

# 振舞いプロパティに基づく 自動車組込みソフトウェアの 協調制御アーキテクチャ設計方法の提案と評価

青山 幹雄<sup>†</sup> 田邊 隼希<sup>††</sup>

自動車組込みソフトウェアはリアルタイム分散処理アーキテクチャをとり、高度な安全性や信頼性を実現するために、複数の ECU (Electronic Control Unit)間で協調制御が必要となっている。しかし、ECU 間の相互作用が複雑であるため協調制御の設計が困難である。本稿は、複数の ECU 間のグローバルな振舞いをプロパティとして統一的にモデル化し、プロパティを中心とする自動車組込みソフトウェアの協調制御アーキテクチャ設計方法を提案する。プロパティは自動車、周辺環境、ユーザの特性とその状態を包括的に定義する。DSM (Design Structure Matrix)を拡張し、プロパティを非機能要求と関係づけて自動車全体の振舞いをモデル化する方法を提案する。モデルに基づくアーキテクチャ設計により、非機能要求を満たす自動車全体の協調制御設計が可能となる。提案設計方法を車両運動統合制御システムに適用し、その有効性を示す。

## A Design Methodology and Its Evaluation for Automotive Cooperative Software Architecture Based on the Behavioral Properties

Mikio Aoyama<sup>†</sup> Hayaki Tanabe<sup>††</sup>

It is required to cooperatively control automotive embedded software across a number of ECUs (Electronic Control Units) connected networks. However, the complexity of interactions among ECUs makes it difficult to design the cooperative control. This article proposes a design methodology of architecture for automotive cooperative software architecture based on the behavioral properties. We define the property as attributes and states of the vehicles, surrounding environment and users. We propose the extended DSM (Design Structure Matrix) and associated models for modeling automotive behavior involving NFRs (Non-Functional Requirements). By designing the architecture based on the set of models, we can design the cooperative control among automotive software systems for meeting NFRs. We apply the proposed methodology to the VDM (Vehicle Dynamics Management System) and evaluate the effectiveness of it.

### 1. はじめに

自動車組込みソフトウェアはリアルタイム分散処理アーキテクチャをとり、安全で快適な走行のために複数の ECU(Electronic Control Unit)間で協調制御が必要となっている<sup>3)13)</sup>。しかし、ECU 間の相互作用は複雑なため、協調制御の設計は困難である。本稿では、複数の ECU 間のグローバルな振舞いをプロパティとして統一的にモデル化し、プロパティを中心とする自動車組込みソフトウェアの協調制御アーキテクチャ設計方法を提案する。プロパティは自動車、環境、ユーザの特性とその状態を包括的に定義する。DSM(Design Structure Matrix)を拡張し、プロパティと非機能要求と関係づけて自動車全体の振舞いをモデル化する方法を提案する。モデルに基づくアーキテクチャ設計により、非機能要求を満たす自動車全体の協調制御設計が可能となる。

### 2. 自動車組込みソフトウェアの課題

#### (1) 自動車組込みソフトウェアの協調制御の振舞いとアーキテクチャ設計の複雑化

自動車には ECU に加え、多様なセンサやアクチュエータが搭載されることから、その振舞いは極めて複雑である。自動車組込みソフトウェアのアーキテクチャ設計では、従来のコンポーネント・コネクタに基づく構造的アーキテクチャモデルでは振舞いの設計が困難である。振舞いに基づく新たなアーキテクチャモデルとそれに基づく設計方法が必要である。

#### (2) 自動車組込みソフトウェアの非機能要求設計の複雑化

自動車組込みソフトウェアは、安全性、信頼性などの非機能要求の厳格な達成が求められる。非機能要求はシステムの横断的特性であることからグローバルな性質の設計が必要となるため、リアルタイム分散処理システムでは、全体の複雑な振舞いに対する非機能要求を満たす設計が極めて困難となる。従来の、例えば、NFR フレームワークなどの非機能要求のモデルでは、このような分散処理システム全体の非機能要求を、複雑なシステムの振舞いとあわせてスケーラブル、かつ、厳密にモデル化できるまでには至っていない。振舞いと非機能要求との関係をモデル化できる新たなモデル化方法とそれに基づく設計方法が求められる。

### 3. 関連研究

#### (1) ソフトウェアアーキテクチャのモデル化

従来の構造的アーキテクチャモデルに対して、異なる視点から補完するモデルが提案されている<sup>1)11)</sup>。また、自動車組込みソフトウェアのドメインでは、アーキテクチャの複雑さを軽減する車種などに非依存なモデル化(dAF)が提案されている<sup>5)</sup>。しかし、具体的な設計方法は提

