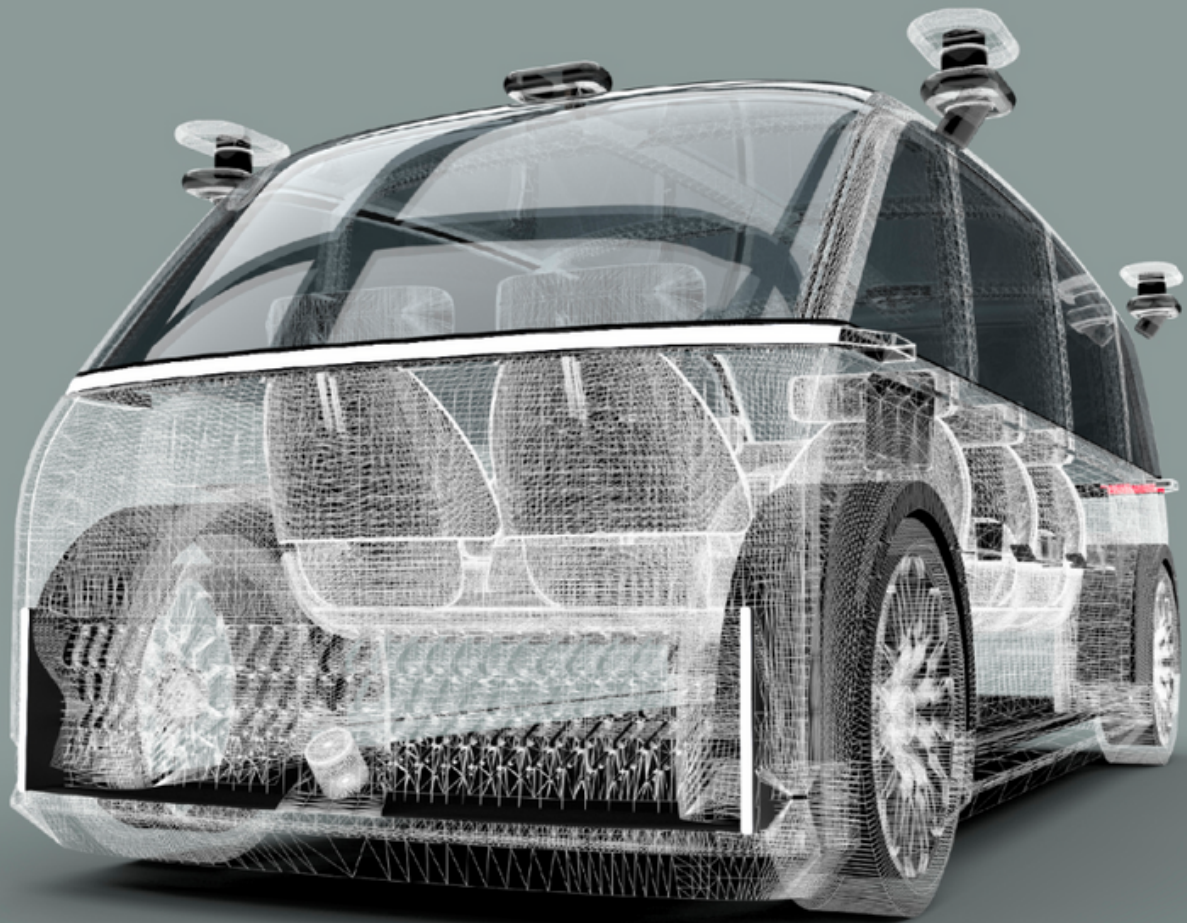


L4 Custom Design Guidelines



目次

概要	3
1. 車両準備	3
2. E/E (Electrical/Electronic) アーキテクチャ設計	3
3. ドライブ・バイ・ワイヤ化	4
3.1 車両改造	4
3.2 車両インターフェース	5
3.3 性能要求	5
3.4 安全要求	6
4. 外界センサー配置	7
4.1 要件定義	7
4.2 外界センサーの検討	8
5. 自動運転システム開発	9
5.1 自動運転ソフトウェア開発	9
5.2 ECU設計	9
Emergency Stop	10
Fail Operational	10
6. 評価	11
ドライブ・バイ・ワイヤの評価	11
外界センサーの評価	11
自動運転ソフトウェアの評価	12
7. 実装例	13
7.1 小型EVバス	13
駆動機能	14
操舵機能	14
制動機能	14
VCU-Additional	14
自動運転システム	14

概要

本書は、レベル4水準の自動運転に対応した車両の開発におけるティアフォーとしての全体設計指針をまとめたガイドラインである。本ガイドラインでは、自動運転車両の開発において必要な一連の設計・評価についてまとめる。

