

デジタル技術を活用したアーキテクチャ検証

Architecture Verification Using Digital Engineering

田邊 真一*
Shinichi Tanabe

笠松 敦志
Atsushi Kasamatsu

阿部 武徳
Takenori Abe

安則 裕通
Hiromichi Yasunori

自動車産業はCASEにおける技術革新により、自動車の知能化が進み、車載システムの開発期間は増加の傾向にある。その一方で、製品を早く市場に投入することで競争力の向上が求められている。(株)オートネットワーク技術研究所では、最適なアーキテクチャを短期間に導出するため、アーキテクチャ検証にデジタル技術を活用する取り組みを行っている。本稿では、ゾーンECUの搭載数、バリエーション数を設計パラメータとしたときのアーキテクチャ検証フローへの数理最適化の適用を行い、さらに導出した結果から設計パラメータの最適条件の予測を行う応答曲面法を組み合わせることで、従来と比較して検証時間を短縮することができたので、その取り組みについて紹介する。

The automotive industry is becoming increasingly intellectualized through CASE (Connected, Autonomous, Shared, and Electric) innovations. While the development period for in-vehicle systems is lengthening, products must be brought to the market quickly to remain competitive. We are making efforts to utilize digital engineering for design verification of in-vehicle systems in order to derive optimal architectures in a short period. We have applied mathematical optimization to the verification flow of the system architectures with the number of zone ECUs and the number of variations as parameters. This paper presents our efforts to shorten the verification time by combining the derived results with the response surface method, which predicts optimal conditions for the design parameters.

キーワード：CASE、アーキテクチャ、数理最適化、応答曲面法

1. 緒言

自動車産業はCASE（C：コネクテッド、A：自動運転、S：シェア、E：電動化）領域での技術革新が急速に進んでいる。こうした状況の中、CASEの実現に向けて、より高度な車載システムが求められており、車載システムの開発規模は年々大きくなっている。その一方で、開発期間を短期化し、優れた製品を早く市場投入することで企業の競争力向上も求められている。そのため、自動車の研究開発においては、開発効率向上とイノベーション創出に向け、モデルベース開発に代表されるデジタル技術の積極的な活用が進められている⁽¹⁾。

(株)オートネットワーク技術研究所では、将来の多様化するニーズに対応するため、デジタル技術を活用したアーキテクチャの検討を行い、自動車メーカーに向けた提案活動に取り組んでいる。本稿では、アーキテクチャ検討における数理的手法を用いたアーキテクチャ検証について紹介する。

2. アーキテクチャの検討

2-1 アーキテクチャの概要

アーキテクチャは自動車に搭載されたECUやセンサ、アクチュエータなどを繋ぐ車載システムの設計思想を意味し、CASEによってECU、センサ、アクチュエータが増加し、複雑化する車載システムを実現するにあたり、その構成を決めるアーキテクチャが重要視されている。現在の自動車の多くは機能ごとにECUを構成する分散したアーキテ

クチャである。今後は複数のドメインを横断し、制御機能を集約したセントラルECUと車両各エリアに配置されるゾーンECU^{*1}から構成されるセントラル&ゾーンアーキテクチャ（以下、C&Zアーキテクチャ）へ進化することが予想されている^{(2),(3)}。

2-2 C&Zアーキテクチャの検討課題

C&Zアーキテクチャは、各ECUに配置されていた頭脳となる制御・アプリケーション機能と、手足となる入出力機能を分離し、制御・アプリケーション機能を集約したセントラルECUと、入出力機能を集約して配置（以下、機能配置）したゾーンECUからなる。

セントラルECUに機能集約することで、従来のアーキテクチャでは困難であった車載システムのOTA^{*2}による効率的なソフトウェア更新を実現できる。また、ゾーンECUは増加するECUやセンサを車両各エリアで接続することで小規模な変更でハードウェア更新を実現できる。

しかし、統合する機能に応じて、適切な数のゾーンECUを適切な位置に配置しなければ、システム全体のコストに対してメリットを得られない可能性がある。例えば、ゾーンECUの搭載数を増やし、車両各エリアに配置することでワイヤーハーネス（以下、W/H）の総線長を低減できるが、ゾーンECUの搭載数が増えることで、開発期間の増加や車両組付け時の作業性の低下につながる恐れがある。