<sup>†</sup> 南山大学 情報理工学部 ソフトウェア工学科  
Department of Software Engineering, Nanzan University

<sup>††</sup> 南山大学大学院 数理情報研究科  
Graduate School of Mathematical Sciences and Information Engineering, Nanzan University

案されていない。

## (2) DSM (Design Structure Matrix)によるアーキテクチャの設計と評価

DSM<sup>4)</sup>を用いた自動車組込みソフトウェアのアーキテクチャ設計と評価が研究されている。DSMを用いて類似度の高い要素をまとめてモジュール化し、要素間の依存関係を簡略化する<sup>2)10)</sup>。また、自動車組込みソフトウェアの要素をDSMによりモジュール化し、その独立性を評価する提案もある<sup>9)</sup>。しかし、協調制御の複雑な振舞いのモデル化の設計の考察はない。

## (3) 振舞いと非機能要求のモデル化とアーキテクチャ設計

NFR フレームワーク<sup>7)</sup>などの非機能要求を構造的にモデル化する方法が提案されている。非機能要求はシステムの横断的な振舞いと密接に関係するが、振舞いと関連づける非機能要求のモデル化とアーキテクチャ設計は確立されているとはいえない。

# 4. プロパティ中心のアーキテクチャ設計方法

## 4.1 プロパティとプロパティ中心設計

プロパティは自動車とそれを取巻く環境、ユーザの特性や状態である。振舞いをプロパティの変化として定義する。さらに、振舞いの相互作用をプロパティ間の相互作用として定義する。プロパティを制御する機能をサービスと呼ぶ。複数サービスがあるプロパティの一貫性を損なう変更をサービス競合と定義する。

プロパティに基づく設計をプロパティ中心設計と呼ぶ。プロパティ中心設計ではサービスが影響を与えるプロパティを特定して設計する。プロパティの考え方は、オブジェクト指向における属性を分散処理ソフトウェア全体へ拡張したものといえる。

## 4.2 プロパティの分類

ユーザ、自動車、周辺環境の特性に着目して、プロパティを分類する(図1)。

- (1) ユーザプロパティ: ユーザの振舞いをその特性と状態によりモデル化する。
- (2) 自動車プロパティ: 自動車の特性とその状態を表し、自動車のサービスはアクチュエータの振舞いを表すプロパティを制御する。自動車プロパティは目標値と現在値の2つの属性を持つ。サービスはプロパティの現在値が目標値となるように制御する。自動車プロパティは制御するアクチュエータの特性から、さらに、次のように分類できる。
  - (2-a) 走行プロパティ: エンジンなどの自動車の走行に関するプロパティである。
  - (2-b) 快適プロパティ: エアコンなどの自動車の快適環境の状態に関するプロパティである。
  - (2-c) インフォテイメントプロパティ: カーナビゲーションシステムなどインフォテイメントに関する

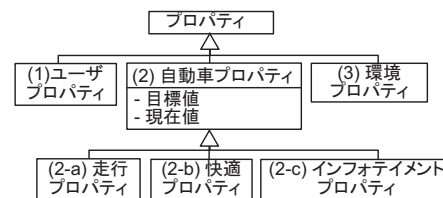


図1 プロパティの分類

プロパティである。

(3) 環境プロパティ: 周辺環境の特性とその状態を示し、サービスが制御不可能なプロパティである。環境プロパティは外気温のようにセンサで測定可能なプロパティと、路面状況のようにセンサで測定不可能なプロパティがある。

## 4.3 プロパティのモデル化

車毎にセンサやアクチュエータの構成が異なるため、これらを表現するプロパティの種類や特性が異なる。このプロパティの多様性に対応し、アーキテクチャ設計を支援するためにプロパティを次の4つのモデルに

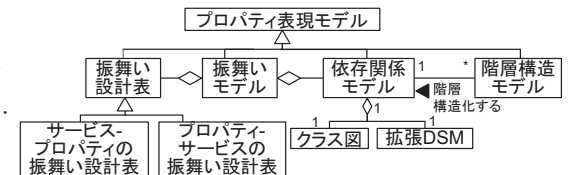


図2 プロパティ表現のメタモデル

分けて表現する。このプロパティのメタモデルを図2に示す。

- (1) 依存関係モデル: プロパティ間とプロパティと非機能要求間の依存関係をモデル化する。
- (2) 階層構造モデル: プロパティとその間の依存関係を階層構造化する。
- (3) 振舞い設計表: プロパティとサービス、サービスと非機能要求間の影響をモデル化する。
- (4) 振舞いモデル: 依存関係モデルと振舞い設計表を組み合わせると自動車全体のグローバルな振舞いをモデル化する。

