

進化型・低消費電力AIエッジLSIの研究開発 Updatable and Low-Power AI-Edge LSI Technology Development

山内 圭介*1 渡邊 恵太*1 近藤 克弘*1 吉見 成弘*1 藤井 英樹*1 犬塚 浩之*1 小林 貢*1
Keisuke Yamauchi Keita Watanabe Katsuhiro Kondo Shigehiro Yoshimi Hideki Fujii Hiroyuki Inuzuka Mitsugu Kobayashi

*1 技術・開発本部 EC開発部

要旨 車載ECUでの制御技術の大規模化・高度化に対応するため、ハードウェアによる高速演算処理技術の開発を進めている。開発を加速するため、オープンイノベーションを活用してベンチャー企業と協業し、さらに半導体ベンダーを加えた三社で国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)事業に参画し、2018年10月から約2年半の間、進化型・低消費電力AIエッジLSIの研究開発を実施した。本報告では、そのプロジェクトの成果である進化型・低消費電力AIエッジLSIとそのLSIに実装するSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)ライブラリ及び、車載ECU開発について報告する。

キーワード: AIエッジLSI, LSI, 自己位置推定, SLAM, ECU

Abstract In order to respond to the large-scale and sophisticated control technology needs, we are developing advanced calculation processing technology. We have been promoting research and development of an updatable and low-power AI-edge LSI for 2.5 years since Oct. 2018 in collaboration with a venture company that uses open innovation, semiconductor company, and New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) to accelerate this development. This article describes the updatable and low-power AI-edge LSI, SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) library implemented in the LSI, and in-vehicle ECU.

Keywords: AI-Edge LSI, Localization, SLAM, ECU

1 はじめに

近年、グローバルでのAI・ロボティクス技術の進歩が速く、これまでのクラウドを使った集中処理から組み込みデバイス(エッジデバイス)を使った分散処理に変化している。これにより、自動車、産業車両、ロボットなどの社会インフラや産業に大きな変化が起こりつつある。

当社でも産業車両分野を中心に高度なロボティクス技術の開発が進んでおり、エッジデバイスである車載ECUでの制御技術の高度化による大規模なデータ処理が大きな問題となってきた。特に、周囲状況をセンシングしリアルタイムに自己位置推定を行うSLAM技術は、自動運転車両やロボットなどの自律走行制御に欠かせない技術であり、膨大な演算処理量が必要で、自動運転車両やさまざまなロボット応用に向けて、走行速度に応じたリアルタイム処理と、ターゲットシステムに実装できる小型化と低消費電力化が課題である。SLAMソフトウェア搭載の試作装置は産業用PCを使用し機能実現していたが、物流ロボットなどの製品搭載にあたり、産業用PCのままでは、消費電力、サイズ、重量、信頼性など多くの課題があった。

このような背景のもと、NEDO事業「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発／革新的AIエッジコ

ンピューティング技術の開発」に「進化型・低消費電力AIエッジLSIの研究開発」テーマで応募し大規模LSIの開発を進めることで課題解決を図った。

2 NEDO事業の概要とAIエッジLSI開発

2.1 NEDO事業概要

NEDOでは、ネットワークの末端(エッジ)側において低消費電力で高度な情報処理を行う「エッジコンピューティング技術」の実現を推進している。当社は株式会社ソシオネクスト、ArchiTek株式会社と共同でNEDO事業に応募し、人工知能(AI)認識処理、各種画像処理、およびリアルタイムSLAM処理の技術を開発することを目的とした研究開発テーマを推進した。

本開発テーマにおける各社の役割は以下の通り(図1)。

- ・ ArchiTek株式会社
仮想エンジンアーキテクチャによる画像・信号処理・AI基盤技術開発およびアルゴリズム記述ツール開発
- ・ 株式会社ソシオネクスト
量子化DNN技術開発およびAIエッジLSI試作開発
- ・ 当社
リアルタイムSLAM技術開発および車載ECU試作・評価