1. 車両準備

自動運転車両を開発するために、はじめにベースとなる車両を選定、調達する必要がある。自動運転車両のベースは、主に以下の2つのケースに大別される。

1つ目は、自動運転車両向けに設計・開発された車両の場合である。本車両は、自動運転ソフトウェアの搭載を前提に開発されているため、予めドライブ・バイ・ワイヤ化されており、車両と自動運転ソフトウェア間のインターフェースを合わせるだけで自動運転車両の開発が可能である。また、自動運転ソフトウェアからの制御性の観点も考慮されていることが期待できる。ただし、自動運転車両の市場規模はまだ小さく、量産されていない為にコスト、品質、アフターサポートの面での課題が存在する。

2つ目は、既存のマニュアル運転を前提に開発された車両の場合である。本車両は、自動運転向けに開発されていない為、ドライブ・バイ・ワイヤ化されておらず各部に改造が必要となり、また制御系がブラックボックス化されているためその解析や対応にコストを必要とする。しかし、ベース車両のコストは安く、品質面においても優れているメリットが有る。

自動運転車両を使って実現したいこと、調達可能な車種、保持している設備など様々な要素を考慮し、最も適したベース車両を選定し、調達する。

2. E/E (Electrical/Electronic) アーキテクチャ設計

自動運転車両は、自動運転ソフトウェアを中心とした開発が求められる。故に車両はSDV (Software-Defined Vehicle: ソフトウェア定義型自動車)である必要がある。本章ではSDVを実現するために必要なE/Eアーキテクチャについて述べる。

自動運転車両では、自動運転ソフトウェアが中心となり考え、指示を出す。故に自動運転ソフトウェアから車両の各部制御指示が可能であり、車両に搭載されている全てのセンサーのデータが取得可能である必要がある。一方、車両に搭載されているセンサーや制御対象のインターフェースは様々である。図1に自動運転車両の概要構成を示す。本構成では自動運転ソフトウェ

ア(図中AD System)が車両を制御するために、自動運転ソフトウェアの出力を車両固有の制御信号に変換するためのVCU (Vehicle Control Unit) を設ける。そうすることで自動運転ソフトウェアは、VCUを経由し車両の制御、情報を管理することが可能となる。VCUは自動運転ソフトウェアからの指示の元、車両に搭載されているEBS (Electronic Braking System)やEPS (Electronic Power Steering)などの各コンポーネントを制御する。