### 4.3.1 依存関係モデル

プロパティ間の依存関係は、プロパティの型に基づく階層構造と協調制御によるプロパティ間での振舞いの影響伝播の2つの視点から、次のようにモデル化する。

- (1) 依存構造モデル: プロパティ間とプロパティと非機能要求との対応づけをプロパティの型に基づきモデル化し、クラス図で示す。
- (2) 影響伝播モデル: プロパティ間とプロパティから非機能要求への影響伝播を、拡張DSMで表現する。

拡張DSMは、プロパティ間の影響と併せてプロパティと非機能要求間の影響を表現する。すなわち、サービス実行のプロパティへの影響とプロパティを介した非機能要求への影響も表現する。特に、サービスの実行によるプロパティの変化は他のプロパティにも伝搬し、伝播の連鎖を通して非機能要求へ影響する点に着目する。このプロパティ間の影響伝搬と非機能要求への影響を表現するモデルである。

プロパティをDSM<sup>4)</sup>の行と列に対応づけると交点の要素はプロパティ間の影響を表す。本稿では、図3に示すように、DSMの列を拡張して非機能要求を定義することで、プロパティの非機能要求への影響を表現する。行と列の要素間に影響がある場合はXにより表す。図3ではプロパティ間の影響として、AからB、BからAとCへの影響を表す。更に、プロパティから非機能要求への影響として、プロパティA、B、Cから非機能要求PR、Q、Rに、それぞれ影響することを表す。

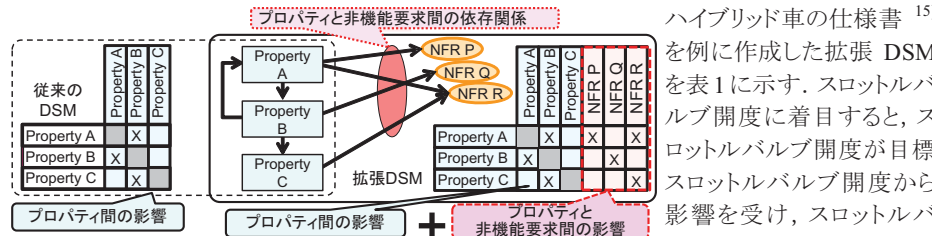
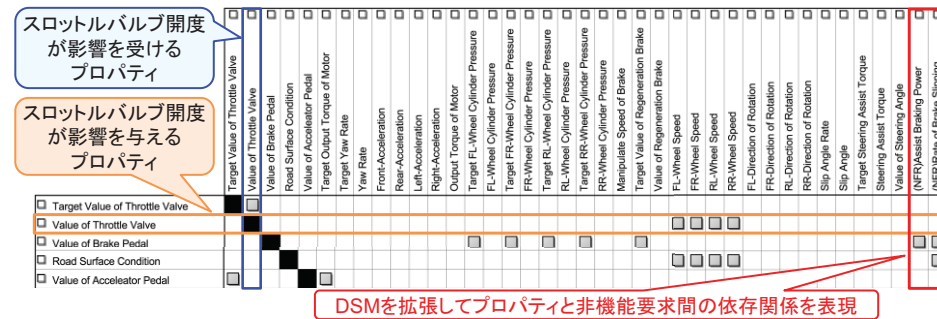


図3 拡張DSMによる影響伝播のモデル化

ブレーキペダル操作量に着目すると目標ホイールシリンダ圧力に影響することが分かり、加えて、非機能要求の制動力支援とブレーキスリップ率に影響することが分かる。

表1 拡張DSMによる影響伝播モデル



### 4.3.2 振舞い設計表

振舞い設計表はサービスとプロパティ間の依存関係とサービスと非機能要求間の依存関係をサービスのリアルタイム性も含めて表形式でモデル化する。振舞い設計表によりサービスの同時起動とサービス競合の可能性が特定可能となる。

