

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

田邊 隼希[†] 青山 幹雄^{††}

近年、自動車組込みソフトウェアでは複数の ECU(Electronic Control Unit)間でネットワークを通じた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、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と定義する。センサやアクチュエータの構成の違いによるプロパティの多様性に対応するため、プロパティを階層的にモデル化する。更に、DSM(Design Structure Matrix)を拡張し、非機能要求を含む自動車全体の振舞いをモデル化する。モデルに基づく体系的なアーキテクチャ設計により、自動車全体の協調制御設計が容易となる。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。

An Architecture Design Methodology for Automotive Embedded Cooperative Software Systems Based on the Properties

Hayaki Tanabe[†] and Mikio Aoyama^{††}

In recent years, it is required to the cooperative control for automotive embedded software systems across a number of ECUs (Electronic Control Units) connected through 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 embedded cooperative software systems based on the properties. The authors define the property as attributes and states of vehicles, surrounding environment of the vehicle and users. To accommodate varieties of property caused by differences about the configuration of sensors and actuators, the authors model properties hierarchically. Furthermore, the authors propose the extended DSM (Design Structure Matrix) and associated models for modeling automotive behavior involving NFR (Non-Functional Requirements). By designing the architecture based on the set of models systematically, we can design easily the cooperative control among automotive embedded software systems. The authors apply the proposed methodology to the VDM (Vehicle Dynamics Management System) and evaluate the effectiveness of it.

1. はじめに

近年、自動車組込みソフトウェアでは安全で快適な走行のために ECU(Electronic Control Unit)間のネットワークを通じた協調制御が必要である[2]。しかし、ECU 間の相互作用が複雑なため、自動車全体の協調制御の設計が困難である。本稿では、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を提案する。プロパティを自動車、環境、ユーザの特性とその状態と定義する。プロパティに着目して自動車全体の振舞いをモデル化し、振舞いモデルを作成する。振舞いモデルにより、非機能要求を満たすサービス協調の設計とサービス競合の特定が可能となる。そのため、競合を特定し非機能要求を満たす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) 機能分散による設計の複雑化

自動車組込みソフトウェアは、複数の ECU に機能が分散し個別制御を行う。機能が自動車の振舞いへ及ぼす影響が複雑で特定が困難なため、機能競合が発生する。自動車組込みソフトウェアの設計では非機能要求が重要で、協調制御全体で非機能要求を満たす必要がある。しかし、協調制御が非機能要求に及ぼす影響の特定は困難である。

(2) 自動車共通ソフトウェアアーキテクチャが未確立

センサやアクチュエータの構成は車種毎に異なる。しかし、構成の多様性に対応するアーキテクチャは未確立なため、車種毎のアーキテクチャ設計が必要となる。構成の多様性に対応する自動車共通ソフトウェアアーキテクチャが必要である。

3. 関連研究

(1) 自動車組込みソフトウェアアーキテクチャのモデル化

自動車組込みソフトウェアの複雑さを軽減する自動車組込みソフトウェアアーキテクチャのモデル化が提案されている[5]。車種や開発組織に非依存なアーキテクチャフレームワークが着目すべき観点として、機能的観点、物理的観点、データの観点、ドライバと環境の観点、ステークホルダの観点が提案されている。しかし、具体的な設計方法は提案されていない。

(2) DSM (Design Structure Matrix)によるアーキテクチャ評価

DSM[3]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 の類似度の高い要素をまとめてモジュール化し、モジュール内の依存関係の隠蔽で要素間の依存関係を簡略化できる[1]。文献[8]では自動車組込みソフトウェアの論理ユニットを

[†] 南山大学大学院 数理情報研究科
Graduate School of Mathematical Sciences and Information Engineering, Nanzan University

^{††} 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

DSMによりモジュール化し、その結果をモジュール独立性と潜在力平均比で評価している。

4. プロパティ中心のアーキテクチャ設計方法

4.1 プロパティに基づく振舞い

プロパティを自動車、周辺環境、ユーザの特性とその状態と定義し、振舞いをプロパティの変化と定義する。また、依存関係をプロパティと他のプロパティや非機能要求の関連と定義する。プロパティに着目することで自動車の振舞いに加え、周辺環境とユーザの振舞いも含むモデル化が可能となる。プロパティに基づく協調制御設計をプロパティ中心設計と呼び、プロパティを制御する機能をサービスと定義する。更に、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行うことをサービス競合と定義する。

