

# 自動運転システム開発におけるシミュレーション検証 のためのテストケース生成手法の提案

鈴木 玄貴<sup>1</sup> 富田 堯<sup>1</sup> 青木 利晃<sup>1</sup> 河井 達治<sup>1</sup> 川上 大介<sup>2</sup> 千田 伸男<sup>2</sup>

**概要:** 近年、完全自動運転車開発に向け、先進的な運転支援システムの開発が活発化している。そのようなシステムでは安全性が重要であり、テスト工程では公道実験だけでなくシミュレーション検証が用いられている。シミュレーション検証では、各テストシナリオからテストケース（場面の列）群を網羅的に作成することが重要となる。本稿では、テストシナリオ内の車両の位置関係とその変化を記述することが可能な道路位置関係図、並びに、図が含意する場面及びその列を網羅的に導出するテストケース生成手法を提案する。評価実験により、典型的なテストシナリオにおける車両の振る舞いを道路位置関係図として記述でき、それらの図からテストケース群を網羅的に作成することができることを確認した。

**キーワード:** 自動運転システム, シミュレーション検証, テストケース生成

## Test Case Generation Method for Simulation Verification in Autonomous Driving System Development

HARUKI SUZUKI<sup>1</sup> TAKASHI TOMITA<sup>1</sup> TOSHIAKI AOKI<sup>1</sup> TATSUJI KAWAI<sup>1</sup> DAISUKE KAWAKAMI<sup>2</sup>  
NOBUO CHIDA<sup>2</sup>

**Abstract:** Recently, the development of advanced driver-assistance systems has been more vigorous towards fully autonomous driving. Such systems are safety critical. Both public road experiments and simulation verification are performed in test processes. In simulation verification, it is important to exhaustively generate test cases (sequences of scenes) from test scenarios. In this paper, we propose Road Position Relation Diagram, which represents position relations among a subject vehicle and others and its changes in a test scenario, and also test case generation method which exhaustively produces scenes and its sequences implied from the diagram. In evaluation experiments, it was confirmed that we can describe vehicle behaviors in some typical scenarios as Road Position Relation Diagrams, and they can produce exhaustive test cases.

**Keywords:** Autonomous driving systems, Simulation verification, Test case generation

### 1. はじめに

自動運転車は、無人トラックの運送システムや判断能力が低下した高齢者の移動手段といった、様々な場面での活躍が期待される。近年、完全自動運転に向け、自動ブレーキや駐車支援システム等の先進運転支援システム（Advanced

Driver-Assistance System; ADAS）の研究開発が活発化している。自動運転レベル [1] は、各運転タスク（Dynamic Driving Task; DDT）に対して、システムとヒトのどちらが制御するかや、どのような条件を満たすことで自動運転とみなせるかを規定する時に用いられる指標である。この自動運転レベルでは、レベル 3 以上が自動運転とされ、レベル 1 及び 2 では運転支援とみなされる。

高安全な自動運転システムを開発するために、テスト工程では公道実験とシミュレーション検証が実施される。公道実験は、シミュレーション検証の結果を踏まえ、実際に

<sup>1</sup> 北陸先端科学技術大学院大学  
Japan Advanced Institute of Science and Technology  
<sup>2</sup> 三菱電機株式会社  
Mitsubishi Electric Corporation

よる実証実験により実際に問題がないかが検証される。実環境での検証が可能ではあるが、時間的・経済的コストが比較的高い。一方、シミュレーション検証では、車線変更や駐車といった運転時に想定されるシナリオに基づき、各シナリオの具体的なテストケース群を作成した上でテストが実施される。時間的・経済的コストが比較的低く、予め設定したシナリオを自由にテストを行うことが可能である。また、実機が不要なため、上流工程の内に検証を行うこともできる。そのため、シミュレーション検証をより効果的に利活用した開発効率化が強く求められており、シミュレーション検証のためのプラットフォームが整備されつつある [2], [3]。

本稿では、テストシナリオから想定される場面の網羅性担保を可能とするための道路位置関係図及びそれに基づいたテストケース生成手法を提案する。

## 2. 先行研究

自動運転について研究している代表的な団体として主に2つ存在している。1つ目は PEGASUS プロジェクト [4] である。このプロジェクトはドイツのエネルギー省が主導し、ドイツに存在する各自動車企業が協力して、自動車に必要な規定についての標準化を行っている。しかしながら、機密情報が多く、研究成果はあまり開示されていない。

2つ目は米国運輸省道路交通安全局 [5] (National Highway Traffic Safety Administration; NHTSA) である。NHTSA はアメリカ政府機関の一つであり、自動車関連の事故・安全性の研究を行っており、自動運転のテストに必要な情報を定義している [1]。本稿では比較的に情報を開示している NHTSA を定義及びアプローチを基にしたテストケース生成を取り扱う。文献 [1] で定義されている用語等を以下各節で述べる。

### 2.1 運行設計領域

自動運転システムのテストでは周囲状況の決定が必要になる。天気が晴天であるときと豪雨のときでは安全速度が違いうように、天気によって安全要求は異なる。また、一概に道路といっても、高速道路と一般道路、一般道路の中でも国道のような幹線道路と住宅街の細い生活道路では安全要求は異なる。

NHTSA ではこのような周囲の状況のパターンを運行設計領域 (Operational Design Domain; ODD) として形式的に定義している。この ODD は運転時に想定される周囲の状況を分類・整理して表にまとめたものであり、NHTSA のテストアプローチでは ODD を基にテストの状況を生成していくことになる。