ハイブリッド車の仕様書<sup>15)</sup>を例に作成した振舞い設計表を表2に示す。

表2 振舞い設計表

| サービス-プロパティの振舞い設計表                                  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 目標ホイールシリンダ圧力を介して、ABS、ブレーキアシスト、S-ESC間のサービス競合の可能性を特定 |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| サービス                                               | 目標ホイールシリンダ圧力 | 目標ホイールシリンダ圧力 | 目標ホイールシリンダ圧力 | 目標ホイールシリンダ圧力 | 目標ホイールシリンダ圧力 | 目標ホイールシリンダ圧力 | 目標ホイールシリンダ圧力 | 目標ホイールシリンダ圧力 | 目標ホイールシリンダ圧力 |
| ABS                                                | XX           | XX           | XX           | XX           |              |              |              |              |              |
| ブレーキアシスト                                           | XX           | XX           | XX           | XX           |              |              |              |              |              |
| エアコン                                               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| S-ESC                                              | XX           | XX           | XX           | XX           | XX           | XX           | XX           |              |              |

| プロパティ-サービスの振舞い設計表 |     |          |      |       |          |          |          |          |          |
|-------------------|-----|----------|------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| サービス              | ABS | ブレーキアシスト | エアコン | S-ESC | センサの更新周期 | センサの更新周期 | センサの更新周期 | センサの更新周期 | センサの更新周期 |
| プロパティ             | XX  | XX       |      | XX    | XX       | XX       | XX       | XX       | XX       |
| FL車輪速             | XX  |          |      | XX    | XX       | XX       | XX       | XX       | XX       |
| FR車輪速             | XX  |          |      | XX    | XX       | XX       | XX       | XX       | XX       |
| RL車輪速             | XX  |          |      | XX    | XX       | XX       | XX       | XX       | XX       |
| RR車輪速             | XX  |          |      | XX    | XX       | XX       | XX       | XX       | XX       |
| 操舵角               |     |          |      | XX    | XX       | XX       | XX       | XX       | XX       |

サービスと非機能要求間の依存関係を表現

プロパティと非機能要求間の依存関係を表現

ECUを含めた協調制御の設計を支援

ABS: Antilock Brake System  
S-ESC: Steering-assisting Electronic Stability Control

### 4.3.3 振舞いモデル

振舞いモデルは、依存関係モデルと振舞い設計表を組み合わせることで自動車全体の振舞いをモデル化し、協調制御の設計を可能とする。振舞いモデルはサービスのプロパティへの直接的影響だけでなく、間接的影響も表現する。

ハイブリッド車の仕様書<sup>15)</sup>を例に作成した振舞いモデルを図4に示す。ABS (Antilock Brake System)の実行結果が目標ホイールシリンダ圧力に影響を与え、目標ホイールシリンダ圧力がホイールシリンダ圧力に影響する。さらに、ホイールシリンダ圧力が車輪速に影響し、車輪速がABSに影響する。ABSの目標ホイールシリンダ圧力への直接的影響だけでなく、車輪速などへのABSの間接的影響も表現可能である。ABSが制動力支援などの非機能要求に影響することも特定可能である。非機能要求を満たす協調制御の設計を支援する。



図4 振舞いモデル

### 4.4 プロパティとサービスの相互作用分析

サービスがプロパティを制御することによる相互作用を分析し、4パターンに分類した(表3)。ここで、プロパティが更に別のサービスの実行にも影響することに留意する必要がある。

#### (1) プロパティ-プロパティの相互作用

あるプロパティが異なるプロパティに影響する相互作用である。

#### (2) プロパティ-サービスの相互作用

プロパティがサービスに影響する相互作用がある。特に、単一プロパティが複数サービスに影響するパターンでは、複数サービスが同時起動する可能性がある。

#### (3) サービス-プロパティの相互作用

サービスがプロパティに影響する相互作用がある。特に、複数サービスが単一プロパティに影響するパターンでは、サービス競合が発生する可能性がある。

#### (4) サービス-サービスの相互作用

サービス間の相互作用はプロパティを介して間接的に行われると考えられるので、サービス間の直接的な相互作用は考慮しない。

表3 プロパティとサービスの相互作用パターン

|          | プロパティ               | サービス                    |
|----------|---------------------|-------------------------|
| プロパティ(1) | プロパティ間の相互作用がある      | (2) プロパティ-サービス間の相互作用がある |
| サービス(3)  | サービス-プロパティ間の相互作用がある | (4) 考慮しない               |

