバリ限界時間内での高速なシステム復帰を実現し、かつ消費電力の観点でも従来手法に対し優位性を有することを試算によって実証した。

5.2 倒立振子システム

5.2.1 評価方法

倒立振子ロボットを用いた評価手順について説明する。第一段階として、疑似電源断時間を 100ms 刻みで増加させながら各設定時間において 10 回ずつ試行し、式(1)を用いて復帰率を算出した。

$$\text{復帰率} [\%] = \frac{\text{復帰できた回数}}{\text{試行回数}} \times 100 \quad (1)$$

この試行は復帰率が 0%になるまで繰り返した。第二段階では、第一段階で特定した転倒の境界領域において、電源断時間を 10ms 刻みとし 30 回ずつの詳細な探索を行った。以上の手順により、リカバリ可能な最大の疑似電源断時間を決定した。

なお、本実験では電源電圧低下に伴うモータ出力の変化による影響を排除するため、電源には充電式乾電池を使用し、10 回の試行ごとに満充電された電池と交換した。

5.2.2 評価結果

倒立振子を用いた実験結果を図 8、図 9 に示す。

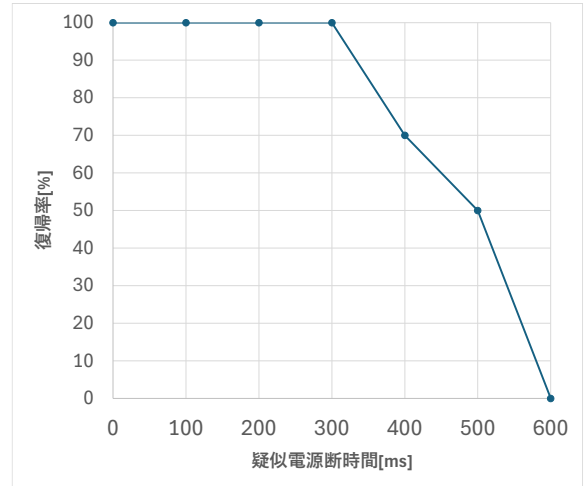


図 8 疑似電源断時間と復帰率の関係(100ms 刻み)

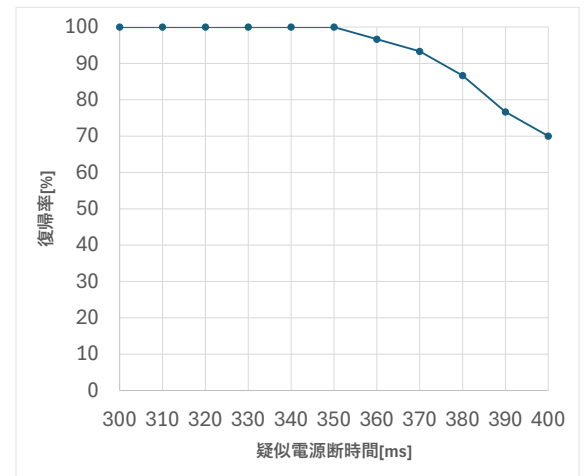


図 9 疑似電源断時間と復帰率の関係(10ms 刻み)

5.3 マイクロマウスシステム

5.3.1 評価方法

マイクロマウスを用いた評価手法について説明する。実装した疑似電源断モードを用いて迷路探索を実施し、通常時と同様に探索を完了できるかについて、Rviz2 を用いて検証した。