4.2 プロパティの分類

ユーザ、自動車、周辺環境に着目して、プロパティ进行分类する(図1)。

- (1) ユーザプロパティ: ユーザの特性とその状態を示す。ユーザ要求はユーザプロパティで表現される。サービスはユーザプロパティに基づく制御を行う。
- (2) 自動車プロパティ: 自動車の特性とその状態を示し、アクチュエータにより自動車のサービスが制御可能なプロパティである。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。サービスは現在値が目標値となるようにアクチュエータを制御する。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。

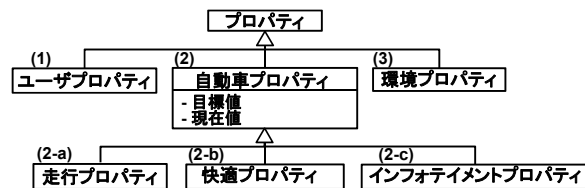


図1 プロパティの分類

4.3 プロパティのモデル化

車種毎にセンサやアクチュエータの構成が異なるため、これらの情報を表現するプロパティの種類や特性が異なる。自動車の振舞いはサービスや周辺環境、ユーザから影響を受ける

ため、複雑となる。プロパティの多様性と複雑な振舞いに対応するためにプロパティを以下の4種類のモデルで表現する。このプロパティ表現のメタモデルを図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ことで自動車全体の振舞いをモデル化する。

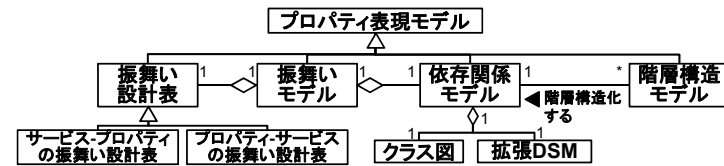


図2 プロパティ表現のメタモデル

4.3.1 依存関係モデル

プロパティ間の依存関係は複雑で、更にプロパティと非機能要求間の依存関係も存在する。依存関係モデルは2つのモデルでこれらの依存関係と構造を表現する。

- (1) クラス図: プロパティや非機能要求をクラスとして考え、依存関係を示す(図3)。
- (2) 拡張DSM: プロパティ、非機能要求を要素として考え、依存関係を表形式で表現する。

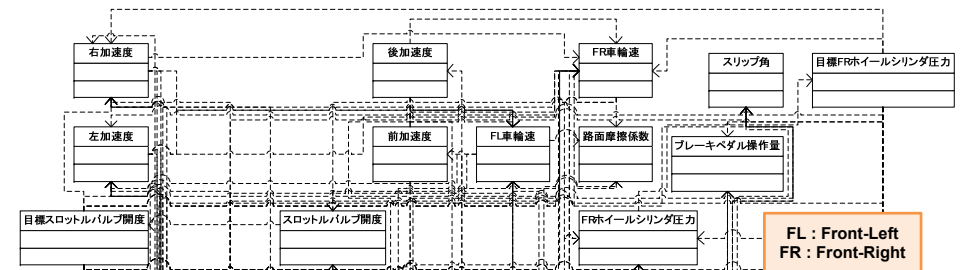


図3 依存関係モデルのクラス図(一部抜粋)

4.3.2 拡張DSM

非機能要求はサービスの実行により満たされる。サービスの実行はプロパティに影響するため、プロパティを介して非機能要求にも影響する。更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、実行結果の非機能要求への影響の特定が困難となる。プロパティの影響伝搬とプロパティの非機能要求への影響を表現するモデルが必要である。

DSMを拡張し、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表現可能な拡張DSMを提案する(表1)。拡張DSMにより非機能要求を満たす協調制御設計が可能となる。