## 5. 協調制御アーキテクチャ設計プロセス

本稿で提案する協調制御アーキテクチャの設計プロセスを図 5 に示す。

### (1) プロパティの抽出

プロパティを仕様書のセンサ検出値やサービスの制御則から抽出し、4.2 に基づき分類する。センサで検出できないプロパティは走行中の周辺環境を考慮して抽出する。

### (2) プロパティと非機能要求の依存関係分析

仕様書より非機能要求を抽出する。プロパティ間とプロパティと非機能要求間の依存関係を分析して依存関係モデルを作成する。

### (3) プロパティのクラスタ化と階層構造化

振舞いに着目してプロパティをモジュール化する。例えば、ブレーキ制御に着目すると、ホイールシリンダ圧力とブレーキペダル操作量はモジュール化できる。これにより、自動車の振舞いを考慮したプロパティのクラスタ化と階層構造化が可能となる。モジュール化したプロパティを依存関係モデルに適用して、DSM ツール<sup>8)</sup>を用いて拡張 DSM のクラスタリングを行う。本稿では、クラスタリングアルゴリズムとして階層的クラスタリング法<sup>12)</sup>を適用し、類似度の高いプロパティや非機能要求をまとめてクラスタとし、さらにクラスタ間の類似度を計算してクラスタリングを繰り返す。階層的クラスタリングによって、クラスタの中にさらにクラスタが存在する場合はプロパティの階層構造として抽出し、プロパティの階層構造モデルを構成する。

### (4) プロパティ中心設計

自動車全体の振舞いのモデル化: サービスとプロパティ間の影響とサービスの非機能要求への影響を分析し振舞い設計表を作成する。振舞いモデルは自動車全体の振舞いを表し、協調制御が振舞いに与える影響を分析できるため、自動車全体の協調制御設計が可能となる。

### (5) サービス競合分析

ユースケースマップ<sup>9)</sup>を振舞いモデルに適用し、プロパティ間の影響伝搬を視覚的に表現してサービス競合と非機能要求の競合の可能性を発見する。複数サービスのユースケースパスがプロパティ内で重複するとサービス競合の可能性がある。さらに、プロパティ内で複数の非機能要求に関与するユースケースパスが重複すると非機能要求が競合する可能性がある。プロパティの影響伝搬とユースケースパスのトレースにより、サービス競合と非機能要求の競合の可能性を特定できる。

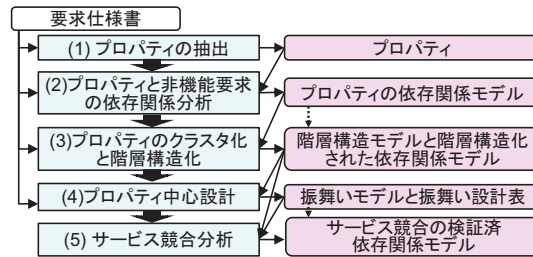


図 5 協調制御アーキテクチャ設計プロセス

## 6. 提案設計方法の車両運動統合制御システムへの適用

提案設計方法の妥当性を確認するために、最も高度な協調制御の一つである車両運動統合制御システム (VDM: Vehicle Dynamics Management system) に適用した。VDM の実現例である VDIM (Vehicle Dynamics Integrated Management)<sup>13)</sup> はブレーキ、駆動力、ステアリング、サスペンションの協調制御により車両安定性の限界前から制御を開始し、高度な車両挙動と安定性を実現する。この仕様書<sup>14)</sup> に提案方法を適用した。

### 6.1 プロパティの抽出

仕様書<sup>14)</sup> より 68 個のプロパティを抽出し、4.2 で述べた分類基準に基づき分類した。

- (1) ユーザプロパティ: アクセルペダル開度, ステアリング操舵角, ステアリング操舵方向, ブレーキペダル操作量, ブレーキペダル操作速度の 5 個を抽出した。
- (2) 自動車プロパティ: 61 個の走行プロパティのみを抽出した。
- (3) 環境プロパティ: 現在位置, 路面摩擦係数の 2 個を抽出した。

### 6.2 プロパティと非機能要求の依存関係分析

プロパティ間の依存関係を分析した。仕様書<sup>14)</sup> には VDM を構成するサービスの入力値と出力値が記述されている。入力値はサービスの実行により出力値に影響を与えると考え、出力値に該当するプロパティは入力値に該当するプロパティと依存関係を持つと分析した。さらに、仕様書に基づき VDM の非機能要求を抽出した(図 6)。この分析より VDM の依存関係モデルを作成した。