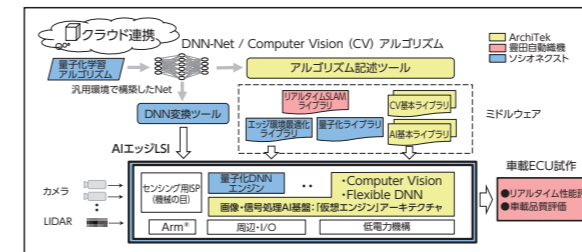


図1 研究開発の全体像
Fig.1 Overall picture of R&D

2.2 進化型・低消費電力AIエッジLSI

進化型・低消費電力AIエッジLSIには2つのAI処理エンジン(aiPE、量子化DNN)とISP、ARMマイコンを搭載する(図2)。

- aiPE: 各種画像、信号処理を高速に並列実行可能な進化型仮想エンジンアーキテクチャ技術
- 量子化DNN: AI認識処理を行う量子化ディープニューラルネットワーク(DNN)技術
- ISP: CMOSセンサカメラからの映像を高精度に補正する映像信号処理プロセッサ
- ARM: 電力効率に優れた汎用マイコン

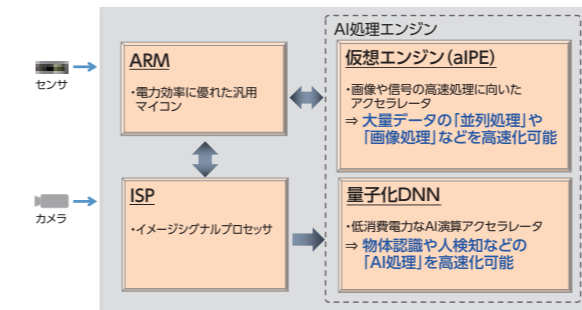


図2 進化型・低消費電力AIエッジLSI 構成図
Fig.2 Block Diagram of Updatable and Low-Power AI-Edge LSI

このLSIにより、低消費電力・小型・高信頼性・低コストの要件を満足するエッジコンピューティングシステムの構築が可能となり、物流やマシビジョン、セキュリティ・見守り、車載センシングシステムなどに適用することが期待されている。

試作したLSIの仕様決定においては、車載信頼性対応として、民生用で主流の0.5mmピッチではなく0.8mmピッチBGAパッケージの採用とともに、我々が開発を目指す車載ECUに必要なカメラやイーサネット、USB等々の周辺インタフェース回路を搭載することができた。

次に実施した研究開発内容を説明する。

3 リアルタイムSLAMライブラリ開発

3.1 概要

リアルタイムSLAMの自己位置推定処理ライブラリ開発について述べる。自己位置推定は産業車両の自律化を進めるうえで必要不可欠な技術であるが、組み込み向けの低消費電力なデバイスでは処理時間が長いことが課題であり、先に述べたように産業用PCで機能実現をしていた。

今回、AIエッジLSIの処理エンジンaiPEを活用することで、自己位置推定処理の処理時間を短縮した。開発は、産業用PCで開発していた自己位置推定ソフトウェアの解析、高速化のための再設計、AIエッジLSIへの実装、評価の順に進めた。

3.2 自己位置推定ソフトウェアの解析

産業用PCでの自己位置推定ソフトウェアの処理内容・処理時間を詳しく解析し、aiPEを活用できるか、高速化の見込みがあるかを検討した。その際、自己位置推定はリアルタイムで処理する必要があるため、さまざまなユースケースの中で処理負荷が最も高くなる条件を確認し、その条件のもとで解析を進めた。

aiPEは、画像処理のような大量のデータを同時並行に同一演算することが得意な処理エンジンである。自己位置推定ソフトウェアには、大量の自己位置候補点を生成し、それら候補点位置の確かさを確率的に計算するモンテカルロ法(図3)が使われていた。大量の自己位置候補点ごとに同じ計算を繰り返す処理に多くの時間がかかっていることから、aiPEが得意な処理であり、この処理をaiPEに実装すれば大幅な高速化が見込めることが確認できた。

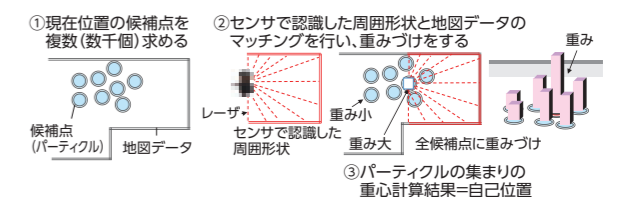


図3 モンテカルロ法による自己位置推定の概要^[1]
Fig.3 Localization using Monte Carlo Method^[1]