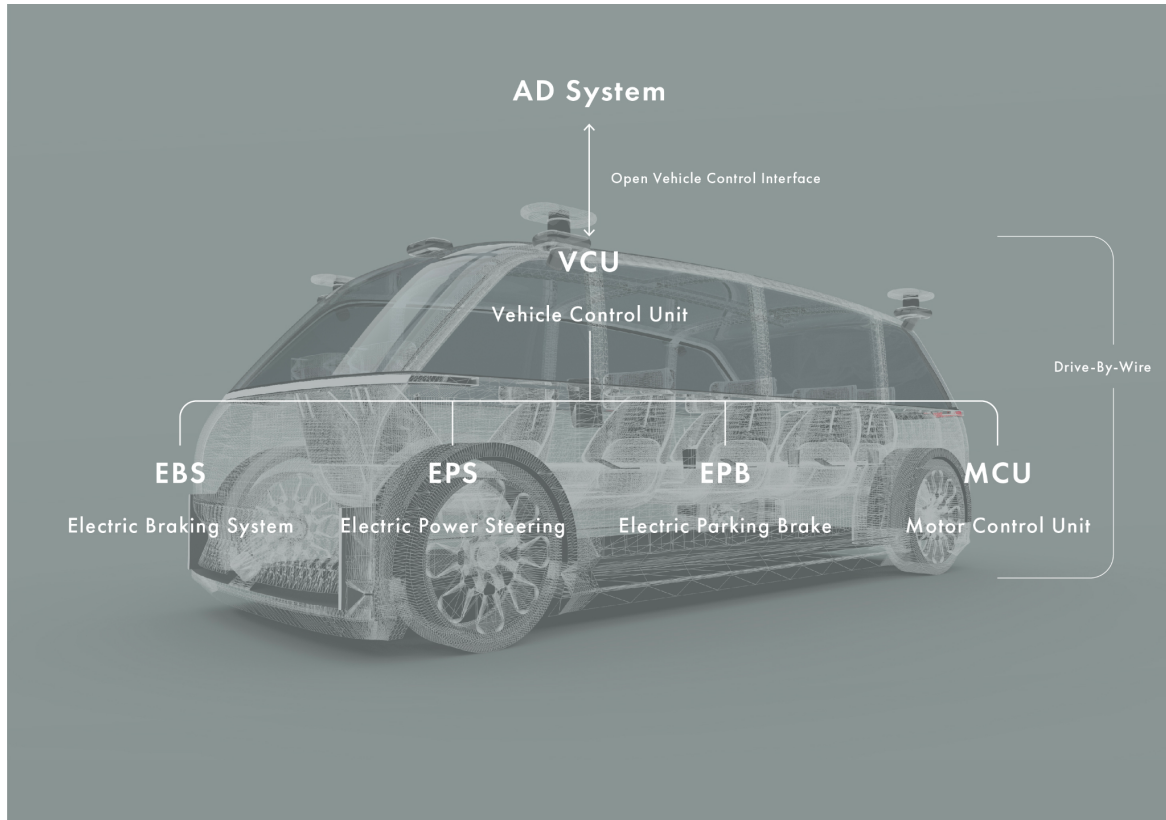


図1 自動運転車両の構成

3. ドライブ・バイ・ワイヤ化

本章では、自動運転車両に必要なドライブ・バイ・ワイヤについて述べる。

3.1 車両改造

ドライブ・バイ・ワイヤ化に必要な車両の改造方法について述べる。自動運転車両を開発するにあたり選定したベース車両の状況として主に3つのケースが存在する。

1つ目は、車両を開発・製造したOEMのサポートのもと、図1のVCU及びインターフェースまで含めて提供されている場合である。本ケースの場合、車両への改造は必要なく最も容易に自動運転車両の開発を行うことができる。

2つ目は、車両を開発・製造したOEMもしくは搭載されているコンポーネントのサプライヤーのサポートのもと、車両の内部情報や、EBSやEPSなど各コンポーネントのインターフェースの開示があるが、VCUの追加・搭載が必要な場合である。本ケースの場合、VCUの追加開発が必要になる。

3つ目は、車両を開発・製造したOEMなどのサポートもなくブラックボックスの場合である。本ケースの場合、制御可能なコンポーネントへの置き換えや自動運転ソフトウェアが必要とする車両情報の取得の為に車速センサー、操舵角センサーといったセンサーの追加が必要となる。

3.2 車両インターフェース

自動運転ソフトウェアと車両との間のインターフェースを定義する必要がある。本インターフェースは自動運転ソフトウェアから車両への制御指示と車両から自動運転ソフトウェアへの車両情報の2つになる。表1に車両インターフェースの例を示す。本インターフェースは1例であり、車両仕様によっては異なるインターフェースを用意する必要がある場合もある。

分類	項目	補足
制御指示	加速度指示	m/s ²
	ブレーキ指示	加速度指示で減速が可能な場合は不要
	操舵角指示	radian
	方向指示器指示	
	ギア指示	
	ドア開閉指示	
車両情報	ワイパー操作	
	車速	m/s
	操舵角	radian
	ギアポジション	
	方向指示器状態	
	故障診断情報	

表1 車両インターフェースの例

3.3 性能要求

ドライブ・バイ・ワイヤはブレーキやステアリングなどの駆動系を電動化し、電気信号による制御を可能にすることで、自動運転システムが車両の動きを制御できるようにするための機能である。ターゲットとなるODD (Operational Design Domain: 運行設計領域)で定義された走行領域をユーザーニーズを満たしつつ安全に走行するためには、車両制御処理における高い応答性や車両運動検知精

度が求められる。そのため自動運転車両として一定の性能を担保するため自動運転ソフトウェアとドライブ・バイ・ワイヤとで互いに性能指標を定義し、それに応じた開発が必要となる。

表2にドライブ・バイ・ワイヤの性能要求例を示す。全車両が満たすべきものではなく、これらの性能要求は車両、ODD設計、安全設計をもとに最終決定するものである。

項目	要件
モーター制御	全車速域において指示加速度と実加速度の差が10%以内であること
	応答性が出力指示を受けてから実際に出力されるまでの時間0.2sec以内、出力値が指示値に達するまでの時間0.6sec以内であること
ブレーキ制御	全車速域において指示加速度と実加速度の差が10%以内であること
	応答性が無駄時間0.2sec以内、無駄時間+時定数0.6sec以内であること
ステアリング制御	全車速域において指示操舵角度と実操舵角度の差が5%以内であること
	応答性が出力指示を受けてから実際に出力されるまでの時間0.1sec以内、出力値が指示値に到達するまでの時間0.5sec以内であること
車速センサー	車速真値に対して誤差3%以内で取得できること
	周期50Hzで車速が取得できること
	0.1m/s以上で車速が取得できること
操舵角センサー	ヨーレート真値に対して操舵角と2輪モデルから計算したヨーレートが誤差3%以内で取得できること
	周期50Hzで操舵角が取得できること