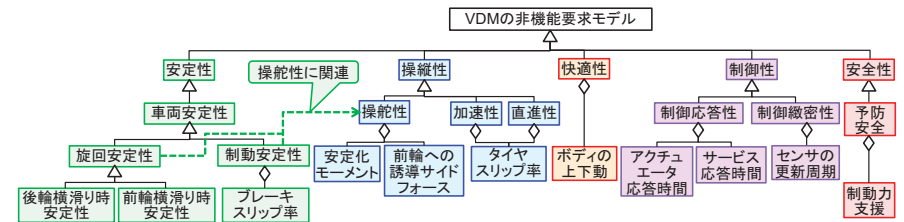


図 6 VDM の非機能要求のモデル化

### 6.3 プロパティのクラスタ化と階層構造化

ブレーキ制御、エンジン制御、サスペンション制御、ステアリング制御の振舞いに着目してプロパティを抽出した。また、車輪速センサに着目して、車輪速と回転方向のプロパティをまとめて車速として拡張 DSM によりモデル化した。この拡張 DSM を DSM ツール<sup>7)</sup>によりクラスタリングした結果、新たなクラスタが 12 個生成され、クラスタの中に更にクラスタが存在するものが 5 個発見できた。特に、ブレーキ制御、エンジン制御、車速を含むクラスタ(表 4)に着目すると、階層構造モデルが構成できる。Cluster9 のプロパティを制御するサービスとして、エンジン制御とブレーキ制御により車速を制御する定速走行サービスを追加可能であることが分かった。このように、生成されたクラスタへの制御としてサービスが特定可能となる。



表 5 VDM のサービス-プロパティの振舞い設計表

[illegible]

### (1) プロパティによる振舞いのモデル化

さらに、プロパティを4つのモデルに分けてモデル化したことにより、複数の視点からモデル化できると共に各モデルの複雑度を軽減できる。特に、依存関係モデルでは、クラス図と拡張DSMを用いてプロパティ間の構造と影響伝播の2つの視点に分けて表現するため、従来はモデル化できていなかった振舞いの影響の表現が可能となる。

