

自動運転用仮想環境シミュレータを用いた アダプティブ・クルーズ・コントロール機能の評価

今井和貴¹ 星川孝治¹ 橋本由佳¹ 安村美紀¹
呉屋国明¹ 太田徳高¹ 松原豊²

概要：自動運転を実現するためには、膨大な距離の走行評価が必要とされている。しかし、走行評価を全て現実世界で行うのは非現実的である。そのため、自動運転車両の評価にはシミュレータが必要不可欠と言える。しかし、シミュレータは現実と全く同じではないため、有効範囲を明確にしなければシミュレータでの検証結果を信頼することが出来ない。本研究は、自動運転用仮想環境シミュレータを用いて、アダプティブ・クルーズ・コントロール (ACC) 機能の評価を実施する。シミュレータで評価されたソフトウェアを実機に搭載し動作させる。シミュレータでの評価結果と実機環境での評価結果を比較することで、シミュレータによる評価結果の有効性を検証する。

1. はじめに

自動運転の実現が望まれて久しいが、実現するには様々な障壁が存在する。その中の一つに、膨大な距離の走行評価が必要ということが挙げられる。自動運転車の信頼性を確実にするためには、約 60 億マイルのテスト走行が必要だという説もある[1]。しかし、それらを全て現実世界で行うのは膨大な時間と費用が掛かるため、自動運転車の普及に大きな足枷となってしまう。そのため、低コスト・省時間で自動運転車両を評価する方法としてシミュレータが注目されている。

シミュレータは現実と全く同じというわけでは無いため、ドライブシミュレータを用いた評価結果の信頼性は不明瞭である。ドライブシミュレータを用いた評価結果をシステムの安全性論証で活用するためには、評価結果の有効性を示す必要がある。

先行研究では、車両の評価におけるシミュレータのニーズが確認されており[2]、実際に自動運転アルゴリズム検証用の仮想環境[3]や、リアルタイムな都市交通情報管理に向けたダイナミックマップのシミュレーション評価環境[4]、自動運転のための運転行動意思決定システム開発に向けた統合シミュレータ[5]等、様々な仮想環境・シミュレータの構築が行われている。しかしながら、シミュレータを用いた評価結果の有効性については、明らかになっていないという課題がある。

本研究は、自動運転用仮想環境シミュレータを用いて ACC 機能の評価を実施する。シミュレータで評価したソフトウェアを実機に搭載し ACC 機能の評価を実施する。シミュレータでの評価結果と実機環境での評価結果を比較することで、シミュレータによる評価結果の有効性を検証・考察する。

2. 評価対象システム (ACC 機能)

2.1 概要

評価対象とするソフトウェアは、ACC 機能のソフトウェアである。本システムは、YAMAHA 製の電動ゴルフカート (G30ELs) に LiDAR (VLP-16) とステレオカメラ (Robovision2) を搭載した実験車両で動作させることを想定したシステムである。

本研究の目的は評価を行うことであるため、システムは簡易実装とする。本システムは自車両の目標速度とブレーキ指示のみを決定し、ステアリング制御等は行わない。使用条件は日中の晴天かつ直線単一車線のみを想定とし、他車線や対向車線、歩道等は想定しない。

2.2 システム構成

本システムの構成は、図 1 の通りである。なお、図 1 に示す「物体検出アプリケーション」及び「ACC アプリケーション」の 2 つをまとめて評価対象アプリケーションとする。

本システムは、ステレオカメラから取得する視差画像と、LiDAR から取得する点群データを用いて前方障害物の種類と距離を算出し、その結果と自車両の現在速度を基に、目標速度とブレーキ指示を決定する。

物体検出アプリケーションでは、ステレオカメラから取得した視差画像を基に物体検出と物体までの距離算出を行う。検出した物体の種類と算出物体までの距離を、物体検出結果として ACC アプリケーションに送信する。ACC アプリケーションでは、物体検出アプリケーションの物体検出結果と LiDAR から取得する点群データを基に障害物や追従対象の有無を判定し、自車両の目標車速とブレーキ指示の決定を行う。決定した目標車速とブレーキ指示を、車両制御値として CAN 通信でゴルフカートに送信する。

また、本システムの機能は大きく認識系、判断系、制御系の 3 つの機能に分解することが出来る。それぞれの概要を以下に示す。

¹ 株式会社ウィッツ
Witz Corporation
² 名古屋大学大学院 情報学研究科
Graduate School of Informatics, Nagoya University