3.3 高速化のための再設計

aiPEは、入力データと演算命令を入力として、演算実行する処理エンジンである。マイコンで実行する処理とaiPEで実行する処理が混在した場

合、データ転送がボトルネックとなることが懸念されるため、aiPEで実行する処理はまとめて実行することが望ましい。しかし、従来の自己位置推定ソフトウェアでは、並列に同一演算を繰り返すaiPEに適した処理と、条件によって演算内容が変わるマイコンに適した処理が混在する構成となっていた。

そこで、高速化に向けて、aiPE向けの処理をまとめて実行できるようにソフトウェアを再設計した。また、マイコン向けの処理についても、並列演算に変更可能なアルゴリズムは条件分岐等の見直しを行い、aiPEを活用できるように再設計した。これらの工夫により、自己位置推定のほとんどの演算がaiPEで処理可能となり、大幅な高速化が見込めるソフトウェアとすることができた。

3.4 AIエッジLSIへの実装

実装は、図4に示すように段階を踏んで実施した。

まず、変更したアルゴリズムが変更前と同等の機能を実現できているか確認するため、再設計後のソフトウェアをマイコンで実行し、同等の機能であることを確かめた。

次に、aiPEで自己位置推定に必要な演算ができるライブラリを開発した。ライブラリは、自己位置推定の主要な演算を記述するソフトウェアを、aiPEの命令コードに変換することで実現する。ソフトウェアで実行した場合と、aiPEを使用するライブラリで実行した場合で、自己位置推定の演算結果が一致することを検証し、ライブラリが問題なくLSIへ実装できていることを確認した。

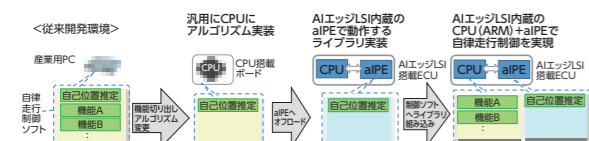


図4 LSIへの実装ステップ
Fig.4 Implementation step on LSI

3.5 リアルタイムSLAMライブラリの評価

AIエッジLSIにライブラリを実装した状態で評価を実施した。評価は、aiPEで実行する自己位置推定処理ライブラリ単体評価と、自律走行制御ソフトウェアに組み込んだ評価をそれぞれ実施した。

ライブラリ単体評価の結果、自己位置推定にかかる処理時間が高負荷条件でも目標処理時間に対

して十分高速化できていることが確認できた。

自律走行制御ソフトウェアに組み込んだ評価では、今回開発したライブラリの演算結果を使用して自律走行制御を行うことができ、システムとして期待動作することを確認できた。システムを同条件で動作させて、マイコンのみで演算した場合、aiPEを活用したライブラリで演算した場合、産業用PCで演算した場合のそれぞれの自己位置推定の処理時間を比較した結果を図5に示す。産業用PC以上の性能を実現できていることが確認できた。これにより、様々な産業車両に活用できるリアルタイムSLAMライブラリを開発することができた。

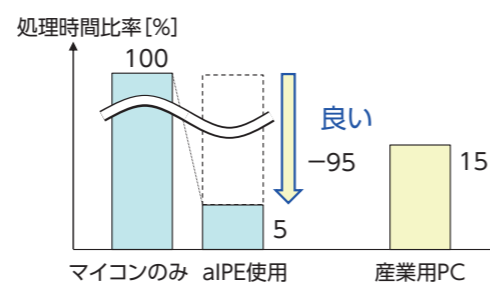


図5 自己位置推定処理時間の比較
Fig.5 Comparison of Localization time

4 誘導制御ECUの開発

4.1 誘導制御ECU

誘導制御ECUは、トヨタL&Fカンパニーの自律モバイルロボットAiR (Autonomous Intelligent mobile Robot) やAGFなど、自律走行を行う産業車両(写真1)向けに開発したECUである。

本ECUの開発では、2章に記載したようにECUとして必要なインターフェースをAIエッジLSIに織込むことから始めた。その際には、AiRでは使用しない2つのカメラ入力も仕様に加えており、画像入力によるSLAMや画像解析による物体認識などを必要とする製品への展開も可能なように工夫をしている。