加えて、搭載数、搭載位置と同様にゾーンECUのバリエーションも課題となる。自動車では、車種・グレードによって搭載される装備が異なり、必要な入出力機能が異なる

るため、一般に ECU にバリエーションを持たせて、数品番の ECU バリエーションで数十種類の車種・グレードに対応できるようにしている。バリエーション数を小さくし、共通設計に近づけると、開発期間は短縮する一方で、機能の少ない車両にとっては過剰な製品仕様となってしまう。逆に個別最適な設計に近づけると無駄の少ない製品仕様となるが、開発期間はバリエーション数に比例して増加する。

C&Z アーキテクチャの検討では、搭載数やバリエーション数といった設計パラメータが複数存在するため、膨大なアーキテクチャのパターンを検証し、最適解を導出する必要がある。図 1 に示す平行座標プロットのように、ゾーン ECU の搭載数と同じく 2 個の場合でも、ゾーン ECU の搭載位置が変われば W/H 線長の検証結果に影響する。

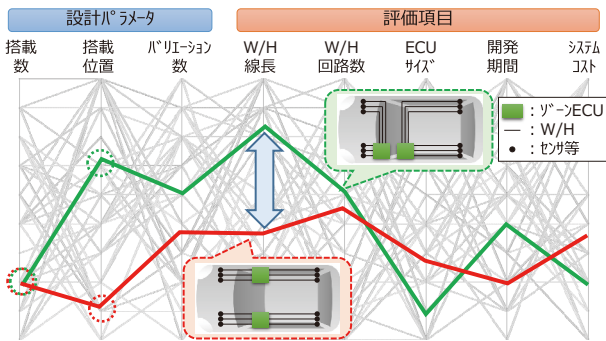


図 1 アーキテクチャ検証結果の平行座標プロット

を繰り返し実行するため、膨大な時間を要する課題があった。そこで、検証パターンを削減するため、応答曲面法を用いて、検証フロー全体の計算時間を短縮する。構築した検証フローに対して、生成した全検証パターンで評価した後、近似モデルを生成し、その精度検証を行い、不十分であれば検証パターンを追加し、新たな近似モデルを生成する工程を追加した。以上により、少ない試行回数で最適なアーキテクチャ案を実現する (図 2)。

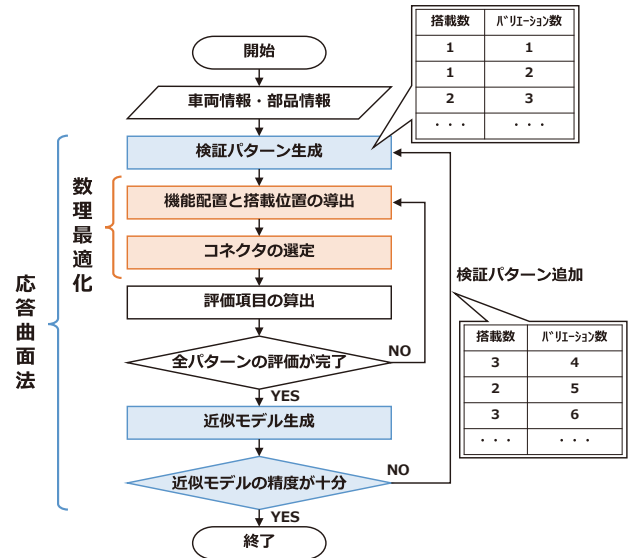


図 2 検証フロー

3. アーキテクチャの検証

3-1 検証フロー概要

本検証では、ゾーン ECU の搭載可能な位置や W/H の経路などの車両・部品情報を入力として与え、ゾーン ECU の搭載数とバリエーション数を設計パラメータとする設計パラメータの組み合わせを検証パターンとして振り、最適なアーキテクチャを導出するフローを構築した。