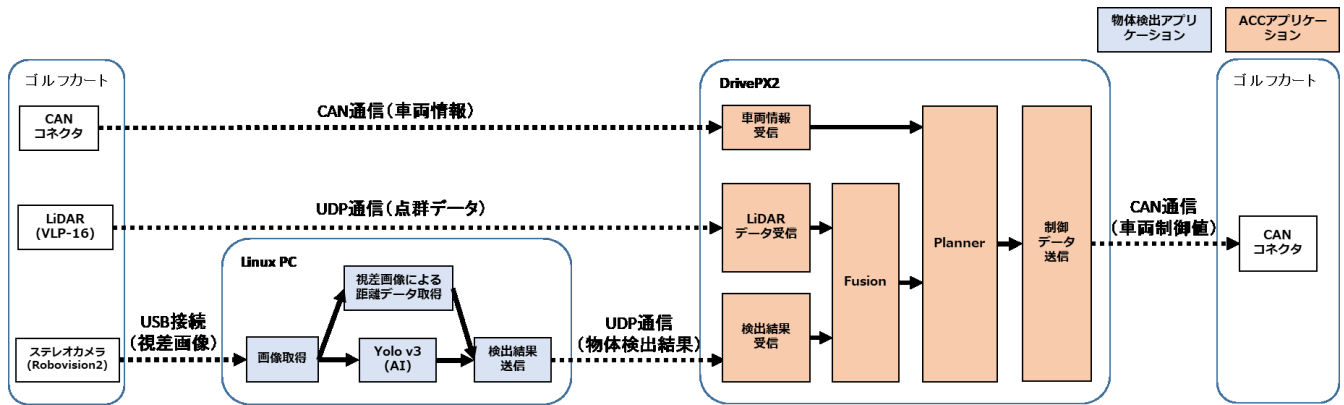


図 1 評価対象システム構成図

表 1 車速決定ルール

追従対象	車間距離	目標車速
無	-	19km/h
有	車間距離 ≤ 制動距離	0km/h
有	制動距離 < 車間距離 ≤ 制動距離 * 1.2	自車速 - 1km/h (最低 0km/h)
有	制動距離 * 1.2 < 車間距離 ≤ 制動距離 * 1.5	同自車速 (最低 4km/h)
有	制動距離 * 1.5 < 車間距離	自車速 + 1km/h (最低 4km/h, 最大 19km/h)
有→無	任意	3 秒間維持

認識系

各種センサ及びセンサからの入力処理, 画像認識処理, 距離算出処理を認識系とする. 図 1 に示す物体検出アプリケーション全体と, ACC アプリケーションの各受信部が該当する.

判断系

各種認識結果を基に, 制御指示を決定する処理を判断系とする. 図 1 に示す Fusion と Planner が該当する.

制御系

判断系が決定した制御指示を基に実際に制御を行う箇所を制御系とする. 図 1 に示すゴルフカートが該当する.

2.3 車速決定アルゴリズム

ACC アプリケーションは, 前方車両との車間距離に応じて目標車速を決定する. 前方車両との車間距離と目標車速の関係を表 1 に示す. 目標速度の決定に使用する制動距離は, 使用するゴルフカートの最高速度である時速 19km/h で走行した場合を想定して算出した. 安全機能として, LiDAR で取得した点群データによって, ステレオカメラの死角に障害物を検出した場合は, 車速決定ルールに従わずに停車する.



図 2 ゴルフカートモデル

3. 自動運転用仮想環境シミュレータ

3.1 概要

自動運転用仮想環境シミュレータとして, 自動運転仮想検証システム ViViD (Virtualized Verification into automatic Driving) を用いる[6]. ViViD はプロプライエタリソフトウェアであり, 実際のシステムで使用する車両やセンサの仕様を基にシミュレーション用のモデルが構築されているので, 実機環境と同様に, ステレオカメラの視差画像, LiDAR の点群データ, 自車両の車速情報を取得することが可能である. また, 他車両や障害物を任意の場所に設置できる機能を備えており, この機能を用いて評価実験を行う.

3.2 構成

ViViD には, 実機で実際に使用するゴルフカート, ステレオカメラ, LiDAR を模したモデルを搭載されている. それぞれの概要を以下に示す.

ゴルフカートモデル

YAMAHA 製の電動ゴルフカート (G30EJs Li) を模しており, UDP 通信で受信した目標車速およびブレーキ指示を基に, 決められたコースを走行する. 実際のモデルについては図 2 に示す.