## (2) プロパティによる振舞いの視点からのソフトウェアアーキテクチャ設計

| プロパティ          | サービス<br>エンジン<br>制動 | ブレーキ<br>制御 | ABS | ブレーキ<br>アシスト | TCS | ESC | H-<br>Four | AVS | ステア<br>リング<br>協調 | ヒル<br>アシスト | スタート<br>アシスト | センサ |
|----------------|--------------------|------------|-----|--------------|-----|-----|------------|-----|------------------|------------|--------------|-----|
| FL車輪速          |                    |            | XX  |              |     | XX  | XX         | XX  | XX               | XX         | XX           | XX  |
| FL回転方向         |                    |            |     |              |     |     | XX         | XX  |                  | XX         | XX           | XX  |
| FR車輪速          |                    |            | XX  |              |     | XX  | XX         | XX  | XX               | XX         | XX           | XX  |
| FR回転方向         |                    |            |     |              |     |     | XX         | XX  |                  | XX         | XX           | XX  |
| RL車輪速          |                    |            | XX  |              |     | XX  | XX         | XX  | XX               | XX         | XX           | XX  |
| RL回転方向         |                    |            |     |              |     |     | XX         | XX  |                  | XX         | XX           | XX  |
| RR車輪速          |                    |            | XX  |              |     | XX  | XX         | XX  | XX               | XX         | XX           | XX  |
| RR回転方向         |                    |            |     |              |     |     | XX         | XX  |                  | XX         | XX           | XX  |
| 前加速度           |                    |            |     |              |     |     |            |     | XX               | XX         | XX           | XX  |
| 後加速度           |                    |            |     |              |     |     |            |     | XX               | XX         | XX           | XX  |
| 右加速度           |                    |            |     |              |     |     |            |     | XX               | XX         | XX           | XX  |
| 左加速度           |                    |            |     |              |     |     |            |     | XX               | XX         | XX           | XX  |
| ブレーキペダル操作量     |                    |            |     | XX           | XX  |     | XX         | XX  |                  |            |              | XX  |
| 目標FLホイールシリンダ圧力 |                    | XX         |     |              |     |     |            |     | XX               |            |              | XX  |
| FLホイールシリンダ圧力   |                    |            |     |              |     |     |            |     | XX               |            |              | XX  |
| 目標FRホイールシリンダ圧力 |                    | XX         |     |              |     |     |            |     |                  |            |              | XX  |
| FRホイールシリンダ圧力   |                    |            |     |              |     |     |            |     | XX               |            |              | XX  |
| 目標RLホイールシリンダ圧力 |                    | XX         |     |              |     |     |            |     |                  |            |              | XX  |
| RLホイールシリンダ圧力   |                    |            |     |              |     |     |            |     | XX               |            |              | XX  |
| 目標RRホイールシリンダ圧力 |                    | XX         |     |              |     |     |            |     |                  |            |              | XX  |
| RRホイールシリンダ圧力   |                    |            |     |              |     |     |            |     | XX               |            |              | XX  |
| ブレーキペダル操作速度    |                    |            |     | XX           | XX  |     |            |     |                  |            |              | XX  |
| ステアリング操舵角      |                    |            |     |              |     |     | XX         |     | XX               |            |              | XX  |
| 現在位置           |                    |            |     |              | XX  |     |            | XX  |                  |            |              | XX  |
| 目標スロットルバルブ開度   | XX                 |            |     |              |     |     |            |     |                  |            |              | XX  |
| スロットルバルブ開度     |                    |            |     |              |     |     | XX         |     |                  |            |              | XX  |
| スリップ角          |                    |            |     |              |     | XX  |            |     |                  |            |              | XX  |
| スリップ角速度        |                    |            |     |              |     | XX  |            |     |                  |            |              | XX  |
| ヨーレート          |                    |            |     |              |     | XX  |            |     |                  |            |              | XX  |
| 目標ヨーレート        |                    |            |     |              |     | XX  |            |     |                  |            |              | XX  |
| 路面摩擦係数         |                    |            | XX  |              |     | XX  | XX         |     |                  |            |              | XX  |
| ロール角           |                    |            |     |              |     |     |            | XX  |                  |            |              | XX  |
| ピッチ角           |                    |            |     |              |     |     |            | XX  |                  |            |              | XX  |
| FLばね上加速度       |                    |            |     |              |     |     |            | XX  |                  |            |              | XX  |
| FRばね上加速度       |                    |            |     |              |     |     |            | XX  |                  |            |              | XX  |
| RLばね上加速度       |                    |            |     |              |     |     |            | XX  |                  |            |              | XX  |
| RRばね上加速度       |                    |            |     |              |     |     |            | XX  |                  |            |              | XX  |
| 予測スクワット        |                    |            |     |              |     |     |            | XX  |                  |            |              | XX  |

また、Sant'Anna らは<sup>11)</sup>、アーキテクチャ要素にコンサーンを割当て、コンサーンに関するモジュール性を評価

する方法を提案している。しかし、アーキテクチャ全体としてコンサーンとの関係は明確でない。提案設計方法ではプロパティ間の影響伝播やサービスとプロパティ間の影響伝播が追跡可能となることから、グローバルな特性を分析できる。

一方、自動車ドメインでは車種などに非依存なアーキテクチャモデル(dAF)として着目すべき5つの視点が提案されている<sup>5)</sup>。この5つの視点と提案設計方法を対比した結果を表7に示す。提案設計方法は a)～e)までの視点を表現できる。e)は関連するステークホルダに対する視点のため、協調制御設計では直接扱う必要がない。従って、提案設計方法は自動車協調制御アーキテクチャの多様な視点に対応できるといえる。

表 7 5つの観点からの提案設計方法の考察

| dAF が着目すべき観点  | 提案設計方法                                                         |
|---------------|----------------------------------------------------------------|
| a) 機能的観点      | プロパティを介して、サービス間の相互作用を表現                                        |
| b) 物理的観点      | 自動車の物理コンポーネントを抽象化したプロパティの構成や関連は表現したが、物理コンポーネント自体の構成や関連は表現していない |
| c) データの観点     | 自動車の振舞いを表現する情報を表現したが、ECU 間の通信プロトコルは表現していない                     |
| d) ドライバと環境の観点 | 自動車とユーザ、自動車と周辺環境との相互作用を表現                                      |
| e) ステークホルダの観点 | 提案設計方法では表現していない                                                |