表 1 依存関係モデルの拡張 DSM

プロパティ	Target Value of Throttle Valve	Value of Throttle Valve	Value of Brake Pedal	Road Surface Condition	Value of Accelerator Pedal	Target Output Torque of Motor	Yaw Rate	Front-Acceleration	Rear-Acceleration	Roll-Acceleration	Output Torque of Motor	Target FL-Wheel Cylinder Pressure	FL-Wheel Cylinder Pressure	Target FR-Wheel Cylinder Pressure	FR-Wheel Cylinder Pressure	Target RL-Wheel Cylinder Pressure	RL-Wheel Cylinder Pressure	Target RR-Wheel Cylinder Pressure	RR-Wheel Cylinder Pressure	Manipulate Speed of Brake	Target Value of Regeneration Brake	Value of Regeneration Brake	FL-Wheel Speed	FR-Wheel Speed	RL-Wheel Speed	RR-Wheel Speed	FL-Direction of Rotation	FR-Direction of Rotation	RL-Direction of Rotation	RR-Direction of Rotation	Steer Angle Rate	Target Steering Assist Torque	Steering Assist Torque	Value of Steering Angle	(WFR)Assist Blending Power	(WFR)Rate of Brake Stopping	
スロットルバルブ開度が影響を受けるプロパティ																																					
スロットルバルブ開度が影響を与えるプロパティ																																					
DSMを拡張してプロパティと非機能要求間の依存関係を表現																																					

4.3.3 階層構造モデル

階層構造モデルはプロパティを階層的にモデル化し、センサやアクチュエータの構成の違いを抽象化してモデルを共通化する。階層構造モデルにより、車種に非依存で統一的なモデルを作成できる。階層構造モデルはクラス図で表す。階層構造モデルには汎化関係と、集約関係が存在する(図 4)。

(1) 汎化関係

同じ種類のアクチュエータから抽出されたプロパティが階層構造化された場合、下位のプロパティは上位のプロパティの具体化と考えられるため、汎化関係とする。下位のプロパティ間の依存関係の隠蔽により依存関係の複雑度を軽減する。

(2) 集約関係

異なるアクチュエータや、サービスの制御則から抽出されたプロパティが階層構造化される場合、上位のプロパティは下位のプロパティにより構成されると考えられるため、集約関係とする。下位のプロパティの構成を隠蔽し、設計の複雑度を軽減する。

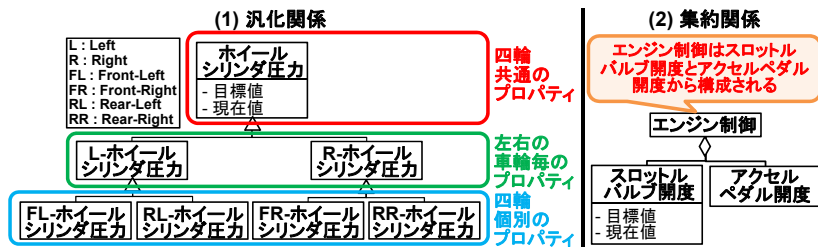


図 4 階層構造モデル

4.3.4 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を特定可能となる。

ハイブリッド車の仕様書[12]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	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間でのサービス競合の可能性を発見	ABS	ブレーキアシスト	エアコン	S-ESC
ABS	XX	XX			
ブレーキアシスト	XX	XX			
エアコン				X	X
S-ESC	XX	XX	XX	XX	XX

プロパティ	ABS	ブレーキアシスト	エアコン	S-ESC
FL車輪速	XX			XX
FR車輪速	XX			XX
RL車輪速	XX			XX
RR車輪速	XX			XX
操舵角				XX

注: 非機能要求とサービス間の依存関係を表現
 XX: ハードリアルタイム
 X: ソフトリアルタイム

4.3.5 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、自動車全体の体系的な協調制御設計を可能とする。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[12]を例に作成した振舞いモデルを図 5 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分析可能なため、非機能要求を満たす協調制御の設計も可能となる。



図 5 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

プロパティとサービスの相互作用を分析して、4つのパターンに分類した(表 3)。

(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がある。

(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

本稿では、プロパティ中心設計を行うため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、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 6 に示す。