図 3 実際の高速道路写真[7] (左) と ViViD の環境モデル (右) 比較



図 5 シャーシダイナモ施設

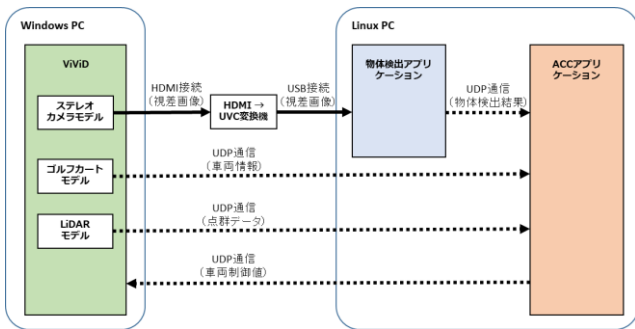


図 4 シミュレーション環境

ステレオカメラモデル

Robovision2 を模しており、車両前方に設置された左右のカメラ映像を出力する。図 2 に示す、車両前方上部の緑色のオブジェクトが該当する。

LiDAR モデル

VLP-16 を模しており、水平方向 0° ~360°、垂直方向-15° ~+15° の点群データを UDP 通信で送信する。データフォーマットは実機と同じ。図 2 に示す、車両前方下部の緑色のオブジェクトが該当する。

環境モデル

図 3 に示すように、実在する高速道路である首都高速の辰巳ジャンクション付近を模している。

シミュレーション機能

UDP 通信で目標車速とブレーキ指示を送信することにより、シミュレータ内のゴルフカートを加減速させることが可能。この機能により、実車両の挙動をシミュレーションすることが出来る。また、UDP 通信で操舵角指示を送信してステアリング制御を行うことも可能であるが、今回の評価対象システムの制御対象は目標車速とブレーキ指示のみであるため、今回の実験では使用しない。

3.3 評価実験用シミュレータ環境

本実験の実験環境を図 4 に示す。本実験では、物体検出アプリケーションと ACCアプリケーションを同一の PC 上で動作させる。ViViD を動作させる PC とはクロスケーブルで接続し、UDP 通信で車両情報、LiDAR 点群データ、目標車速、ブレーキ指示を送受信する。ステレオカメラ映像

は、HDMI→UVC 変換機 (FEBON 168) を用いて送受信する。

4. 評価実験

4.1 実験目的と手順

本実験の目的は、シミュレータを用いた評価結果の有効性検証である。シミュレータ環境で評価の実施と、実機環境で評価後のシステムの動作確認を実施し、それらの結果を比較する。本実験は、以下の手順で実施する。

1. シミュレータ環境を用いて正常系、故障系、誤用系の評価実験を行う。
2. 実機環境を用いて正常系の動作確認を行う。故障系、誤用系の動作確認については、実施が困難であるため今回の実験では行わない。
3. 評価結果を認識系、判断系、制御系の 3 つの機能に分解して比較を行う。
4. システムレベルで評価結果の比較を行う。

4.2 実験環境

本実験は、シミュレータと実機の 2 つの環境で実施する。シミュレータ環境については、3.3 評価実験用シミュレータ環境で示す環境を使用する。実機環境としては、以下の 3 つの環境が存在する。

1. シャーシダイナモ施設
2. 実運用環境に近い屋外
3. 実運用環境

今回の実験では、実機環境として上記 1. を使用する。屋外で実験を行わなかった理由としては、実験場所の確保が困難であったためである。また、シャーシダイナモ施設では車両がダイナモローラ上を走行するため、想定外の動作を行った場合でも安全に実験することが出来るためである。シャーシダイナモ施設は、車両前方の空間が実際の路上と比較して狭いため、評価対象ソフトウェアの距離の閾値を実際よりも小さく設定して評価を行う。上記 2. 及び 3. との比較や評価の実施については、今後の課題とする。今回の実験で使用するシャーシダイナモ施設を図 5 に示す。ダイナモローラ上に、駆動輪であるゴルフカートの後

表 2 主な評価実験項目

正常系	<ul style="list-style-type: none"> 前方に何も無い場合 前方に車両/人/障害物がある場合 走行中に車両/人/障害物が出現した場合 走行中に車両/人/障害物が無くなった場合
故障系	<ul style="list-style-type: none"> LiDAR の出力値異常の場合 車速情報の出力値異常の場合
誤用系	<ul style="list-style-type: none"> カメラ画像が欠けた場合 物体を検出出来ない場合 物体を誤検出した場合