### 2.2 対象物・事象検知・反応

自動運転レベルは、システムとヒトのどちらが制御を行

| Maneuver                         | SV Speed<br>kph (mph) | POV <sup>15</sup> Speed<br>kph (mph) | Location of POV_1   | Location of POV_2                                    | Location of<br>POV_3                                   |
|----------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---|--|--|
| Baseline 15<br>PLC_B_15          | 24<br>(15)            | N/A                                  | N/A   | N/A  | N/A  |
| Baseline 25<br>PLC_B_25          | 40<br>(25)            | N/A                                  | N/A   | N/A  | N/A  |
| Baseline 35<br>PLC_B_35          | 56<br>(35)            | N/A                                  | N/A   | N/A  | N/A  |
| Simple Positive 15<br>PLC_SP_15  | 24<br>(15)            | 24<br>(15)                           | Rear bumper 6 m<br>(20 ft) in front of SV<br>front bumper   | N/A  | N/A  |
| Simple Positive 25<br>PLC_SP_25  | 40<br>(25)            | 40<br>(25)                           | Rear bumper 6 m<br>(20 ft) in front of SV<br>front bumper   | N/A  | N/A  |
| Simple Positive 35<br>PLC_SP_35  | 56<br>(35)            | 56<br>(35)                           | Rear bumper 6 m<br>(20 ft) in front of SV<br>front bumper   | N/A  | N/A  |
| Complex Positive 15<br>PLC_CP_15 | 24<br>(15)            | 24<br>(15)                           | Rear bumper 8 m<br>(25 ft) in front of SV<br>front bumper   | Front bumper 25 ft (8<br>m) behind SV rear<br>bumper | N/A  |
| Complex Positive 25<br>PLC_CP_25 | 40<br>(25)            | 40<br>(25)                           | Rear bumper 8 m<br>(25 ft) in front of SV<br>front bumper   | Front bumper 25 ft (8<br>m) behind SV rear<br>bumper | N/A  |
| Complex Positive 35<br>PLC_CP_35 | 56<br>(35)            | 56<br>(35)                           | Rear bumper 8 m<br>(25 ft) in front of SV<br>front bumper   | Front bumper 25 ft (8<br>m) behind SV rear<br>bumper | N/A  |
| Simple Negative 15<br>PLC_SN_15  | 24<br>(15)            | 24<br>(15)                           | Rear bumper ≤ 5 m<br>(15 ft) in front of SV<br>front bumper | Front bumper even<br>with SV front bumper            | Front bumper ≤<br>15 ft (5 m) behind<br>SV rear bumper |
| Simple Negative 25<br>PLC_SN_25  | 40<br>(25)            | 40<br>(25)                           | Rear bumper ≤ 6 m<br>(20 ft) in front of SV<br>front bumper | Front bumper even<br>with SV front bumper            | Front bumper ≤<br>20 ft (6 m) behind<br>SV rear bumper |
| Simple Negative 35<br>PLC_SN_35  | 56<br>(35)            | 56<br>(35)                           | Rear bumper ≤ 8 m<br>(25 ft) in front of SV<br>front bumper | Front bumper even<br>with SV front bumper            | Front bumper ≤<br>25 ft (8 m) behind<br>SV rear bumper |

図 1 [1] の車線変更テストシナリオ

Fig. 1 Test scenarios for lane change (Table 60 in [1])

うかを大まかに定めたものであり、詳細に事項は不明確なものが多い。

そのため、NHTSA では対象物・事象検知・反応 (Object and Event Detection and Response; OEDR) を定義している。この OEDR は動的なイベントに対し、システムとヒトのどちらが制御すべきか、そして、システムが制御する場合にはどのような反応が正しいかを表にまとめたものであり、NHTSA のテストアプローチでは期待されるシステムの振る舞いに相当する。

### 2.3 テストシナリオとテストケース

NHTSA のアプローチでは、ODD と OEDR を用いて、各テストシナリオを記述してテストを実施する。ここで、テストシナリオとは駐車時や追従運転等、運転時に想定される大まかな状況である。自動運転をテストする上で、運転時に起こる場面の全てをテストすることは不可能であるため、シナリオを絞ってテストを行う。ここで、シナリオ記述・制約に合致する1試行が一般的にはテストケースに相当する。つまり、テストケースとは、テストシナリオにおいて実際に起こり得る場面の列を示している。

しかしながら、文献 [1] では、系統的なテストシナリオ作成手法は具体的には記述されていない。また、文献 [1] の車線変更テストシナリオ (図 1) では、シナリオ開始状態が与えられるだけで、「自車が車線変更を行う際に、他車も同様に車線変更を行おうとした場合」や「後方車が速度を上げてきた場合」のような他車の動作については記述されていない。つまり、テスト品質の重要な指標である網羅性 [6] を保証されていない。

表 1 道路位置関係図の各要素の直観的意味

Table 1 Intuitive meanings of elements in RPRD

| 要素          | 直観的意味          |
|-------------|----------------|
| 長方形 (通常ノード) | ある時点の自動車の状態    |
| 実線矢印        | 移動を伴う動作的アクション  |
| 破線矢印        | 視認等の非動作的アクション  |
| バー          | アクションの同期       |
| ひし形         | 判断 (条件分岐)      |
| スイムレーン      | 車線等の道路上の空間的区切り |