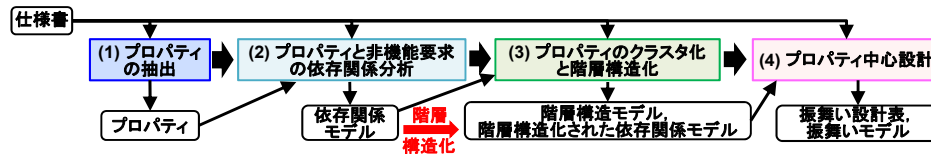


図 6 協調制御アーキテクチャ設計プロセス

(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してモデル化する。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。更に、センサに着目してプロパティをモジュール化する。例えば、車速は車輪速センサにより検出される。車輪速センサは車輪速と回転方向という 2 つのプロパティを持つため、車速はこれらのプロパティから構成されると考えモジュール化する。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[7]により拡張 DSM のクラスタリングを行い、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する。クラスタリングの結果、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決定し、階層構造モデルを作成する。

(4) プロパティ中心設計

1) 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仕様書より分析して振舞い設計表を作成し、振舞い設計表と依存関係モデルを組み合わせて振舞いモデルを作成する。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可能なため、自動車全体の協調制御設計が可能となる。

2) プロパティを介した競合特定: ユースケースマップ[6]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。プロパティで複数サービスのユースケースパスが重複すると、複数サービスがプロパティの一貫性を失う変化を及ぼし、サービス競合が発生する可能性がある。非機能要求に影響するプロパティの影響伝搬は非機能要求毎に異なる。プロパティで複数の非機能要求の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。ユースケースマップの適用で、サービス競合と非機能要求の競合の可能性をプロパティの影響伝搬の観点から特定できる。

6. 提案設計方法の車両運動統合制御システムへの適用

提案設計方法を車両運動統合制御システム (VDM: Vehicle Dynamics Management System) に適用した。従来システムの車両安定性の限界付近での制御ではなく、VDM はブレーキ、駆動力、ステアリング、サスペンションの協調により車両安定性の限界前から制御を開始しスムーズな車両挙動と高次元な安定性を実現する[9][10]。

6.1 プロパティの抽出

高級車の VDM の仕様書[11]より 68 個のプロパティを抽出し、4.2 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: VDM では 61 個の走行プロパティのみが抽出された(表 4)。

表 4 VDM の走行プロパティ

プロパティと自動車の対応関係	目標値	現在値
FL (Front-Left)	目標 FL 車輪速, 目標 FL ホイールシリンダ圧力, 目標 FL 車高, 目標 FL サスペンション減衰力	FL 車輪速, FL 回転方向, FL ホイールシリンダ圧力, FL 車高, FL サスペンション減衰力, FL ばね上加速度
FR (Front-Right)	目標 FR 車輪速, 目標 FR ホイールシリンダ圧力, 目標 FR 車高, 目標 FR サスペンション減衰力	FR 車輪速, FR 回転方向, FR ホイールシリンダ圧力, FR 車高, FR サスペンション減衰力, FR ばね上加速度
RL (Rear-Left)	目標 RL 車輪速, 目標 RL ホイールシリンダ圧力, 目標 RL 車高, 目標 RL サスペンション減衰力	RL 車輪速, RL 回転方向, RL ホイールシリンダ圧力, RL 車高, RL サスペンション減衰力, RL ばね上加速度
RR (Rear-Right)	目標 RR 車輪速, 目標 RR ホイールシリンダ圧力, 目標 RR 車高, 目標 RR サスペンション減衰力	RR 車輪速, RR 回転方向, RR ホイールシリンダ圧力, RR 車高, RR サスペンション減衰力, RR ばね上加速度
自動車全体	目標スロットルバルブ開度, 目標ヨーレート, 目標駆動力配分, 目標ヨー角, 目標ピッチ角, 目標ステアリングアシストトルク	前加速度, 後加速度, 右加速度, 左加速度, スロットルバルブ開度, スリップ角, スリップ角速度, ヨーレート, 駆動力配分, 上加速度, 下加速度, ロール角, ピッチ角, 予測スワット, ステアリングアシストトルク

(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。高級車の VDM の仕様書[11]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。仕様書と文献[4]に基づき VDM の非機能要求を抽出して、モデル化した(図 7)。以上の分析より VDM の依存関係モデルを作成した(付録 A-1, A-2)。