表 3 評価実験方法

正常系	<ul style="list-style-type: none"> 前方に何も無い状況で走行 前方に車両/人/障害物がある状況で走行 走行中に、特定の距離に車両/人/障害物を出現させる 前方に車両/人/障害物がある状況で走行中に、車両/人/障害物を消す
故障系	<ul style="list-style-type: none"> LiDAR の出力データを実際とは異なる値に変更する 車速情報を実際とは異なる値に変更する
誤用系	<ul style="list-style-type: none"> ステレオカメラ画像の一部を欠けさせる 前方の物体を検出させない 存在しない物体を誤検出させる 検出種別を実際とは異なる種別に変更する

輪を乗せ、車両が前進しないように、車両後方と施設とをラッシングベルトで固定して使用する。

4.3 実験項目

評価実験項目は、次の2つの方法で作成した。1つ目は、物体検出アプリケーションと ACC アプリケーションの仕様書に記載された仕様を基に正常系評価項目を作成した。2つ目は、ACC システムの安全コンセプト文書を作成する際に行った安全分析の結果を基に異常系（故障、誤用）評価項目を作成した。故障系評価項目の考え方については ISO 26262 [2]を、誤用系評価項目の考え方については ISO/PAS 21448 [3]を参考にした。表 2 に示す条件での振る舞い確認を評価実験項目とした。このうち、故障系及び誤用系の項目については、テストコードを用いずに実機環境で評価を行うのは困難な項目である。

4.4 実験方法

ここでは、4.3 実験項目で示した実験項目の実験方法を示す。それぞれの評価項目の実験方法の概要を表 3 に示す。故障系の項目及び誤用系の1つ目の項目については、図 4 に示すシミュレータのステレオカメラモデル、ゴルフカートモデル、LiDAR モデルのデータ出力部分を評価用の仕様に変更し、出力データを加工することで再現する。誤用系

表 4 評価実験結果

	シミュレーション環境	実機環境
正常系	23/ 23 件成功	12/17 件成功, 6 件が実施不可
故障系	92/132 件成功, 232 件が実施不可	未実施
誤用系	26/ 28 件成功	未実施

の2つ目以降の項目については、図 1 に示す検出結果送信で、物体検出結果を評価用の検出結果に上書きする評価用コードを有効にすることで再現する。

4.5 シミュレータによる評価結果

それぞれの項目の実験結果の概要を表 4 のシミュレーション環境の項目に示す。

正常系の評価実験は、全ての項目を実施し、期待通りの振る舞いを行うことを確認した。

故障系の評価実験は、1 種類の項目を除き、全て実施することが出来た。実施することが出来なかった項目は、車速情報の出力値異常の場合の評価のうち、自車両が特定の車速に達した時に特定の位置に物体を出現させることで実施する項目である。その原因は、ViViD のステレオカメラ映像を ACC アプリケーションで取得するために用いた HDMI→UVC 変換機を介することによって、約 0.2 秒のラグが生じたためである。このことにより、ACC アプリケーションが取得する画像データと車速情報のタイムスタンプが一致せず、データに不整合が生じるため、該当の項目を実施することが出来なかった。故障系の評価で、40 件の不具合を検出した。これは全て同じ理由によるもので、視差画像による距離検出の精度が悪く、検出物までの距離を正確に取得できないため、期待動作を行わなかった。この不具合は幅広い距離で発生したが、特に 7m 以内の距離では近づくほどより顕著に見られた。

誤用系の評価実験は、全ての項目を実施し、2 件の不具合を検出した。これはどちらも故障系の評価実験で検出した不具合と同じ理由によるものであった。

4.6 シャーシダイナモによる評価結果

シャーシダイナモによる評価結果の概要を表 4 の実機環境の項目に示す。

シャーシダイナモによる評価では、正常系の確認を行った。正常系の確認では、検出する物体の種類と距離に応じて、ViViD で評価した際と同等の振る舞いを行うことを確認することが出来たが、車両のパネルのみ、3m 以上の距離で上手く認識することが出来なかった。そのため、6 件の項目を実施することが出来なかった。車両パネルを屋外に設置したところ、意図通り車両として認識することが出来たため、認識不良はシャーシダイナモ施設の照明による

表 5 機能毎の比較結果概要

機能	結果
認識系	どちらも同じ不具合を検出した
判断系	正常系において、どちらも想定通りの判断を行った
制御系	ViViD 内の車両には含まれていない仕様が実車両にあったため、一部の振る舞いが異なった