表2ドライブ・バイ・ワイヤの性能要求例

3.4 安全要求

レベル4の自動運転車両は、レベル2車両より更なる高度な安全性が求められる。運転者が運行責任を負うレベル2車載システムの設計構想はフェールセーフが基本であり、走行中にシステム機能失陥となった場合には電子制御機能(運転支援)を停止し、運転者の責任において安全な状態を確保することになる。一方、一部条件下でシステムが運行責任を負うレベル3以上の車両では、システム機能失陥時の安全確保もシステムが行う場合があるため、リスクを最小化するためのMRM(Minimal Risk Maneuver)に高い信頼性および安全性が要求される。またレベル4以上の車両は運転を代行できる要員不在で運行されるため、システム障害により緊急停車したのちに他の交通参加者の交通を妨げないよう道路脇のオープンスペースまで移動するようなMRM機能が求められる。これらの要求に対応するために少なくとも、減速制御、横移動制御に使用される

モジュールや故障診断の確実性を確保するためのセンサーデバイスは冗長化される必要がある。これらレベル4水準の車両のコアモジュール群を総称し冗長なドライブ・バイ・ワイヤと呼ぶ。図2に冗長なドライブ・バイ・ワイヤの概要を示す。

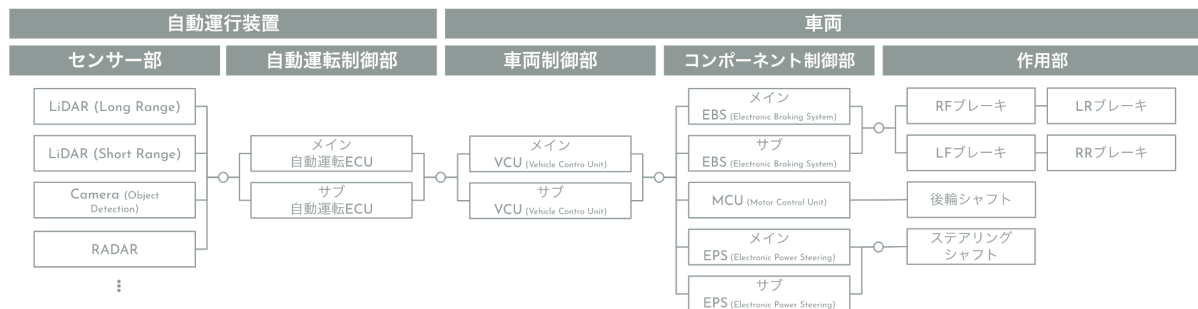


図2 冗長なドライブ・バイ・ワイヤの概要

4. 外界センサー配置

本章では、自動運転車両に搭載する外界センサー構成の設計について述べる。

4.1 要件定義

外界センサー配置の要件を定義する上で、まずはODDの定義及びODD内に存在するユースケースを洗い出す必要がある。自動運転車両が対応すべきユースケースを決めることで、認識機能及びセンサーに対する要件が定義される。図3に交差点右折のユースケース例を示す。右折のユースケースからセンサーの要件を算出する。自車が交差点を安全に通過するために必要な時間と認識処理遅れ時間、想定する対向車の速度から、自車が直進車を妨害せずに右折するために必要な外界センサーの検出距離を算出することができる。検出距離及び採用する物体検出アルゴリズムの仕様から外界センサーの要件を定義する。