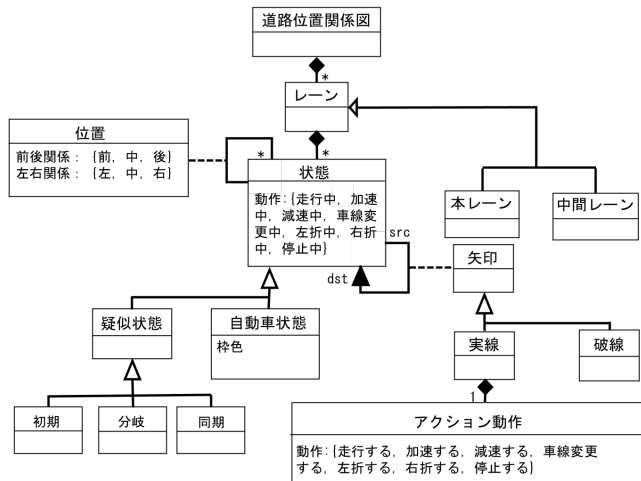


図 2 道路位置関係図のメタモデル  
Fig. 2 Metamodel of RPRD

### 3. 道路位置関係図

本節では、スイムレーンを用いる UML[7] アクティビティ図から着想を得た道路位置関係図 (Road Position Relation Diagram; RPRD) を提案する。

道路位置関係図は、自動車の位置関係とその変化を表現し、各テストシナリオで想定される自動車の動作について統合的にモデル化したものである。そのため、この図は実際に起こり得る場面の変化を網羅的に表現したものとなる。これにより、網羅的なテストケース生成が可能となる。

#### 3.1 概略

道路位置関係図は UML アクティビティ図から着想を得たものではあるが、表現するものは大きく異なる。大まか言えば、物理的な位置関係を図上の空間配置として抽象的に表現し、移動や視認などの振る舞いによりそれがどのように変化していくかを明確化する。

道路位置関係図の各要素の直観的意味とメタモデルはそれぞれ表 1 と図 2 に示す通りであるが、以下各節で道路位置関係図の構成要素について説明する。

#### 3.2 状態

道路位置関係図では、ラベル付き通常ノード (長方形)

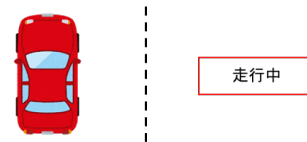


図 3 自動車状態ノード  
Fig. 3 Car-state node

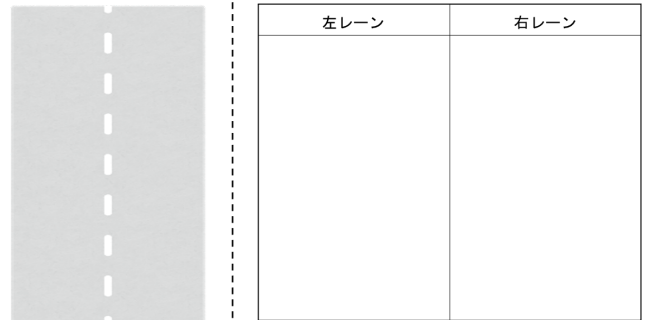


図 4 レーン  
Fig. 4 Lane

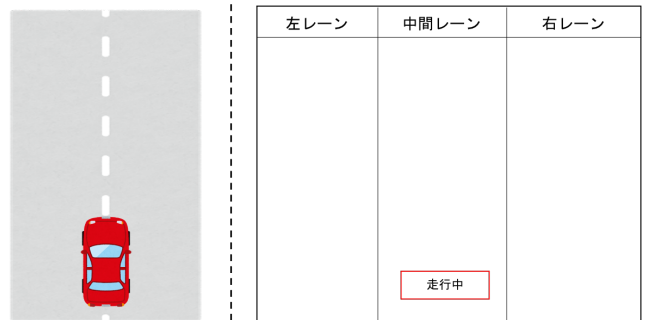


図 5 中間レーン  
Fig. 5 Pseudo lane

によって自動車の状態を表現する (図 3)。また、視認性を上げるため、枠色によって自動車の個体区別を行う。即ち、同色のノードはある時刻でその自動車を取りうる位置を表現する。

#### 3.3 レーン

道路位置関係図では、スイムレーンを一つの車線等の道路上の空間的区切りと見なす。その道路レーンを上から見下ろしたような図となっている。道路俯瞰イメージとそれに対応する道路位置関係図の例を図 4 に示す。

**中間レーン:** 道路位置関係図で自動車が車線境界を跨いでいる状況を表現したい場合、車線に隣接している 2 つのレーンのどちらかに記述すればよいか問題となる。道路位置関係図では、このような状況を記述する場合には、図 5 のように擬似的な中間レーンを設けることができる。