5.3.2 評価結果

マイクロマウスを用いた実験結果として、疑似電源断直前、疑似電源断直後、復帰直後の Rviz2 の表示を図 10、図 11、図 12 に示す。

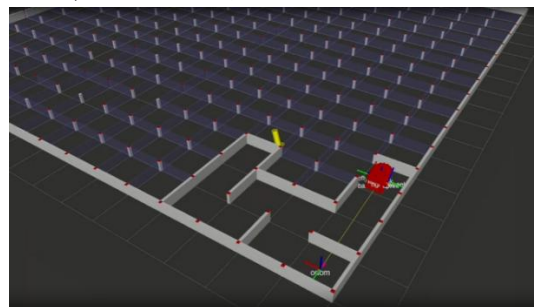


図 10 疑似電源断直前の Rviz2 の表示

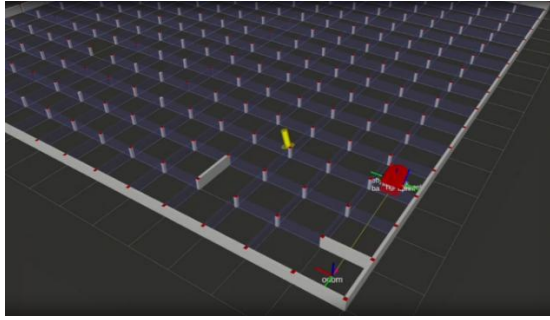


図 11 疑似電源断直後の Rviz2 の表示

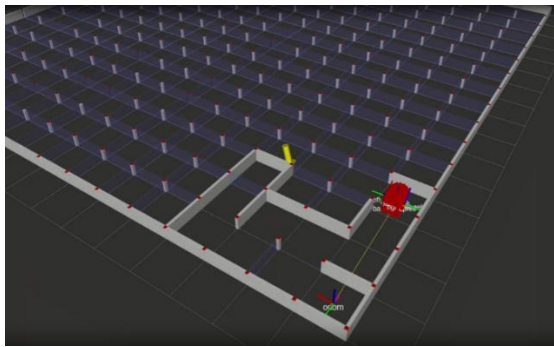


図 12 復帰直後の Rviz2 の表示

5.4 三次元積層メモリモデルと試算結果

5.4.1 試算条件

データ退避，復元時間と退避時の消費電力量の試算条件について説明する．

本研究では従来手法である Flash メモリや MRAM を平面実装するモデルと，提案手法である TSV 技術により次世代メモリを三次元積層する超並列バスモデルを比較対象とした．退避時間とはデータをメモリへ転送し，書き込みが完了するまでの時間であり，復元時間とはメモリからデータを読み出し，転送が完了するまでの時間である．

退避・復元させるデータについて倒立振子ロボットではセンサデータ合計 64Byte，マイクロマウスでは環境地図と自己座標の合計 258Byte を想定した．なお，EEPROM は MICROCHIP(25AA256)[8]を，Flash メモリは Micron(M25P16)[9]を用いて試算を行った．動作電圧は 3.3V，動作周波数について Flash メモリは 75MHz，EEPROM は 10MHz とする．なお，消費電力量の試算方法は式(2)によって求めた．

$$E[J] = V[V] \times I_{Write}[A] \times T_{Write}[s] \quad (2)$$

式(2)において，E は退避時の消費電力量，V は動作電圧(3.3V)， I_{Write} は書き込み電流， T_{Write} は書き込み時間である．

続いて，製品化されている次世代の不揮発メモリについて試算を行う．本試算には，

EVERSPIN 社製 MRAM(MR4A16B)[10]，CYPRESS 社製 FRAM(FM22L16)[11]，Micron 社製

PCRAM(NP8P128)[12]を用いた．これらの製品化されている次世代の不揮発メモリの通信方式はパラレル通信であり，バス幅はすべて 16bit である．

退避，復元するのに要する時間は，退避するデータを各メモリのバス幅に合わせて分割することで必要なアクセス回数を算出し，その回数にアクセス時間を乗じることで求めた．なお，消費電力量の試算には式(2)を用いて計算した．

次に，本研究で提案する TSV 技術により次世代メモリを三次元積層する超並列バスモデルの試算条件について説明する．TSV の動作周波数は 50MHz，データバス幅は 1024bit とした．積層する不揮発メモリのモデルには，東北大学が 2025 年に発表した次世代型磁気メモリ SOT-MRAM[13]のメモリセルの特性を用いた．表 1 に性能を示す．

表 1 次世代型 SOT-MRAM の性能[13]

書き込み時間[ns]	0.35
書き込み電圧[V]	0.46
書き込み電流[μA]	953
書き込みエネルギー[fJ]	156

先行研究[13]において読み出し時間の具体的な数値は示されていないため，本試算では，同研究で実証された書き込み時間に基づき，読み出し時間についても同等の 0.35 ns で動作可能であると仮定し，試算した．さらに基板配線および TSV の消費電力量の試算については，先行研究[14]の値を使用した．それぞれの消費エネルギー効率の値を表 2 に示す．

表 2 基板配線と TSV によるエネルギー効率[14]

	基板配線	TSV
エネルギー効率[pJ/bit]	65	1.7

なお，本研究の提案手法による退避時間と復元時間の試算にはアドレスデコーダやドライバなどの周辺回路での遅延時間を考慮していない．

5.4.2 試算結果

倒立振子を対象とした場合（退避データ：64 Byte）における，従来手法と提案手法の退避時間，復元時間および退避時のエネルギーの試算結果を表 3 に示す．

表3 処理時間とエネルギーの試算結果(64Byte)

	従来手法 (平面実装)				提案手法 (三次元実装)
	EEPROM	Flash	MRAM	FRAM	SOT-MRAM
通信方式	SPI	SPI	パラレル (16bit)	パラレル (16bit)	TSV (1024bit)
退避時間 [μs]	5050	167	1.12	1.76	0.0204
復元時間 [μs]	54.4	7.25	1.12	1.76	0.0204
退避時の 消費電力量 [μJ]	50000	8310	562	46.5	0.950