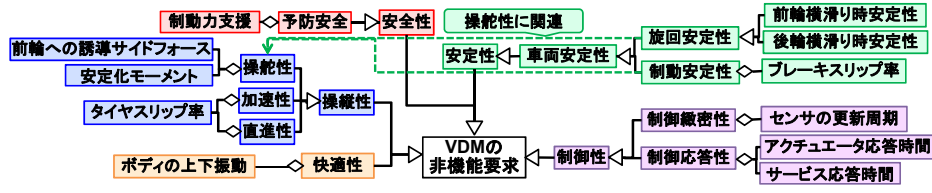


図 7 VDM の非機能要求のモデル化

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、ステアリング制御という振舞いに着目してプロパティをモジュール化した。また、車輪速センサに着目して、車輪速と回転方向をまとめて車速としてモジュール化した。モジュール化したプロパティを適用した依存関係モデルの DSM ツールによるクラスタリングの結果、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 5)に着目して階層構造モデルを作成した(図 8)。Cluster9 に対してサービスを設計すると、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。このように、生成されたクラスタに対するサービスの設計により、新たなサービスを追加できる。

表 5 ブレーキ制御、エンジン制御、車速を含むクラスタ

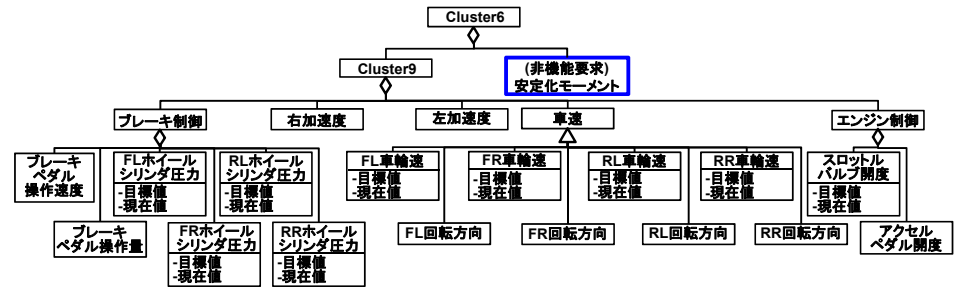


図 8 VDM の階層構造モデル(一部抜粋)

6.4 プロパティ中心設計

高級車の VDM の仕様書[11]より VDM を構成するサービスを 11 個抽出してサービスとプロパティ間、サービスと非機能要求間の依存関係を分析し、振舞い設計表を作成した(表 6, 表 7)。更に、依存関係モデルと振舞い設計表を組み合わせると振舞いモデルを作成した。

表 6 より複数サービスが単一プロパティに影響するパターンを発見できた。ABS、ブレーキアシスト、ナビブレーキアシスト、TCS(Traction Control System)、ESC(Electronic Stability Control)、ステアリング協調、ヒルスタートアシストが目標ホイールシリンダ圧力に影響し、サービス競合の可能性がある。更に、表 7 より単一プロパティが複数サービスに影響するパターンを発見できた。ブレーキペダル操作量はブレーキアシスト、ナビブレーキアシスト、i-Four、AVS(Adaptive Variable Suspension System)に影響し、サービス同時起動の可能性がある。

表 6 VDM のサービス-プロパティの振舞い設計表

複数サービスが単一プロパティに影響 → サービス競合の可能性を発見 XX: ハードリアルタイム

プロパティ	目標ホイールシリンダ圧力	FLホイールシリンダ圧力	FRホイールシリンダ圧力	RRホイールシリンダ圧力	目標スロットルバルブ開度	スロットルバルブ開度	目標車速	目標FL車速	目標FR車速	目標RR車速	目標FL車輪速	目標FR車輪速	目標RR車輪速	ブレーキペダル操作量	目標FL車輪速	目標FR車輪速	目標RR車輪速	目標スロットルバルブ開度	目標アクセルペダル開度	
エンジン制御																				
ブレーキ制御	XX	XX	XX	XX																
ABS																				
ブレーキアシスト	XX	XX	XX	XX																
ナビブレーキアシスト	XX	XX	XX	XX																
TCS	XX	XX	XX	XX																
ESC	XX	XX	XX	XX																
i-Four																				
AVS																				
ステアリング協調	XX	XX	XX	XX																
ヒルスタートアシスト	XX	XX	XX	XX																
センサの更新周期		XX	XX	XX																
アクチュエータ応答時間		XX	XX	XX																