#### 3.4 動作的アクション

道路位置関係図では、ラベル付き実線矢印で自動車の移動を伴う動作的アクションを表現する (図 6)。その際、矢

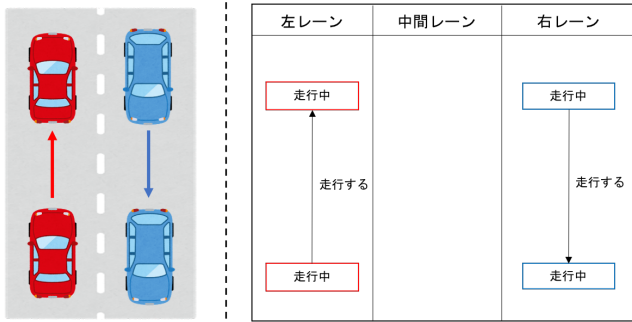


図 6 動作的アクション  
Fig. 6 Motional action

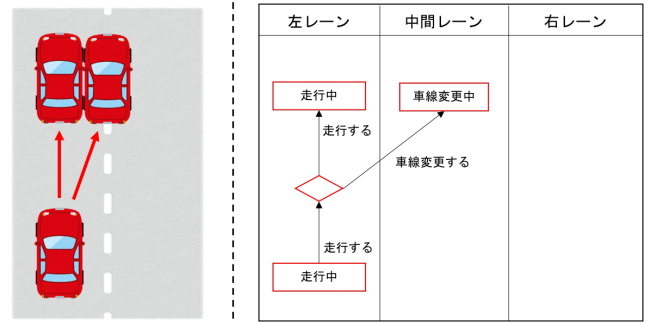


図 9 判断 (条件分岐)  
Fig. 9 Decision

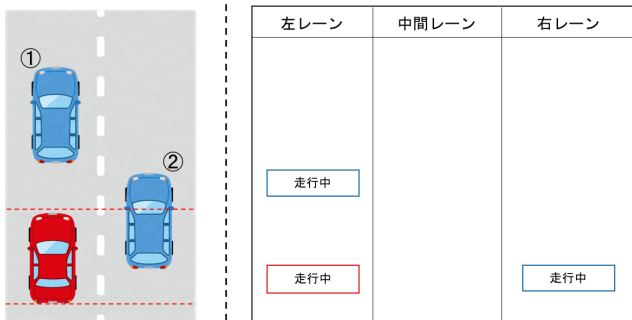


図 7 位置関係  
Fig. 7 Position relation

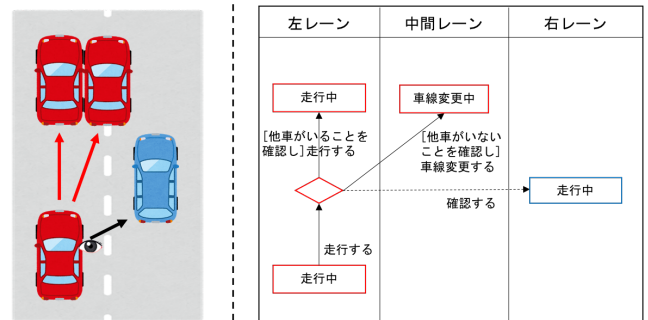


図 10 非動作的アクション  
Fig. 10 Cognitive action

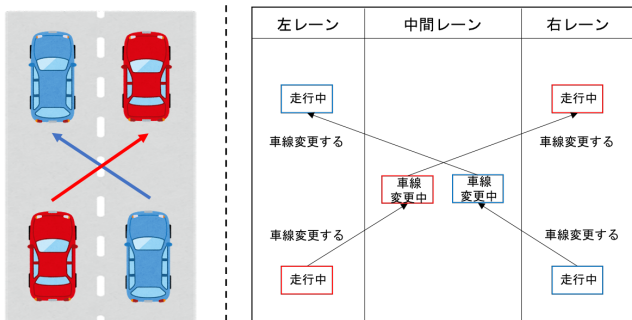


図 8 交差  
Fig. 8 Crossing

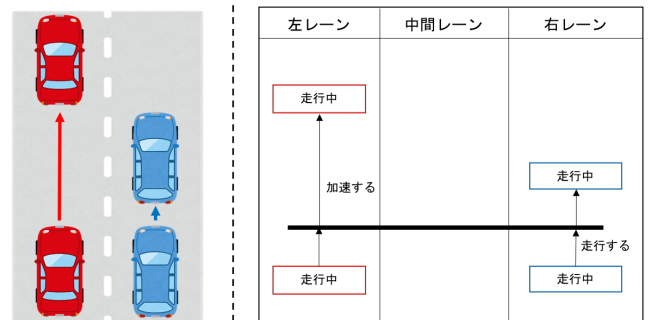


図 11 同期  
Fig. 11 Synchronization

印元が動作前の状態及び位置、矢印先が動作後の状態及び位置を表し、どちらも同色のノードである。

自動車が多数存在した場合、基本的に各自動車は独立して動作しているものとする。

### 3.5 位置関係

道路位置関係図では、自動車の物理的な位置関係を抽象的に扱い、対応するノードを図上に配置するものとする。例を図 7 に示す。自車(赤)に対して、同レーンの他車①は物理的には自車の前方にいるため、道路位置関係図では高緯に配置されている。一方、別レーンの他車②はそのまま横移動した場合には衝突する位置にいるため、道路位置関係図では同緯に配置されている。

**交差:** 2 台の自動車が図 8 左のように互いに交差するよ

うに車線変更を行った場合、(1) 自車(赤)が先に車線変更する、(2) 他車(青)が先に車線変更する、(3) 同時に車線変更する(両車が衝突する)の 3 つのケースが考えられる。道路位置関係図では、各自動車が独立して動作しているものとみなすため、図 8 右のように表現することで、前述の 3 ケースをすべて表現できる。なお、両車が同時に車線変更することで衝突してしまうことは、「中間レーン」上で「車線変更中」を同緯に配置することによって表現している。