写真1 自律モバイルロボットAiRとAGF
Photo1 Autonomous Intelligent Robot AiR & AGF

4.2 ECU構成と課題解決

■ECU構成

誘導制御ECUは、汎用マイコンと複数の処理エンジンを搭載したデバイスであるAIエッジLSIを核としており、一般的なPCに近い構成である(図6)。

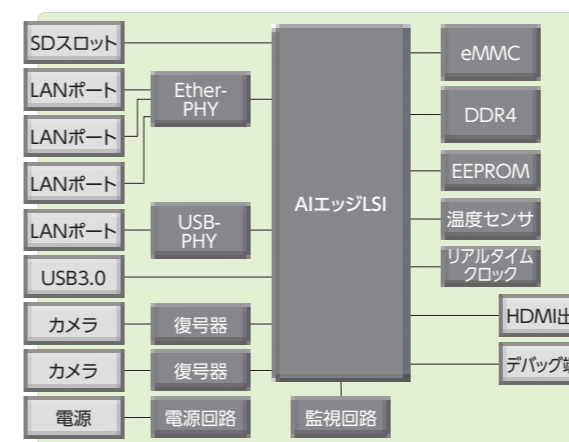


図6 誘導制御ECUブロック図
Fig.6 Circuit block diagram of ECU

そのため、従来の車載ECUに比べて、

- ・DDR4メモリやLANなど高速信号インターフェース搭載
 - ・LSIなどの発熱の多いデバイスを集積
- といった課題があり、その解決を行った。

■メモリ周辺設計

AIエッジLSIのインターフェースは、接続先機能の信号ごとに特性インピーダンス Z_0 が設定されている。 Z_0 は基板素材の誘電率など複数のパラメータで決定されるが、その一つに配線幅があり、一般的に配線幅を調整することで信号に適した Z_0 を実現する。

また、車載向け基板においては、配線の熱収縮による破断を回避するため、配線幅は $100\mu\text{m}$ が下限となる。

今回の設計において、DDR4メモリ信号に設定される Z_0 から配線幅を計算したところ、 $100\mu\text{m}$ を下回ることがわかった。配線幅以外の Z_0 を決定するパラメータは基板の製造要件に起因する固定値であるため、それらで Z_0 を調整することは不可である。そのため、配線幅を $100\mu\text{m}$ とし、配線に接続される終端抵抗の調整と配線パターンのシミュレーションの活用によって、通信品質を満足する信号波形^[2]を得ることで解決した(図7)。

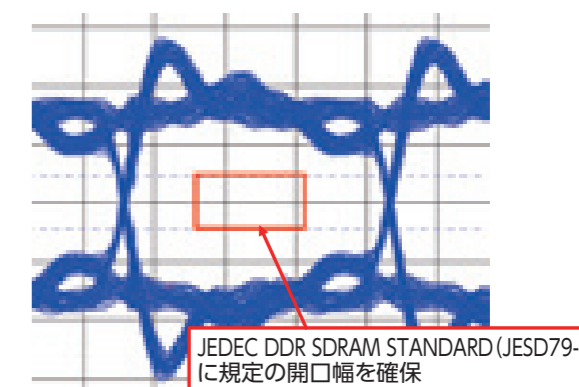


図7 メモリ信号波形
Fig.7 Waveform of memory signal

■放熱改善による自然空冷化

産業用PCは、ファンを用いた強制空冷を行っている。しかし、製品化においては、ファン故障やほこりの蓄積を考慮すると自然空冷のほうが望ましい。

AIエッジLSIは、一般的なPC用CPUに比べて消費電力が少ないため、放熱方法を工夫することで自然空冷を実現できないか検討した。まずLSIや発熱部品は基板の筐体に近い面に搭載し、放熱シートによって筐体に熱を逃がす構成を採用した。次に、発熱部品の分散配置について熱シミュレーションを繰り返しての検討を行い、熱の平坦化と筐体への効果的な放熱が可能な配置を見出した。これらの対策により、自然空冷を実現した(図8)。