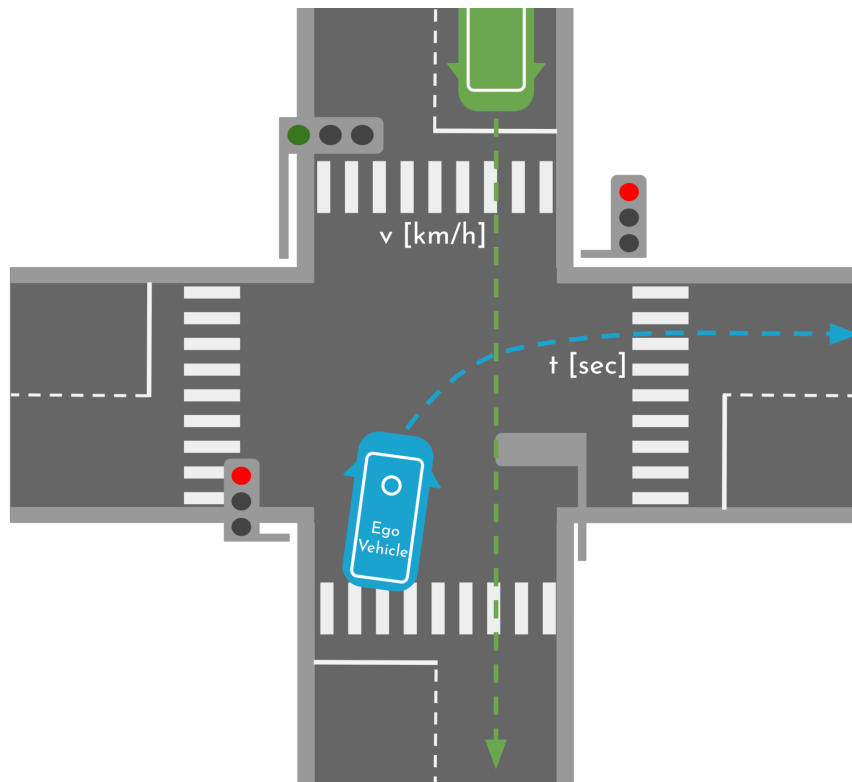


図3 交差点右折のユースケース例

4.2 外界センサーの検討

要件に従って外界センサーの機種及び搭載位置を検討する。図4にセンサー仕様の設計評価のためのセンサーシミュレーションの一例を示す。対応すべきユースケースをシミュレーションで模擬し、最適なセンサーの機種及び搭載位置を検討できる。

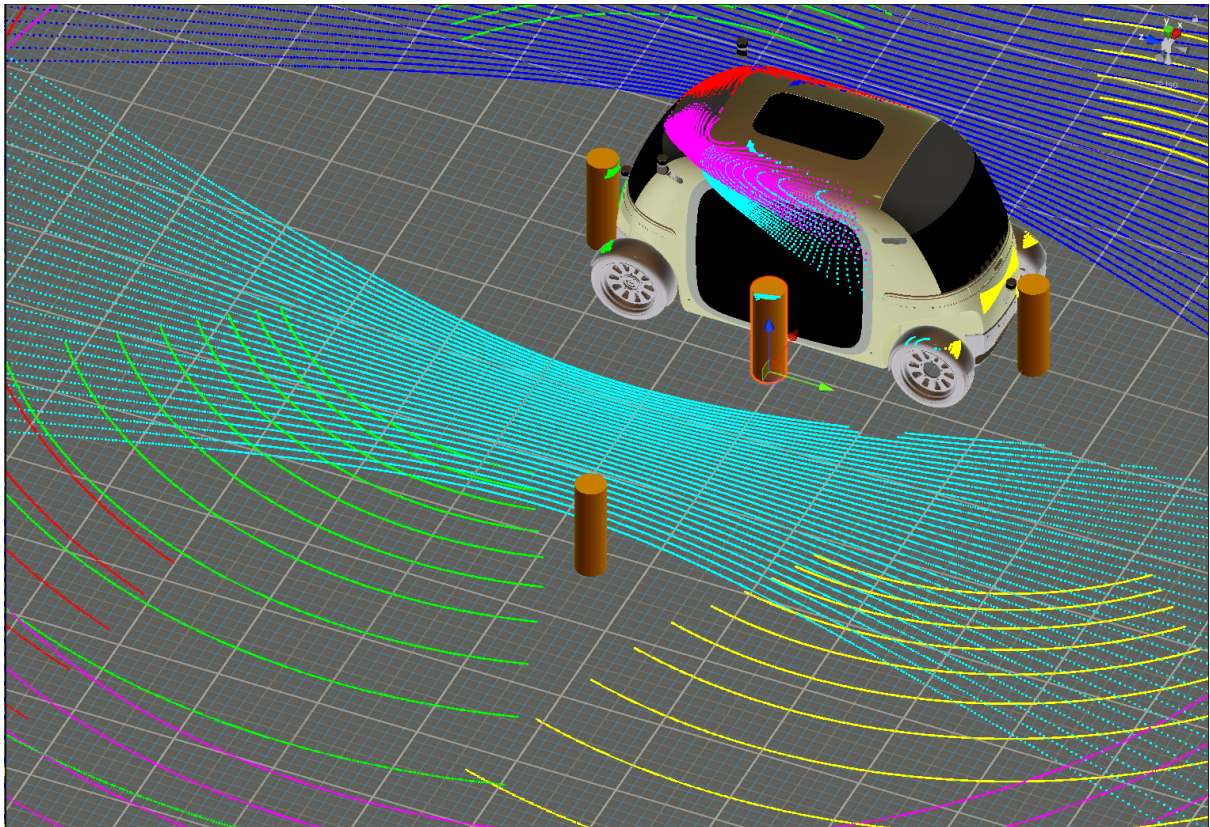


図4 センサー仕様の設計評価のためのセンサーシミュレーションの一例

5. 自動運転システム開発

本章では、自動運転システムの大まかな開発の流れを説明する。

5.1 自動運転ソフトウェア開発

自動運転ソフトウェア開発においても外界センサー配置と同様にODDの定義及びODD内に存在するユースケースを洗い出すところから始める。対応すべきユースケースを元に自動運転ソフトウェアの要件を定義し、機能の開発を行う。また機能開発と並行して満たすべきユースケースを評価するためのシナリオを作成し、機能の検証を行えるようにする。