### 3.6 判断

自動車が動作を行うとき、自動車はその場の状況に応じて、様々なアクションを起こすことがある。そのため、道路位置関係図では、ひし形を用いて、自動車が各状況に応

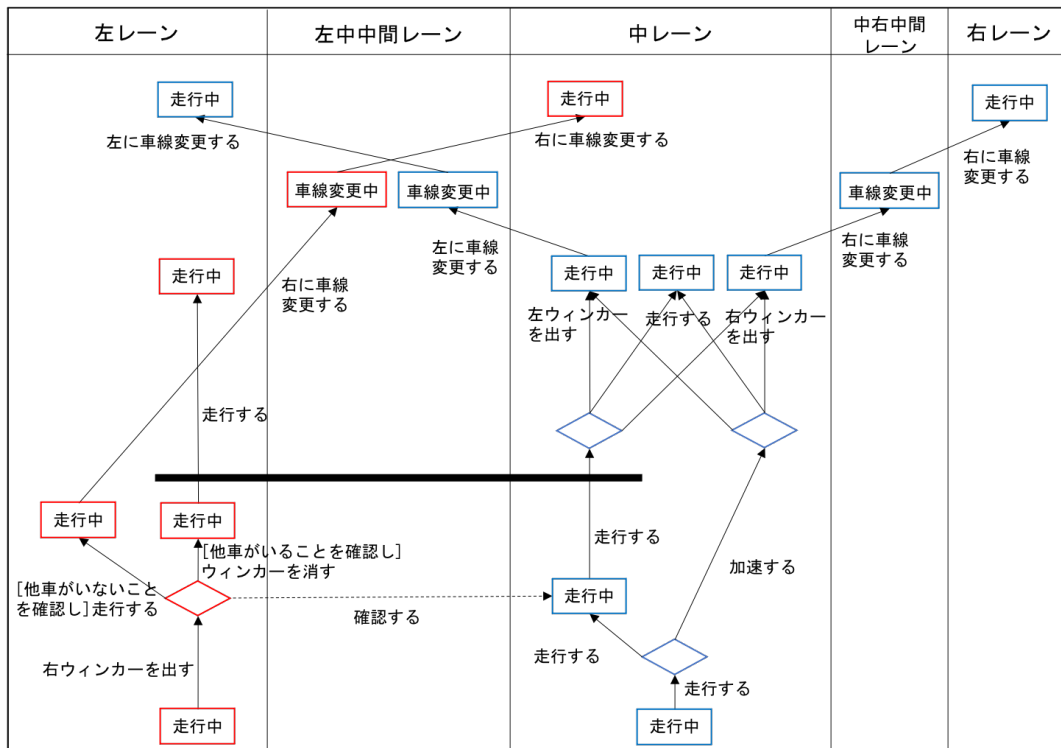


図 12 車線変更シナリオの道路位置関係図

Fig. 12 A RPRD for lane change scenario

じた判断により起こされ得る条件分岐を表現することができる (図 9)。

**非動作のアクション (シグナル)** : 判断により自動車は動作を変化させるとき、その判断は自動車は周囲の状況に左右され得る。そのため、道路位置関係図では、ラベル付き破線矢印を用いて、前方・側方・後方の他車を視認等する非動作のアクション (シグナル) を表現する (図 10)。その際、矢印元が認知する対象、矢印先が認知される対象を表す。

### 3.7 同期

自動車が複数存在する場合、各自動車は必ずしも独立して動作しているわけではなく、他車の動作に併せて同時的に動作を行うことがある。道路位置関係図では、バーを用いて複数のアクションの同期を表現する (図 11)。

### 3.8 例：車線変更シナリオ

例として、他車が 1 台存在し、その他車が加速や車線変更を行うことを想定した車線変更テストシナリオに相当する道路位置関係図を図 12 に示す。この図では並走する状況から、自車 (赤) が右ウィンカーを出した後に右側のレーン (中レーン) の状況を確認することを表現している (左下部分)。そして、他車 (青) が並走している場合には車線変更を中断して走行を続け、並走していない場合には右車線変更を行う (左中～左上部分)。他車は、直進、左車

線変更あるいは右車線変更を行う可能性があり、また、自車の中レーン状況確認の後に急加速する可能性もある (中レーン部分)。そのような場合、自車は他車がないものと誤認して右車線変更を行うため、左車線変更を行う他車と衝突する可能性がある (左中中間レーン上部分)。

文献 [1] の車線変更シナリオ (図 1) には他車 (POV.1) が 1 台のみ存在する場合のシナリオが 3 つ (PLC\_SP\_15, PLC\_SP\_25 と PLC\_SP\_35) 存在するが、この図ではそれらを含む状況を抽象的に表現したものとになっている。

## 4. テストケース生成手法

3.2 節で述べたように、同色のノードはある時刻でその自動車を取りうる位置を表現する。従って、各色から 1 状態ずつを選択することで 1 つの場面が定まる。

本節では、道路位置関係図からテストケース (場面の列) の集合を網羅的に抽出する方法を与える。なお、本稿では議論を単純化するため、道路位置関係図には動作アクション列の循環がないものと仮定する。

### 4.1 概略

道路位置関係図に各自動車の位置関係と振る舞いを同時に表現したものであり、様々な場面を一枚の図として表現している。そのため、まずは起こり得る場面とそれらの間の遷移関係を導出する必要がある。その後、場面群とその間の遷移関係からテストケース群を求める。