表 7 VDM のプロパティ-サービスの振舞い設計表

サービス	エンジン制御	ブレーキ制御	ABS	ブレーキアシスト	TCS	ESC	4WD	AVS	ステアリングアシスト	ヒルホールド	スタートアシスト	センサの非機能
FL車輪速			XX						XX			XX
FL回転方向									XX			XX
FR車輪速			XX						XX			XX
FR回転方向									XX			XX
RL車輪速			XX						XX			XX
RL回転方向									XX			XX
RR車輪速			XX						XX			XX
RR回転方向									XX			XX
前加速度									XX			XX
後加速度									XX			XX
右加速度									XX			XX
左加速度									XX			XX
ブレーキペダル操作量				XX	XX				XX			XX
目標FLホイールシリンダ圧力		XX										XX
FLホイールシリンダ圧力												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
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
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
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
現在位置									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
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

単一プロパティが複数サービスに影響
サービス同時起動の可能性を発見

ユースケースマップを適用してサービスのユースケースパスが重複するプロパティを抽出し、サービス競合の可能性を発見した。ABS、TCS、ブレーキアシストのユースケースマップを作成すると、FL車輪速などの14個のプロパティでユースケースパスが部分的に重複する(図9)。ABS、TCS、ブレーキアシストでのサービス競合の可能性を発見できた。

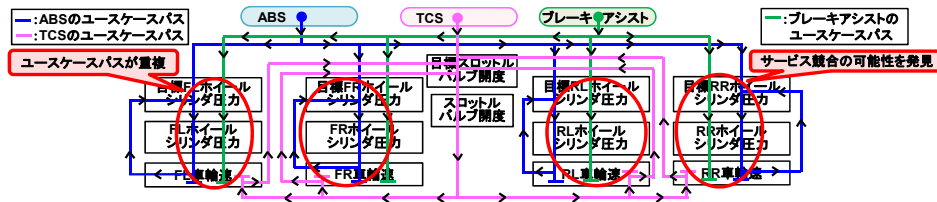


図 9 ABS, TCS, ブレーキアシスト間のサービス競合の可能性の発見

非機能要求に影響するプロパティの影響伝搬の順序をユースケースマップで表現し、ユースケースパスが重複するプロパティを抽出して非機能要求の競合の可能性を発見した。前輪への誘導サイドフォースと制動力支援の2つの非機能要求に着目すると、FLホイールシリン

ダ圧力などの8個のプロパティでユースケースパスが部分的に重複する(図10)。前輪への誘導サイドフォースと制動力支援の2つの非機能要求間で競合の可能性を発見できた。

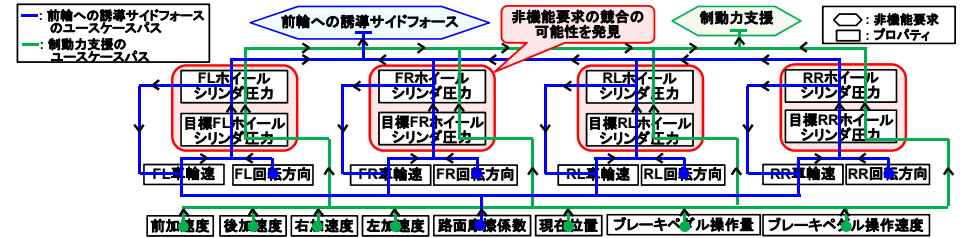


図 10 非機能要求間の競合の可能性の発見

7. 提案設計方法の評価

(1) プロパティのモデル化

提案設計方法では、自動車、周辺環境、ユーザに着目してプロパティを4種類のモデルで表現した。振舞いはプロパティの変化として表現されるため、プロパティのモデル化により自動車に加え周辺環境、ユーザを含む振舞いのモデル化が可能となる。依存関係モデルは、クラス図と拡張DSMを用いてプロパティ間の依存関係と構造を示し、依存関係の数が増加した場合でも依存関係の表現が容易となる。階層構造モデルにより、プロパティの階層構造を表現することでセンサやアクチュエータの構成の違いを抽象化してモデルを共通化できた。階層構造モデルにより、車種に非依存で統一的なモデルの作成が可能となる。