5.2 ECU設計

前章で述べられたとおりレベル4の自動運転車両には、レベル2の場合よりさらに高度な安全性が求められる。故障発生時に自動運転システムは当該故障を検出し十分速やかな時間のうちに安全状態に移行する必要がある。このようなシステム機能失陥時の安全確保のためのMRMIはODD、安全要求で決定されるがここで自動運転システムで実現すべきMRMうち2つの代表例であるEmergency StopとFail Operationalを取り上げる。

Emergency Stop

ステアリング動作はせず最大減速で車両を止めるMRMである。

本MRMはこのような緊急停止の挙動が受け入れられるケースで適用できる可能性がある。例えば制限されたプライベート空間での低速走行するユースケースの場合であれば故障検出後の緊急停止でも安全が確保可能なためである。また本MRMは比較的低コストで実現が可能である。

Fail Operational

最も近い安全な場所にステアリング動作をしながら移動して車両を止めるMRMである。

本MRMは可用性が求められるケースで必要になる可能性が高い。例えば公共の道路環境でのレベル4自動運転の場合であれば故障検出後、システムは安全を確保しつつ予備動作を行なう必要があるためである。機能実現の自由性が高い一方で比較的成本は高くなりやすい。

表3にECUに対する要求例を示す。上記2つの自動運転システムで実現すべき代表的なMRMを可能とするためには、以下のような要求を満たせるECUの構成を実現する必要がある。

	Emergency Stop	Fail Operational
ECU構成に対する要求	<ul style="list-style-type: none">- 故障が必ず検出できること- 検出後にVCUにブレーキ指示できること	<ul style="list-style-type: none">- 故障が必ず検出できること- 検出後にVCUにブレーキ指示できること- 故障レベルに応じた縮退動作ができること- 1つのECUが故障しても、代替りのECUで縮退動作できること

表3 ECUに対する要求例

図5にECU構成例を示す。図5はECUに対する要件を満たしつつEmergency StopおよびFail Operationalを実現するECUの構成の代表例を示したものである。左下の構成であれば単純な構成により低コストを満たしつつEmergency Stopも実現可能である一方、実現できるレベル4自動運転のユースケースは限定的になる。右上にいくほど構成は複雑になるが、安全性、可用性を高めることが可能となり、より広範なレベル4自動運転のユースケースを実現できるようになる。