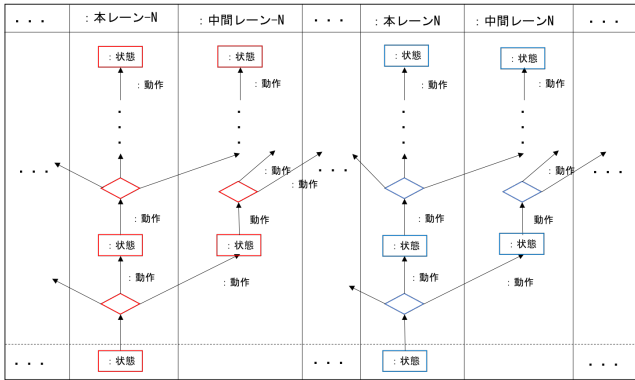


図 13 道路位置関係図の例  
Fig. 13 An example of RPRD

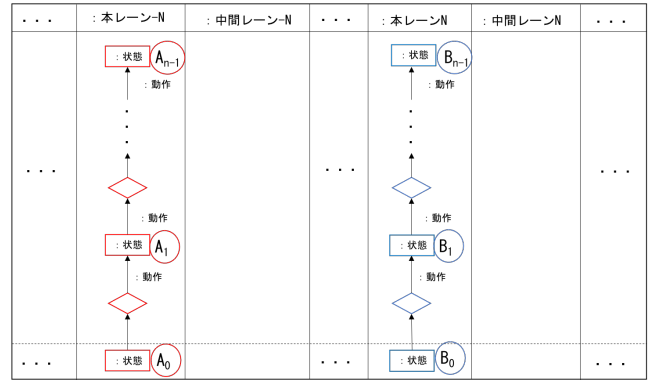


図 15 状態ノードへのラベル付け  
Fig. 15 Assigning labels to state nodes

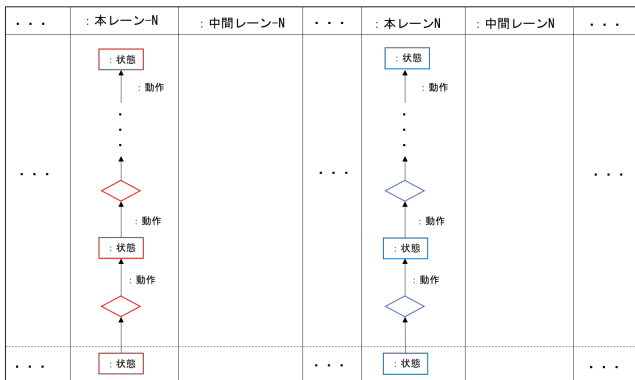


図 14 分岐パターンの例  
Fig. 14 An example of branch pattern

具体的には、以下のような手順により、道路位置関係図からテストケース群を作成する。

- (1) 道路位置関係図に分岐が存在する場合、分岐パターンを列挙する。
- (2) 各分岐パターンにおいて、以下を行う。
  - (a) 初期ノードの組みから到達可能、かつ、終端ノードの組みへ到達可能な状態ノード組み（場面）を列挙し、それらの間の遷移関係を得る。
  - (b) 場面の列を列挙する。
 以降の各節で各工程を説明する。

#### 4.2 分岐パターンの列挙

道路位置関係図に分岐が存在した場合（図 13）は、まず分岐パターンの列挙を行う。

各分岐ノードでどの動作アクションが選択されるかを定めることで、各色の初期ノードから終端ノードへの経路が一意に定まる（図 14）。このように定められた各色の経路の組みを分岐パターンと呼ぶこととする。なお、同期の存在により、実際には起こりえない分岐パターンも存在するため、そのような分岐パターンは無効とする。

ここで、 $n$  個の分岐ノードが存在し、それぞれの分岐数が  $N_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) である場合、分岐パターンは高々

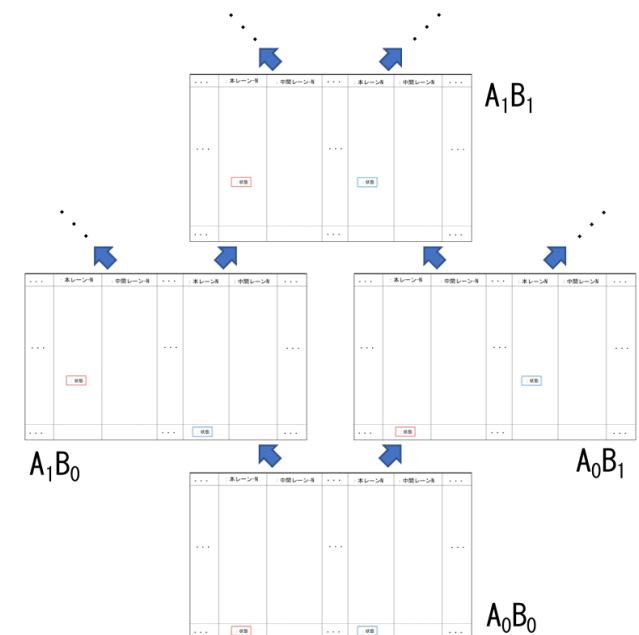


図 16 起こり得る場面及びその間の遷移関係  
Fig. 16 Possible scenes and transition relation among them