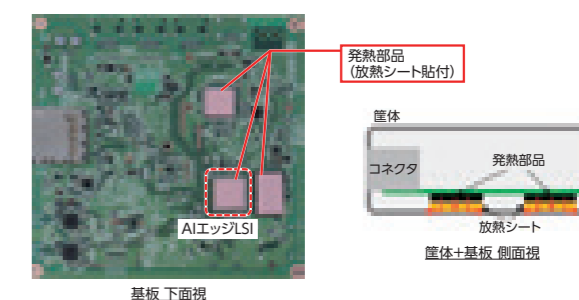


図8 放熱構造
Fig.8 Radiothermal Structure

4.3 信頼性試験

信頼性試験は、産業車両の技術標準を満足することを目標に評価を行った。

特に、産業車両は振動/衝撃条件が厳しく、かつAIエッジLSIはパッケージがBGAのため振動や衝撃に対して十分に考慮する必要があり、いくつかの対策を施すこととした。

1つめは、放熱のために採用した放熱シートの選定である。放熱シートは材質などにより硬さも

圧縮荷重も異なるため、クッション性が高い製品を選定した。同時に、経年劣化による弾性低下、難燃性なども考慮している。

2つめは、AIエッジLSIの周りにサイドフィルを塗布して固定する対策である。サイドフィルは硬すぎると割れてしまうため、適度な弾性のある材質を採用した。また、LSIと基板の間を密封することになるため、防湿性があり、難燃性もある材質を選定している。

3つめは、基板固定穴の荷重が均等にかかるように固定穴と等間隔となる位置にAIエッジLSIを配置した。

これらの対策により、産業車両の振動/衝撃試験を満足することができた。

以上のような対策や工夫を行い、要求性能を満足する誘導制御ECUを開発した。

5 まとめ

今回NEDO事業に応募することにより、当社単独では開発が非常に困難であった大規模演算処理を高速に処理できるカスタムLSIの開発を実現した。

本テーマにより開発したLSIは株式会社ソシオネクストでの製品化が進んでおり、このLSIを搭載したECUを開発したことで、今後加速度的に進む事が予想される制御・演算高速化の基盤技術を手の内化することができた。

今後、本ECUはトヨタL&Fカンパニーが開発するAGFやAiRに搭載すべく製品化を進めていく計画である。更には、AIアクセラレータである量

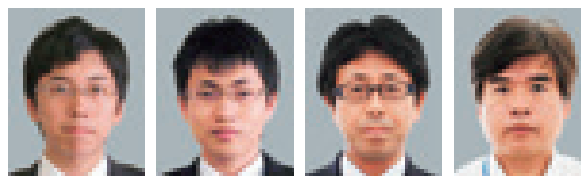
子化DNNの活用も進め、当社のAI・ロボティクス技術を応用した製品開発に貢献していきたいと考えている。

なお、本報告のLSIやSLAMライブラリ、車載ECUは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られた成果を活用したものであり、本研究開発にあたり、多大なご指導・ご協力をいただきましたNEDOをはじめArchiTek株式会社、株式会社ソシオネクスト他、社内外の関係者の皆様に深く感謝いたします。

■ 参考文献

- [1] Sebastian Thrun: Probabilistic Robotics
- [2] JEDEC JESD79 DDR SDRAM Standard

■ 著者紹介



山内 圭介

渡邊 恵太

近藤 克弘

吉見 成弘



藤井 英樹

犬塚 浩之

小林 貢

開発の経緯と開発者の思い

既存の車載マイコンではリアルタイムでの処理が困難な制御技術の大規模化・高度化が進んでいた。我々はユーザ書込み可能なデバイスであるFPGAを活用することで、高速化対応の課題解決を進めていたが、OSSを活用したSLAM技術はアルゴリズムが大変複雑で、短期間での開発には人材不足の状況であった。開発パートナーを探していた時に、未来創生ファンド経由でベンチャー企業のArchiTek株式会社の紹介を受け、共同開発テーマとしてレーザSLAMの自己位置推定処理をFPGAへ実装することに取組んだ。共同開発を開始したタイミングでNEDO事業の公募があり、FPGAよりも低消費電力、低コストを実現できるカスタムLSIの試作を実現する為、半導体企業の株式会社ソシオネクストとの三社でNEDO事業に応募した。NEDOに三社の開発提案が採択された事で約2年半、国プロとして本テーマに取組む事ができた。その成果を活用して、2020年度末に当社の要望を盛り込んだ製品版のAIエッジLSIを手にし、今後の制御技術の大規模化・高度化に対応する大きな武器を手に入れる事ができた。