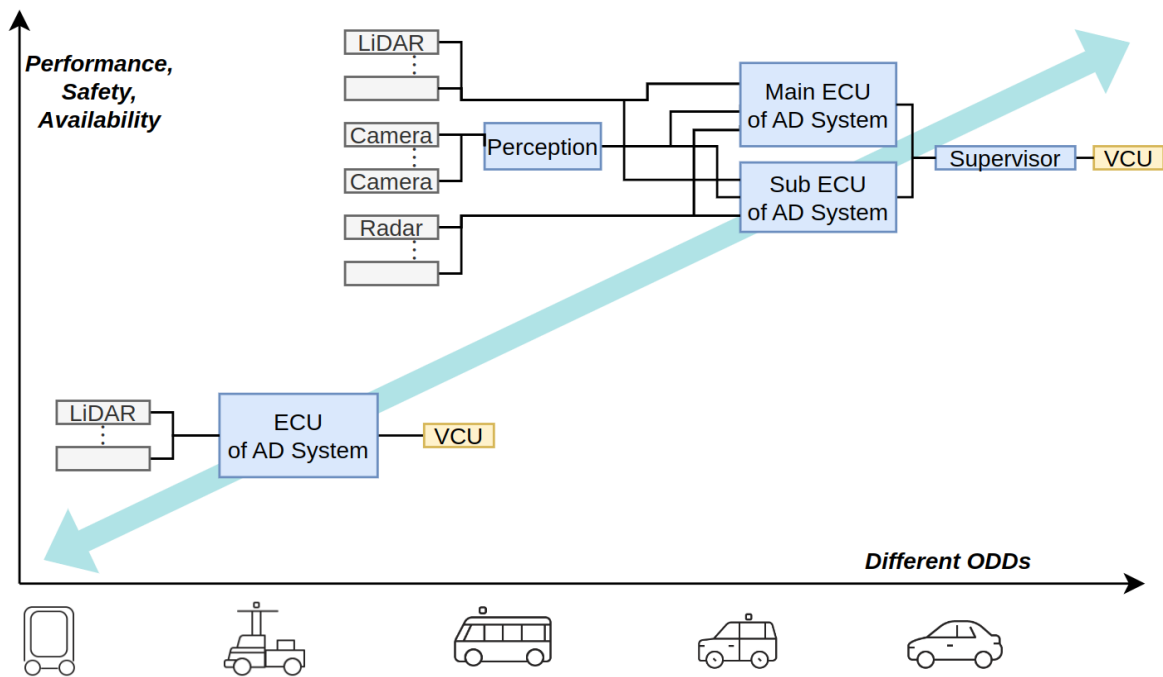


図5 ECU構成例

6. 評価

本章では、自動運転車両の評価について説明する。評価は3つに分かれる。ドライブ・バイ・ワイヤの評価、センサー評価、自動運転ソフトウェアの評価である。以下にそれぞれ説明する。

ドライブ・バイ・ワイヤの評価

ドライブ・バイ・ワイヤの設計・実装が完了した車両は、前述した性能要求を満たし実際に自動運転車両として使用できることを確認するための評価が必要である。ドライブ・バイ・ワイヤへの評価として、以下のような項目の試験を順に実施する。

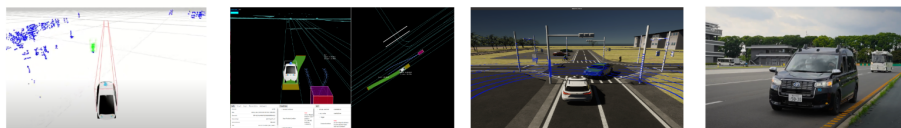
車速センサーや舵角センサーなどのセンシング精度の確認試験を行う。この値を用いて車両状態計測するために、リファレンスとなる計測器での計測結果で較正しておく。各車両機能の自動運転時の精度確認を行う。精度試験では、自動運転ソフトウェアから指示値を入力し、そのセンサーに基づく実際の値が想定通りの値になっているかを確認する。例として、指示トルクを自動運転システムから入力した場合は、センサーで計測した車速から加速度を計算し、自動運転ソフトウェアで計画していた加速度通りになっているかを確認し、差異がある場合は補完する。

外界センサーの評価

シミュレーターにて検証を行ったセンサー性能を満たすため、まずはセンサー単体の性能評価、信頼性評価を実施し、その後センサーを実車に搭載して実データを取得しての評価を行う。実データを用いた評価では、センサーの出力結果だけでなく物体検出アルゴリズムを動作させ、十分な性能が得られていることを確認する。

自動運転ソフトウェアの評価

ユースケースを実現するための機能の設計・実装が完了した後、機能の正しい振る舞い・ユースケースが実現できるようになったかを評価し、確認する必要がある。表4に評価方法の例を示す。それぞれ検証したい項目ごとに最適な評価方法を選び評価を行う。全て実車試験での評価が最も確実ではあるが、評価に掛かる時間、コストが現実的ではないため、シミュレータを活用し、安全性と効率性を両立した評価を実現する。



	Driving Log Replayer	Scene Simulator for Path Planning	Scene Simulator for Autoware (AWSIM)	Real Vehicle Test
Sensing	✓		✓	✓
Localization	✓		✓	✓
Perception	✓	(✓)	✓	✓
Planning		✓	✓	✓
Control		(✓)	✓	✓

表4 評価方法の例

7. 実装例

7.1 小型EVバス

本章では、小型EV自動運転バスの設計事例を紹介する。ベース車両となる小型EVバスがあり、これを自動運転に対応できるように改造した事例である。図6に小型EVバスの構成図を示す。図6はベース小型EVバスの構成をベースに自動運転対応するために追加・カスタマイズしたシステム構成を表したものである。