$\prod_{1 \leq i \leq n} N_i$  個である。

#### 4.3 場面及び遷移関係の導出

次に、各分岐パターンから、実際に起こり得る場面（状態ノードの組み）とその間の遷移関係を導出する。

これは、その分岐パターン上に現れる各状態ノードへラベル付け（図 15）を行った上で、各色の初期ノードの組み（初期場面）から到達可能、かつ、終端ノードの組み（最終場面）へ到達可能な状態ノード組みを網羅的に探索することで導出できる（図 16）。なお、分岐と同期の存在により、実際には起こりえない場面に相当するラベル組も存在する。

ここで、 $m$  色のノードが存在し、分岐パターン上に現れる各色の状態ノード数がそれぞれ  $M_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) である場合、場面数は高々  $\prod_{1 \leq j \leq m} M_j$  個、初期ノードから終端ノードへ

表 2 作成した道路位置関係図の概略  
Table 2 Summary of RPRDs for three scenarios

| シナリオ | 状態数 | 分岐数 | 同期数 | 分岐パターン数 | 総場面数 | 総場面列数 | 文献 [1] のシナリオ数 |
|------|-----|-----|-----|---------|------|-------|---------------|
| 追越   | 14  | 2   | 3   | 2       | 11   | 3     | -             |
| 合流   | 16  | 3   | 2   | 3       | 20   | 24    | -             |
| 車線変更 | 15  | 4   | 1   | 6       | 47   | 158   | 3 (1)         |

の経路（場面列）数は高々  $(\sum_{1 \leq j \leq m} M_j)! / \prod_{1 \leq j \leq m} (M_j!)$  個である。

#### 4.4 場面列の列挙

最後に、起こり得る場面及びその間の遷移関係を基に、初期場面から終端場面までの場面列を列挙する。

起こり得る場面及びその間の遷移関係は状態遷移系とみなせるため、モデルベーステストにおける経路網羅、状態網羅、遷移網羅の考え方 [6], [8] 及びテストケース生成手法をそのまま利用できる。すなわち、「すべての場面列からなるテストケース群」、「各場面が 1 回以上出現するテストケース群」、「各場面遷移が 1 回以上出現するテストケース群」は、モデルベーステストにおいてはそれぞれ経路網羅率 100%、状態網羅率 100%、遷移網羅率 100% のテストケース群に相当する。そのため、要求される品質に応じた網羅基準に準じたテストケース群を既存の手法を用いて生成すればよい。

### 5. 評価実験

道路位置関係図の表現力及びテストケース生成手法の有用性を確認するための評価実験を行った。

#### 5.1 実験内容

自動車動作に対する典型的なテストシナリオとして、「追越」、「合流」と、NHTSA でテストシナリオを作成している「車線変更（他車が 1 台のケース）」の 3 つに対する道路位置関係図を作成し、記述に必要なノード数（状態・分岐・同期）、テストケース生成の際の分岐パターン数・総場面数・総場面列数を計測した。

なお、各シナリオの ODD は、「直線道路」、「明確な白線」等の文献 [1] と同様の単純なものを用いた。また車線変更シナリオに関しては文献 [1] のテスト実行手順も参考に作成した。

#### 5.2 結果

作成した 3 つの道路位置関係図の各特徴量を表 2 に示す。なお、作成した車線変更シナリオの道路位置関係図は前述の図 12 である。また、文献 [1] の他車が 1 台の場合の 3 つの車線変更シナリオ（図 1）は車速が異なるだけであるため、道路位置関係図の抽象度では 1 つのシナリオと見なせる。

車線変更シナリオを記述した道路位置関係図の概要は 3.8 節に示したとおりであるが、他 2 シナリオの概要は以下の通りである。

- 追越シナリオ：自車は追い越し始める前に他車の車線変更を検知した場合、追い越しを中断する。検知しなかった場合は、追い越し始める時に同期をとって隣レーンに車線変更し、加速する。追い越し後、同期をとって元のレーンに戻る（他車の前方に入る）。
- 合流シナリオ：自車は合流し始める前に他車の存在を検知した場合、同期をとって減速した後、車線変更を行い合流する（他車の後方に入る）。検知しなかった場合、同期をとらずに車線変更する。このとき、検知のための非動作的アクション後に他車が急加速してくることもある。

**ノード数**：今回の実験ではどのシナリオに対しても 20 ノード程度の規模で道路位置関係図を作成できた。なお、3.8 節でも述べたように、文献 [1] のシナリオでは言及されていない他車の振る舞い（加速/車線変更）を含めてこの規模の図 1 枚で表現することが可能であった。具体的には、追越シナリオでは他車の車線変更、合流シナリオでは他車の加速、車線変更シナリオでは他車の加速及び車線変更を記述したものとなっている。

**分岐パターン数**：他車の振る舞いが多く記述されており分岐数が多い車線変更シナリオは他 2 シナリオより多くの分岐パターンを持つ結果となった。

**総場面数**：総場面数についても、他車の振る舞いが多く記述されている車線変更シナリオは他 2 シナリオより多く持つ結果となった。追越シナリオに関しては、同期による場面制限が他シナリオより厳しく、分岐パターン数に対する総場面数の比が相対的に低いものとなった。

**総場面列数**：他車の振る舞いが多く記述されており分岐パターン数と総場面数が多い車線変更シナリオは他 2 シナリオよりかなり多く持つ結果となった。同期による場面制限が厳しい追越シナリオに関しては、総場面列数の方が総場面数よりもかなり小さい結果となった。