始めに車両・部品情報を入力し、アーキテクチャの検証パターンを生成する。その後、生成した検証パターンに基づき、ゾーン ECU の電子部品数、開発規模、W/H の総線長の重み付き和を最小化するゾーン ECU の機能配置と搭載位置を導出する。続いて、ゾーン ECU の入出力機能数から必要な端子数を算出し、用意されたコネクタの中から空き端子数を最小化するコネクタの選定を行う。その結果から W/H の総線長などの評価項目の算出を行う。ここで、「機能配置と搭載位置の導出」と「コネクタの選定」に数理最適化を適用することで、各検証パターンにおける最適なアーキテクチャを導出できる構成とした。

構築した検証フローでは、数理最適化によって最適解を導くことはできたが、検証パターンが増えるほど、「機能配置と搭載位置の導出」と「コネクタの選定」の最適化計算

3-2 数理最適化の適用

ゾーン ECU の「機能配置と搭載位置の導出」と「コネクタの選定」を最適化するために、整数計画問題として定式化を行う。「機能配置と搭載位置の導出」に使用する集合を表 1、決定変数を表 2、定数を表 3 に示す。これらを用いると以下のように定式化することができる。

表 1 集合

添え字	内容
G	車種・グレードの集合
E	ゾーン ECU の集合
V	ゾーン ECU のバリエーションの集合
P	電子部品の集合
C	機能の集合
L	ECU 搭載可能な位置の集合
A	車載機器の位置の集合
D	電線の経路の集合

表2 決定変数

決定変数	内容
$x_{g,e,p}^i \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$	車種・グレード $g \in G$ のゾーン ECU $e \in E$ で実装される電子部品 $p \in P$ の数 (非負整数)
$y_{g,c,e} \in \{0,1\}$	車種・グレード $g \in G$ の機能 $c \in C$ をゾーン ECU $e \in E$ に機能配置する場合は1、それ以外は0
$y_{g,c,e,l} \in \{0,1\}$	車種・グレード $g \in G$ の機能 $c \in C$ を搭載位置 $l \in L$ にあるゾーン ECU $e \in E$ に機能配置する場合は1、それ以外は0
$y_v \in \{0,1\}$	バリエーション $v \in V$ が有効である場合は1、それ以外は0
$y_{g,e,l} \in \{0,1\}$	車種・グレード $g \in G$ のゾーン ECU $e \in E$ を搭載位置 $l \in L$ に搭載する場合は1、それ以外は0

表3 定数

定数	内容
w	目的関数の重み係数 $w = \{w_1, w_2, w_3\}$
c^d	品番あたりの開発規模
$b_{g,p,c}$	車種・グレード $g \in G$ 、電子部品 $p \in P$ 、機能 $c \in C$ によって決定する値
$b_{g,c,a}$	車種・グレード $g \in G$ 、機能 $c \in C$ 、車載機器の位置 $a \in A$ によって決定する値
$b_{l,a,d}$	車載機器の位置 $a \in A$ 、ゾーン ECU の搭載位置 $l \in L$ 、経路 $d \in D$ によって決定する値
$d_{l,a}$	車載機器の位置 $a \in A$ からゾーン ECU の搭載位置 $l \in L$ までの経路長
$s_{g,c}$	車種・グレード $g \in G$ の機能 $c \in C$ に紐づく入出力回路と車載機器を接続する電線の断面積
$s_{g,d}^{max}$	車種・グレード $g \in G$ の経路 $d \in D$ の最大 W/H 断面積
$r_{g,d}$	車種・グレード $g \in G$ の経路 $d \in D$ の電線の充填率
T^{min}, T^{max}	ゾーン ECU に実装できる電子部品数の下限値、上限値