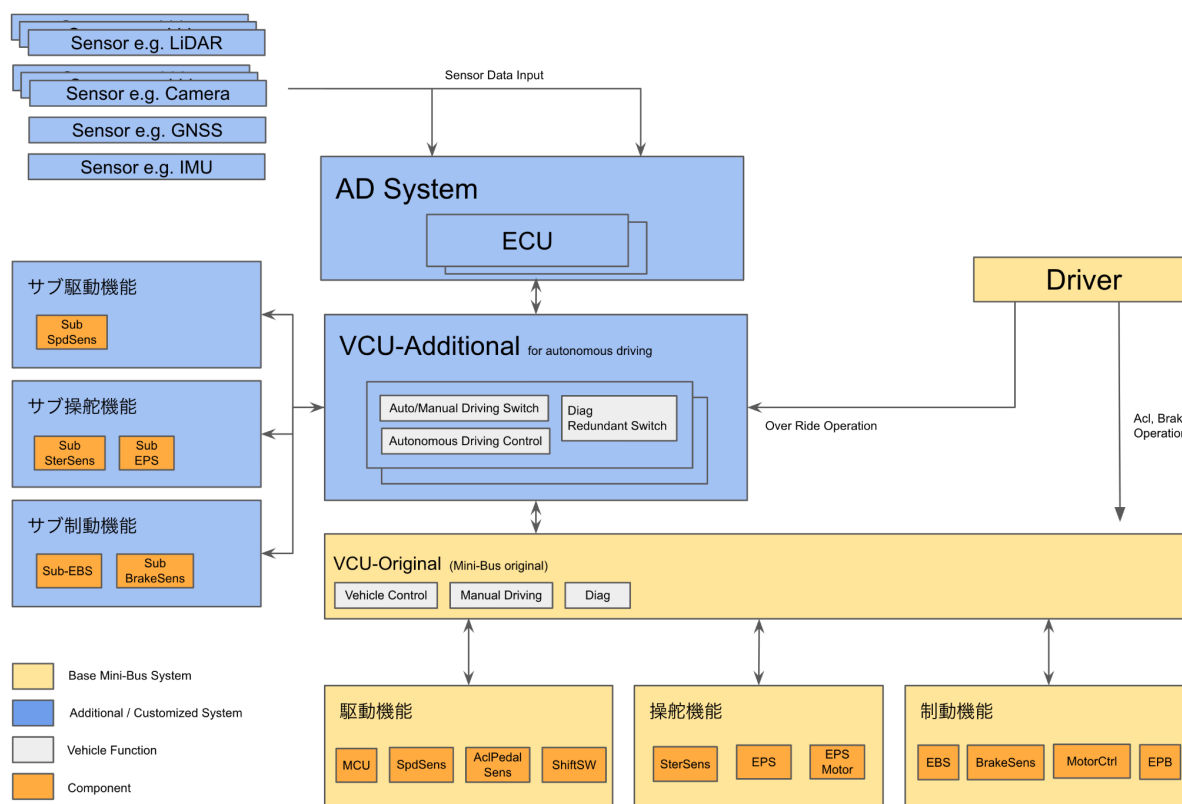


図6 小型EVバスの構成図

以下に安全要求を満たすために実施した開発例をまとめる。実際には多岐に渡る開発が必要であり、最も重要なことはエンジニアがODD、安全ゴールを意識しながら最善のバランスを図った自動運転システム、車両EVシステムを設計することである。

駆動機能

EVシステムの駆動機能を構成するコンポーネントとして、モーターおよびモーターコントローラ (図中MCU) や車速センサー (図中SpdSens)、アクセルペダルセンサー (図中AclPedalSens)、シフトスイッチ (図中ShiftSW)を想定する。

ベース小型EVバスにて駆動機能における車速の取得方法がタイヤに取り付けられている車速センサー値のみである場合、車速センサーが故障したとき、現在の車速が分からず意図した自動運転走行ができなくなる。本構成例では別の車速センサー(図中SubSpdSens)を追加で持つことで冗長化を実現している。

操舵機能

EVシステムの操舵機能を構成するコンポーネントとしては、EPS(Electric Power Steering)、EPSモーター(図中EPS Motor)、ステアリングシャフト、ステアリングロッド、舵角センサー(図中SterSens)などで構成される。

ベース小型EVバスにて操舵機能における舵角の取得方法がステアリングシャフトに取り付けられている舵角センサー値のみである場合、舵角センサーが故障したとき、現在舵角が分からず意図した自動運転走行ができなくなる。本実装例ではもう一つ舵角センサーを取り付けることで舵角取得の冗長化を実現している。

制動機能

EVシステムの制動機能を構成するコンポーネントとしては、モーター(回生)(図中MotorCtrl)、EBS、EPB、ブレーキペダルセンサー、ブレーキマスターシリンダー、負圧ポンプ、車速センサー、油圧センサーなどで構成される。

ベース小型EVバスにて制動機能における制動力発生源はモーターによる回生とEBSの2つである場合を考える。EBSが故障し、モーターのみで十分な制動力を発生できないとき、制動距離が伸びてしまい安全な距離で停車することが出来ない。本実装例ではSubEBSを取り付け冗長化することで制動機能の冗長化を実現している。

VCU-Additional

本VCUは追加した冗長システムを制御することを主とし、自動/手動運転モード判定や故障診断・冗長系への切替制御を行うために追加したものである。本実装例においてはこのVCU-Additionalが単一障害点になることを回避するためにVCU-Additional内部の冗長化を実現している。

自動運転システム

本構成例ではECUを2台使い冗長化することでFail Operational動作を実現している。