#### 5.3 評価

本実験により、自車及び他車の位置関係とその変化を道路位置関係図として表現でき、また、様々な場面及び場面列を導出できることが確認できた。

文献 [1] ではどのように図 1 の導出手順・方法が与えら

れておらず、テストシナリオ及びテストケース群の網羅性を保証する術がなかった。しかし、本稿で提案する道路位置関係図をテスト設計時に作成することで、自車及び他車がどのような位置関係を取り得るか、そしてそれがどのように変化し得るかを明確化することが可能となる。それにより、モデルベーステストにおける網羅性の考え方を自動運転システムのテストシナリオ及びテストケース群の網羅性と対応させることも可能となった。また、テストシナリオ及びテストケース群の不備・不足は道路位置関係図の不備・不足として追跡検証できることも利点の1つに挙げられる。実際、本実験で作成した道路位置関係図は、場面及び場面列の妥当性を確認しながら洗練し完成させたものである。

## 6. 考察

**衝突可能性の記述：**道路位置関係図では、同レーンかつ同緯に異なる車両がある場面が起こり得る場合、衝突可能性があることになる。目視確認等の非動作的アクションに基づいた分岐や、同期による位置・タイミング調整により衝突回避動作を記述できるが、急加速等による他車の認識外動作に起因する衝突等も記述できる。本評価実験で作成した図では、車線変更シナリオ(3.8節)と合流シナリオにおいて衝突可能性を表現できた。

**変更容易性：**道路位置関係図は、俯瞰的に道路状況を記述したものであるため、各自動車がどのような動作を行うかが、直観的に理解しやすいものとなっている。そのため、作成した道路位置関係図に不具合があった場合、変更によってどのように可能な場面及び場面列が変化するかを確認しながら作成することも可能となっている。

**拡張の必要性：**本評価実験では単純なODD(「直線道路」等)を想定したため、作成した道路位置関係図は直観的に理解・記述し易かった。しかしながら、実際の道路の中には、丁字路や三叉路、更には三叉路以上に入り組んだ交差点も存在している。そのような複雑な形状の道路を取り扱う場合、道路レーンの記法の拡張が必要である。

**分割記述と一貫性：**本評価実験で作成した図はいずれも20ノード程度と小規模であり、各シナリオで考慮すべき要素のすべてが表現されているわけではない。1つの主シナリオ及びその派生シナリオをすべての1つの道路位置関係図で表現した場合、図が大規模になり可読性が低下する恐れがある。そのような場合、シナリオを複数の図として分割記述することも可能である。ただし、別の図として分けて記述することにより、図単体としては矛盾がなくても、複数図の間で記述が一貫せず矛盾が生じ得る。そのため、複数図の間の一貫性を検査する手法も必要であろう。

**既存手法の補完：**文献[1]では具体的なテスト記述(図1等)を例示しているものの、それを導出する手法については具体的には与えていない。そのため、シナリオの網羅性

を保証することができなかった。本稿で提案した手法で生成するテストケースは、文献[1]のテスト記述よりも抽象度が高いものであるが、車両の位置関係及びその変化を記述する道路位置関係図を経ることで、網羅性を保証することができる。実際にテストを実行するためには、図1のように各車両の速度等に具体的な値を割り当てる必要がある。そのような手法を与えることで、既存手法を補完し、網羅的なテストを実施することが可能となる。

## 7. まとめ

本稿では、テストシナリオ内の車両の位置関係とその変化を記述することが可能な道路位置関係図、並びに図が含意する場面及びその列を網羅的に導出するテストケース生成手法を提案した。

評価実験として、典型的なテストシナリオである追越、合流、車線変更の道路位置関係図を作成し、自車・他車の加速や車線変更などの動作や視認による分岐等を記述できることを確認した。なお、作成した道路位置関係図は、含意される場面及び場面列の妥当性を確認しながら洗練することで完成させることができた。作成した道路位置関係図は小規模なものであったが、衝突可能な場面を含む様々な場面及び場面列を導出できることも確認できた。この場面列は、文献[1]のテスト記述よりも抽象度が高くそのままテスト実行できるものではないが、網羅性を保証することができる。そのため、実行可能なテスト記述作成の網羅性保証のために利用することができる。

今後の課題として、(1)より複雑なODDに対応するための道路位置関係図の拡張、(2)分割記述支援技術の開発、(3)テスト実行可能とするための速度等のパラメータ割り当て手法の開発などがある。

## 参考文献

- [1] E. Thorn, S. Kimmel, and M. Chaka: *A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios*, National Highway Traffic Safety Administration, Report No. DOT HS 812 623, 2018.
- [2] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez and V. Koltun: *CARLA: An Open Urban Driving Simulator*, Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning, pp. 1-16, 2017. <https://carla.org>
- [3] MathWorks: *Automated Driving Toolbox*. <https://www.mathworks.com/products/automated-driving.html>
- [4] PEGASUS Project. <https://www.pegasusprojekt.de/en/>
- [5] National Highway Traffic Safety Administration: <https://www.nhtsa.gov/>
- [6] P. Ammann and J. Offutt: *Introduction to Software Testing* (2nd ed.), Cambridge University Press, 2016.
- [7] Object Management Group: *Unified Modeling Language*. <https://www.uml.org>
- [8] A. Simão, A. Petrenko, J.C. Maldonado: *Comparing Finite State Machine Test Coverage Criteria*, IET Software, Vol. 3, Issue 2, pp. 91-105, 2009.