目的関数：

$$\min w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$f_1 = \sum_{g \in G} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} (x_{g,e,p}^i - \sum_{c \in C} (b_{g,p,c} \cdot y_{g,c,e})) \quad \dots\dots (2)$$

$$f_2 = \sum_{g \in G} \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{a \in A} (d_{l,a} \cdot b_{g,c,a} \cdot y_{g,c,e,l}) \quad \dots\dots (3)$$

$$f_3 = \sum_{v \in V} c^d \cdot y_v \quad \dots\dots\dots (4)$$

制約条件：

$$\sum_{l \in L} y_{g,e,l} = 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\sum_{e \in E} y_{g,e,l} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$y_{g,c,e,l} \leq y_{g,e,l} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\sum_{c \in C} y_{g,c,e} \geq 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\sum_{e \in E} y_{g,c,e} = 1 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C} y_{g,c,e,l} = 1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\sum_{c \in C} (b_{g,p,c} \cdot y_{g,c,e}) \leq x_{g,e,p}^i \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\sum_{c \in C} (s_{g,c} \cdot \sum_{l \in L} \sum_{a \in A} (b_{g,c,a} \cdot b_{l,a,d} \cdot \sum_{e \in E} y_{g,c,e,l})) \leq r_{g,d} \cdot s_{g,d}^{max} \quad \dots\dots (12)$$

$$T^{min} \leq \sum_{p \in P} x_{g,e,p}^i \leq T^{max} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、式 (1) は目的関数であり式 (2)～(4) の重み付き和を表す。式 (2) は適用する車種・グレードで余剰となる電子部品数、式 (3) は電線の総線長、式 (4) はバリエーション数に比例する開発規模を表す。これらの式に重み係数 $w_1 \sim w_3$ をかけることで、ゾーン ECU と W/H のシステム構成を定量評価する目的関数を準備した。式 (5) は各

ゾーン ECU の搭載位置をいずれか1ヶ所とするための制約、式 (6) は各搭載位置に搭載可能なゾーン ECU 数は1個以内とするための制約、式 (7) は変数間の整合条件のための制約、式 (8) は各ゾーン ECU に対し、機能を1個以上配置するための制約、式 (9)、(10) は各機能がいずれか1個のゾーン ECU に配置されるための制約、式 (11) はゾーン ECU に実装される電子部品数は使用される電子部品数以上となる制約、式 (12) は経路における W/H の適応径に関する制約、式 (13) はゾーン ECU の搭載性を考慮した電子回路数の制約となっている。また、「コネクタの選定」も同様の手順で整数計画問題として定式化を行ったが、紙幅の都合上、詳細は割愛する。

3-3 応答曲面法の適用

より少ない試行回数で最適なアーキテクチャを導出するために応答曲面法を用いる。応答曲面法とは、実験データから近似モデルを生成し、最適な条件を見つける手法である。高精度な近似モデルの生成には多くのサンプル数が必要となるが、ラテン超方格法^{*3}を用いて効率よくサンプリングを行う。構築した検証フローのように、非線形性の強い近似モデルの生成に必要な最小サンプル数 S は決定変数の数 N を用いて次式で見積もることができる⁽⁴⁾。

$$S \geq (N + 1)(N + 2)/2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

また、応答曲面法で用いる回帰モデルには非線形な現象を高精度に近似できる特徴から、Radial Basis Function ネットワーク^{*4}を用いた。

4. 検証結果

構築した検証フローを用いてアーキテクチャ検証結果と応答曲面法による検証期間の削減効果について報告する。

検証の前提条件として、ゾーン ECU の入出力機能数の合計は573、車種数は6車種、各車種におけるゾーン ECU の最大搭載数は3個、ゾーン ECU の最大バリエーション数は6品番とした。入出力機能には6車種全てに搭載される標準機能と、各車種で搭載の有無があるオプション機能を用意し、各車種で機能数が異なる想定をしている。サンプル数は式 (14) より、初期のサンプル数を40とし、20ずつ増加させることとする。ここで、数理最適化の計算には最適化ソルバー Gurobi Optimizer を使用し、検証フローの各処理の連成と近似モデルの生成には、最適化ソフトウェア modeFRONTIER を使用した。

検証の結果、今回の前提条件では、装備数の少ない3車種はダッシュボード^{*5}左端に1個、装備数の多い3車種はダッシュボード両端にそれぞれ1個ずつの計2個、合計バリエーション数が6品番が最適解となった。数理最適化の活用による効果として、人手による設計と比較して、ゾーン ECU の余剰となる電子部品数を約17%削減できる部品構成を導出することができた。