### (3) 拡張 DSM による非機能要求の設計

構造中心設計では制御による非機能要求への影響の特定が困難である。提案設計方法ではプロパティと非機能要求間の影響を拡張 DSM で表現し、サービスの制御によるプロパティの変化が影響する非機能要求を特定できる。これは、DSM による依存関係モデル<sup>3)9)</sup>の拡張となっている。非機能要求を満たすためのサービスを特定可能となるため、非機能要求と協調制御設計との関連が分析可能となる。従来の非機能要求モデル、例えば NSF フレームワーク<sup>7)</sup>は、非機能要求とゴールとの関係を表現できるが、振舞いとの関係は表現できない。自動車ソフトウェアでは振舞いが本質であることから、提案方法は有用であると考えられる。

### (4) 競合の特定

従来の設計方法では分散する機能間競合や非機能要求との競合の特定が困難である。提案設計方法は振舞いに着目し、プロパティモデルにユースケースマップを応用し、サービスのプロパティへの影響をユースケースパスで表現する。ユースケースパスの重複により、そのユースケースパスを持つサービス間の競合の可能性、非機能要求に対する制御の競合の可能性を特定できる点で改善となっている。しかし、ユースケースパスの存在は必ずしも競合の存在を意味しない。このような点から、競合を正確に検出できる方法の検討が必要である。

## 8. 今後の課題

拡張 DSM のモデル化能力の向上とサービス競合や非機能要求の競合の可能性を分析する方法が必要である。協調制御の設計では、競合回避は極めて重要な課題である。

更に、提案設計方法に基づき作成した協調制御ソフトウェアアーキテクチャの実装支援を

行う必要がある。実装によりサービス競合の回避とサービスの協調制御が可能か確認し、提案設計方法の有効性と妥当性、実現可能性を評価する。

## 9. まとめ

自動車ソフトウェアの協調制御アーキテクチャ設計を支援するために、振舞いをプロパティでモデル化する方法とプロパティに基づくアーキテクチャの設計方法を提案した。信頼性などの非機能要求を満たすために、DSM を拡張した拡張 DSM を提案し、振舞いと非機能要求とを関係づける設計方法を提案した。提案設計方法を VDM に適用し、プロパティによる自動車の振舞いのモデル化と、サービス競合と非機能要求の競合可能性の特定が可能であることを示した。更に、自動車全体の協調制御の設計に有効であることを確認した。提案方法は、従来の構造に基づくアーキテクチャ設計を補完する新たな設計方法の基礎となる。

## 参考文献

- 1) B. Ahlgren, et al., Invariants: A New Design Methodology for Network Architectures, Proc. ACM Workshop on Future Directions in Network Architecture, Aug. 2004, pp. 65-70.
- 2) S. T. Albin, The Art of Software Architecture, Wiley, 2003.
- 3) 青山 幹雄 他, 車載ソフトウェアのサービスプラットフォームのモデルとアーキテクチャ, 自動車技術会論文集, Vol. 40, Dec. 2008, pp. 1599-1604.
- 4) C. Y. Baldwin, K. B. Clark, Design Rules: The Power of Modularity, MIT Press, 2000.
- 5) M. Broy, et al., Toward a Holistic and Standardized Automotive Architecture Description, Computer, Vol. 42, No. 12, Dec. 2009, pp. 98-101.
- 6) R. J. A. Buhr, et al., Use Case Maps for Object-Oriented Systems, Prentice Hall, 1996.
- 7) L. Chung, et al., Non-Functional Requirements in Software Engineering, Kluwer, 1999.
- 8) Cambridge Advanced Modeller (CAM), <http://www-edc.eng.cam.ac.uk/cam/>.
- 9) O. Larses, Applying Quantitative Methods for Architecture Design of Embedded Automotive Systems, Proc. INCOSE 2005, Jul. 2005.
- 10) S. Neeraj, et al., Using Dependency Models to Manage Complex Software Architecture, Proc. OOPSLA 2005, ACM, Oct. 2005, pp. 167-176.
- 11) C. Sant'Anna, et al., On the Modularity of Software Architectures: A Concern-Driven Measurement Framework, Proc. ECSA 2007, LNCS 4758, Sep 2007, pp. 207-224.
- 12) 佐藤 善治, 多変量データの分類・判別分析・クラスター分析, 朝倉書店, 2009.
- 13) 鈴木 将人 他, 車両運動統合制御 (VDIM) の現状と展望, TOYOTA Technical Review, Vol. 55, No. 1, Nov. 2006, pp. 48-53.
- 14) トヨタ自動車, CROWN MAJESTA 新型車解説書 URS206 / UZS207, 2009.
- 15) トヨタ自動車, PRIUS 新型車解説書 NHW20 系, 2003.