(2) 機能(サービス)実行の振舞いへの影響分析

従来の設計方法では機能に着目するため、機能間の影響の特定は容易である。しかし、複数のECUに機能が分散して個別に制御を行うため、機能の実行がプロパティに与える影響、プロパティ間の影響、プロパティが機能に与える影響の特定が困難であった。

提案設計方法では、プロパティに着目した振舞いのモデル化によりプロパティ間の依存関係やサービスとプロパティ間の依存関係を視覚化して表現した。そのため、プロパティ間の影響、サービスとプロパティ間の影響の特定が容易となる。更に、プロパティを介することでサービス間の影響の特定も可能となる。

(3) 機能(サービス)実行の非機能要求への影響分析

自動車の協調制御は分散した機能のネットワークを介した協調により実現される。従来の設計方法では機能に着目するため、協調制御の結果が影響する非機能要求の特定が困難であった。

提案設計方法では振舞いモデルによりプロパティと非機能要求間の影響を表現し、サービスが変化させたプロパティが影響する非機能要求を特定できる。非機能要求を満たすために

どのサービスを実行すべきか分析可能となるため、非機能要求を満たす協調制御設計が容易となる。

(4) 競合の特定

従来の設計方法では機能に着目するため、分散する機能が個別に制御を行う場合の機能競合や非機能要求の競合の特定が困難だった。提案設計方法はユースケースマップを用いて、サービスが影響を及ぼすプロパティと、非機能要求に影響を与えるプロパティ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あるいは、非機能要求間の競合の可能性を特定できる。

8. 考察

(1) 提案設計方法に対する考察

提案設計方法では拡張 DSM のクラスタリングによりプロパティを階層構造化する。クラスタ毎のサービス設計により協調制御の段階的な設計が可能となる。自動車全体の協調制御をまとめて設計するのではなく、段階的に設計した協調制御の組み合わせにより自動車全体の協調制御を実現できる。

(2) 関連研究との比較に基づく考察

a) 自動車組込みソフトウェアアーキテクチャモデルとの比較

文献[5]では車種や開発組織に非依存なアーキテクチャフレームワーク(dAF)が着目すべき5つの観点が提案されている。提案した設計方法を文献[5]の5つの観点から考察する(表8)。提案設計方法は1)~4)までの観点を表現する。5)は関連するステークホルダに対する観点のため、協調制御設計では考慮する必要がない。以上より提案設計方法に基づくアーキテクチャは車種や開発組織に非依存な自動車共通の協調制御アーキテクチャといえる。

表 8 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
1) 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
2) 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
3) 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
4) 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
5) 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

b) DSM との比較

自動車組込みソフトウェアでは非機能要求を満たす設計が必要となるため、プロパティの影響伝搬とプロパティの非機能要求への影響を表現するモデルが必要である。DSM は、プロパティ間の依存関係と階層的な関係性は表現できるが、プロパティの非機能要求への影響を表現できない。拡張 DSM は DSM の列を拡張して列の要素として非機能要求を表現することで、プロパティ間の依存関係に加え、プロパティの非機能要求への影響を表現可能である。