近似モデルの精度検証のため、事前に全ての検証パターンで検証を行い、最適解を把握した上で、近似モデルから得られた設計パラメータでの評価値との誤差を比較した。比較した結果と、近似モデルの精度を決定係数と平均絶対パーセント誤差を用いて評価した結果を表4に示す。サンプル数100で近似モデルの評価値と最適解が一致することを確認でき、数理最適化のみの場合と比較して、検証時間を約80%削減することができた。

表4 モデル精度の検証結果

	サンプル数				
	40	60	80	100	120
最適解との誤差 [%]	4.52	3.39	3.39	0.00	0.00
決定係数	0.721	0.796	0.857	0.874	0.906
平均絶対パーセント誤差 [%]	3.68	2.90	2.33	1.91	1.48

生成した近似モデルを図3に示す。図3の横軸はゾーンECUのバリエーション数、縦軸は装備数が最大となる車種のゾーンECU搭載数であり、バリエーション数が6品番、搭載数が2個の時に最も評価値が小さいと確認できる。

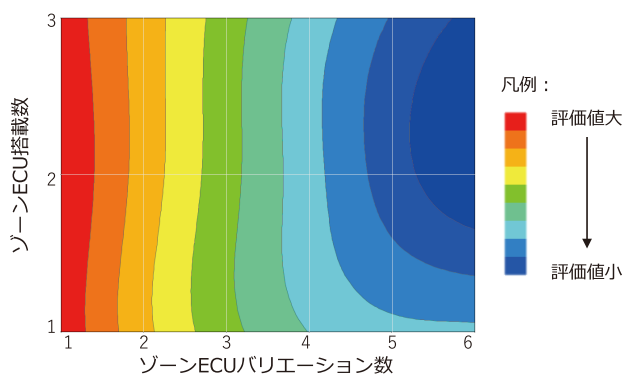


図3 サンプル数100における近似モデル

5. 結 言

本稿ではアーキテクチャ検証に対する数理最適化と応答曲面法を活用した検証を行い、より優れたアーキテクチャ構成を短期間に導出することができた。

今後もアーキテクチャ検討に求められる大規模な検証を短期間に実施するため、デジタル技術の開発と活用を引き続き行っていく。

用語集

※1 ゾーンECU

車両の前後や左右といったエリアごとに配置される電子制御ユニット。主に電源供給、負荷出力、信号入力などの機能を有する。

※2 OTA

Over The Air：無線通信を経由してデータを送受信すること。

※3 ラテン超方格法

入力パラメータ空間において、与えられた確率密度分布と同等な出現頻度となるように、実験点をサンプリングする手法。

※4 Radial Basis Functionネットワーク

動径基底関数の重み付き和によって非線形関数を表現するニューラルネットワークの一種。

※5 ダッシュボード

自動車のフロントガラス下、運転席・助手席前に配置される自動車の内装部。

・Gurobi Optimizerは、Gurobi Optimization, LLCの登録商標です。
・modeFRONTIERは、ESTECO SpAの登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 鈴野浩大、前川耕太、「自動車産業と応用数理 ―クルマ×データ同化―」、応用数理、Vol.31、No.4、pp.23-27 (2021)
- (2) 成沢文雄、浅田幸則、祖父江恒夫、矢野正、坂ノ上修、前田功治、斉藤正史、「安全性と快適性を両立する自動運転向け車載ユニット」、日立評論、Vol.103、No.5、pp.81-86 (2021)
- (3) 安則裕通、上村秀晶、石原章生、伊東真也、松村雄高、「将来の車載電子プラットフォーム」、SEIテクニカルレビュー第194号、pp4-7 (2019)
- (4) 小平剛央、中本尊元、小池真人、天野浩平、西井龍映、Pan Qin、「逐次実験計画法による車体構造の複合領域最適化手法」、自動車技術会論文集、Vol.44、No.2、pp.535-541 (2013)

執 筆 者

田邊 真一* : (株)オートネットワーク技術研究所



笠松 敦志 : (株)オートネットワーク技術研究所
グループ長



阿部 武徳 : (株)オートネットワーク技術研究所
室長



安則 裕通 : (株)オートネットワーク技術研究所
部長



*主執筆者