マウスを対象とした場合(退避データ: 258 Byte)における試算結果を表4に示す。

表4 処理時間とエネルギーの試算結果(258Byte)

	従来手法 (平面実装)				提案手法 (三次元実装)
	EEPROM	Flash	MRAM	FRAM	SOT-MRAM
通信方式	SPI	SPI	パラレル (16bit)	パラレル (16bit)	TSV (1024bit)
退避時間 [μs]	40600	678	4.52	7.10	0.0204
復元時間 [μs]	20600	27.5	4.52	7.10	0.0204
退避時の 消費電力量 [μJ]	402	336	2.30	0.22	0.0012

6. 結論・今後の展望

本研究では、ロボット制御における電源断からの短時間リカバリの実現を目指し、TSV技術を用いて不揮発性メモリを三次元積層したプロセッサ構成を提案した。さらに、倒立振子ロボットおよび自律走行ロボットを用いた予備実験、ならびに性能試算を行った。

試算の結果、倒立振子を対象とした評価では、MRAMを用いた既存の平面実装モデルと比較してデータ退避時間を約55倍短縮し、FRAMと比較して消費エネルギーを約49倍低減できるという試算結果が得られた。また、マウスを対象とした評価においても、退避時間を約221倍、消費エネルギーを約185倍削減できるという試算結果が得られた。

さらに、本研究ではRViz2を用いてデータの消失や復元の可視化を行ったが、一部の壁の復元ができないなど、データの完全な消失・復元の再現には至らない課題も確認された。さらに、本実験においてリカバリの対象としたのは地図情報のみに留まっている。これらの結果を踏まえ、今後は地図情報だけでなく自己位置や方向を含めた包括的なデータのリカバリを実現することが課題である。

加えて、TSV周辺回路を含めたシステム全体のより詳細な性能試算を実施するとともに、実際の電源断環境下において自律的に復帰可能なリカバリシステムを

実機ロボットへ実装していくことが今後の展望である。

謝辞

本研究は、内閣府地方大学・地域産業創生交付金「半導体産業の強化及びユーザー産業を含めた新たな産業エコシステムの形成」の助成を受けたものである。

また、本研究はJSPS科研費2K03095の助成を受けたものである。

文献

- [1] T. Suzuki and K. Tanaka, "Deep learning for image recognition," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.42, no.3, pp.123-135, March 2020.
- [2] F. Zeng, C. Pang, and H. Tang, "Sensors on internet of things systems for the sustainable development of smart cities: A systematic literature review," *Sensors*, vol.24, no.7, 2024, July 2024.
- [3] E. C. Chang, Y. W. Tseng, and C. A. Cheng, "Intelligent robust control design with closed-loop voltage sensing for UPS inverters in IoT devices," *Sensors*, vol.25, no.13, 3849, July 2025.
- [4] J. O'Keeffe, et al., "Adaptive online fault diagnosis in autonomous robot swarms," *Front. Robot. AI*, vol.5, 131, Nov. 2018.
- [5] Y. Fukushima, "Fundamentals of TSV formation and trends in three-dimensional integration," *Journal of the Japan Institute of Electronics Packaging*, vol. 25, no. 7, pp. 700-708, 2022 (in Japanese).
- [6] ヴィストーン株式会社, https://www.vstone.co.jp/products/beauto_balancer_2/, 2026/4/27 閲覧
- [7] 株式会社アールティ, <https://rt-net.jp/products/pico-classic3/>, 2026/4/27 閲覧
- [8] Microchip Technology Inc., "25AA256/25LC256 256K SPI Bus Serial EEPROM," from <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MPD/ProductDocuments/DataSheets/25AA256-25LC256-256K-SPI-Bus-Serial-EEPROM-20001822J.pdf>
- [9] Micron Technology, Inc., "Micron M25P16 Serial Flash Embedded Memory," from https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/6/9/4/M25P16.pdf
- [10] Everspin Technologies. 2018. MR4A16B 16-Mbit (1M × 16) MRAM. Retrieved January 1, 2026, from <https://www.everspin.com/file/156629/download>
- [11] Cypress. 2019. FM22L16 4-Mbit (256K × 16) F-RAM. Retrieved January 1, 2026, from <https://www.cypress.com/file/136476/download>
- [12] Micron. 2005. P8P Parallel Phase Change Memory (PCM). Retrieved January 1, 2026, from <https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/297/NP8P128A13BSM60E-pdf.php>
- [13] T. V. A. Nguyen et al., "Low write power and field-free sub-ns write speed SOT-MRAM cell with design technology of canted SOT structure and magnetic anisotropy for NVM," in *Proc. 2025 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, Monterey, CA, USA, May 2025.
- [14] S. Melamed et al., "Cool interconnect: A 1024-bit wide bus for chip-to-chip communications in 3-D integrated circuits," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 525-535, Mar. 2019.