拡張 DSM により非機能要求を満たす協調制御設計が可能となる。

9. 今後の課題

特定したサービス競合や非機能要求の競合の可能性を回避する方法を確立する必要がある。競合回避方法の確立により、競合を回避した協調制御の設計が可能となる。

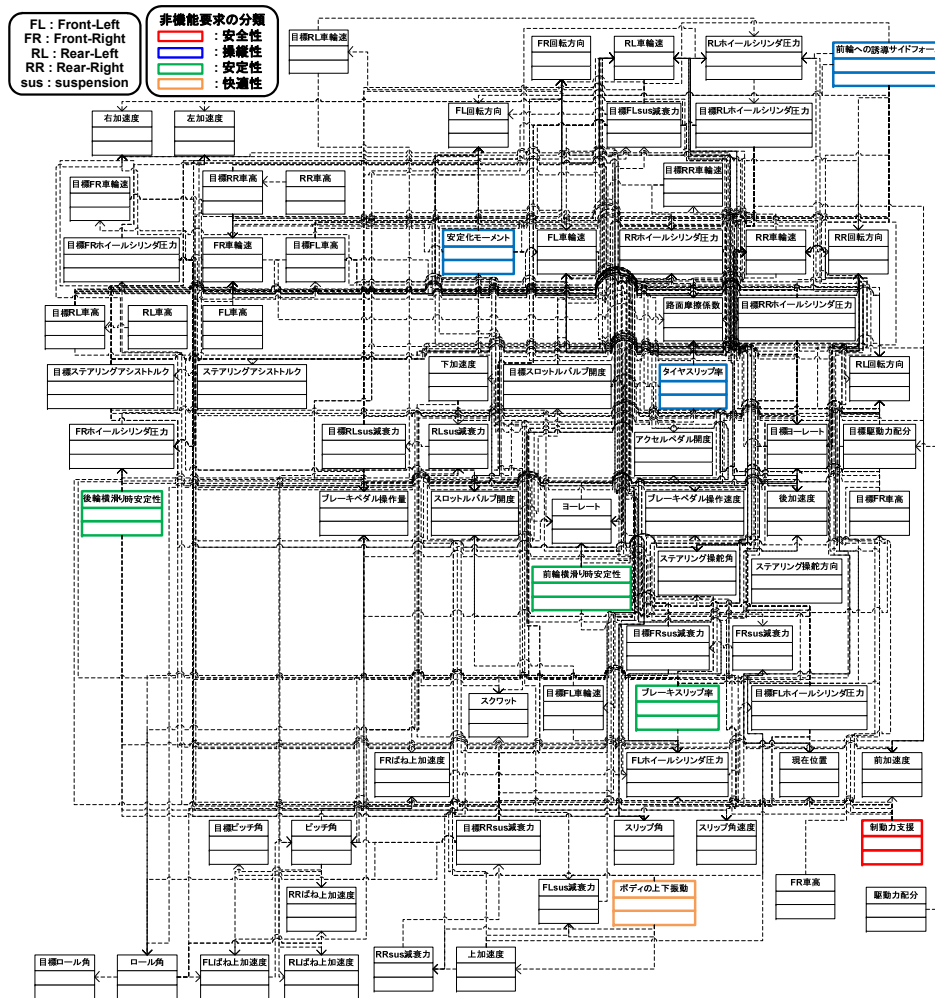
更に、提案設計方法に基づき作成した協調制御ソフトウェアアーキテクチャの実装を行う必要がある。実装によりサービス競合の回避とサービスの協調制御が可能か確認し、提案設計方法の有効性と妥当性、実現可能性を評価する。

10. まとめ

本稿では、プロパティに基づく自動車組込み協調制御ソフトウェアアーキテクチャの設計方法を提案した。プロパティを4種類のモデルで表現し、自動車全体の振舞いをモデル化した。自動車の非機能要求を満たす協調制御の設計を可能にするため、DSM を拡張した拡張 DSM 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全体の振舞いのモデル化と、プロパティを介したサービス競合と非機能要求の競合の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。

参考文献

- 1) S. T. Albin, The Art of Software Architecture: Design Methods and Techniques, Wiley, Apr. 2003.
- 2) 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, 自動車技術会論文誌, Vol. 40, Dec. 2008, pp. 1599 - 1604.
- 3) C. Y. Baldwin, K. B. Clark, Design Rules: The Power of Modularity, MIT Press, 2000.
- 4) R. Bosch GmbH, ボッシュ自動車ハンドブック, シュタールジャパン, Jun. 2005.
- 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) Cambridge Advanced Modeller (CAM), <http://www-edc.eng.cam.ac.uk/cam/>
- 8) O. Larses, Applying Quantitative Methods for Architecture Design of Embedded Automotive Systems, Proc. INCOSE 2005, Jul. 2005.
- 9) 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.
- 10) 見市 善紀, 統合安全コンセプト, 自動車技術, Vol. 63, No. 2, Feb. 2009, pp. 82 - 88.
- 11) トヨタ自動車, CROWN MAJESTA 新型車解説書 URS206 / UZS207, Mar. 2009.
- 12) トヨタ自動車, PRIUS 新型車解説書 NHW20 系, Sep. 2003.



付録 A-2 VDM の拡張 DSM