ものと推測される。失敗した 5 件については、全て視差画像による距離算出の精度が悪いことによるものであった。

故障系、誤用系の実機確認の実施も検討を行ったが、再現するのが困難であったため、正常系のみの実施とした。故障系の項目については、LiDAR やゴルフカートといった外部機器から受信するデータの異常を再現する必要があるが、実際に外部機器に異常を発生させるのは困難であるため、データを受信する部分のソースコードを変更することでしか対応できないという結論に至った。誤用系の項目については、シミュレータでの評価と同じ評価用コードを有効にすることで実施することは可能であるが、評価用コードを有効にした場合の評価結果がシミュレータと実機で同じ結果になることが明白であるため、実施しないという結論に至った。

実機での動作確認を行う中で、シミュレータ作成時には明らかでなかった、ゴルフカートの未知の仕様を発見した。これは、走行中に一度でもブレーキ指示を送信すると、車両が停止するまで再加速出来ないという仕様である。この仕様はゴルフカートの製品マニュアルに記載されておらず、発現時はソフトウェアの不具合を疑った。しかし、CAN 通信のログには再加速指示を送信している旨の履歴が残っていたため、未知の仕様であると断定した。

4.7 比較・考察

ViViD を用いた評価実験結果と実機を用いた動作確認結果を比較する上で、まず機能毎に分解して比較を行う。分解した機能毎の比較結果を表 5 に示す。

認識系においては、ViViD 環境と実機環境の両方で距離算出の精度に関する不具合を検出した。判断系においては、ViViD 環境と実機環境の両方で、入力に対して想定通りの判断を行うことを確認することが出来た。制御系においては、ViViD 環境内の車両モデルに含まれない実機のゴルフカートの仕様が存在したため、ブレーキ指示を出した後の振る舞いが異なる結果となった。これらの結果から、認識系と判断系の評価については、シミュレータでの評価結果は有効であると判断できる。制御系の評価については、シミュレータ内の車両と実車両の制御仕様が完全に一致していなければ、評価結果を必ずしも信用出来ないと言える。すなわち、実車両と同じ制御仕様がシミュレータ内の車両で再現出来ている事を証明することが出来れば、制御系の評価結果についても信用出来るのではないかと推測できる。

システムレベルで結果の比較を行うと、制御仕様の違いによる振る舞いの差異を除いては、正常系では同等の振る舞いを行ったことや、同一の不具合を検出することが出来たことから、実車両と同じ制御仕様でシミュレータ内に実装されている機能の範囲に限り、正常系の評価において自動運転用仮想環境シミュレータを用いた評価結果は有効であると判断できる。

また、故障や誤用といった異常系の評価をするにあたり、シミュレータでは容易に再現することが出来た項目を実機で再現することは困難であった。このことから、故障や誤用の評価についてはシミュレータが適していると推測できるが、実機の評価結果と比較することが出来ていないため、評価結果の有効性については未知数である。

5. まとめ

本研究では、自動運転用仮想環境シミュレータを用いた評価結果の実機環境への適用の有効性を検証するために、自動運転用仮想環境シミュレータを用いて ACC 機能の評価を行った。評価後のソフトウェアを実機に搭載し、シャーシダイナモを用いて評価した。シミュレータでの評価結果と実機での評価結果を比較することで、両環境のセンサ仕様及び車両制御仕様が同一である限りは、評価結果は有効であることが分かった。また、実機では再現が困難な評価もシミュレータでは実施することが出来た。

今後の課題として、まずシミュレータ実験環境をより実際に近い条件に改良しての再評価が挙げられる。本実験では、シミュレータ構築時にゴルフカートの未知の仕様が存在しており、完全に車両を再現することが出来なかった。また、HDMI→UVC 変換機についても実機より遅延が大きいものであったため、より遅延の少ない機材に変更して評価すべきと考える。実際の車両・機材となるべく条件を同じにすることで、より評価結果の有効性が保証出来ると推測する。また、今回の実験では検証出来なかった故障や誤用について実機で評価をし、シミュレータを用いた評価結果との比較を行うことで、シミュレータを用いた故障や誤用の評価結果の有効性も検証する必要がある。

謝辞 本研究は、平成 29 年度戦略的基盤技術高化支援事業「自律的自動運転の実現を支える人工知能搭載システムの安全性立証技術の研究開発」の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Elon Musk, "Master Plan, Part Deux | Tesla.", <https://www.tesla.com/blog/master-plan-part-deux?redirect=no>.
- [2] 大島大輔 他: ドライビングシミュレータに対するニーズ及び

- 先進的関連技術に関する調査研究, 生産研究, 2015 年 67 巻, 2 号, pp. 87-92
- [3] 上谷一将 他:自動運転ソフトウェア開発のための仮想環境の検討, 情報処理学会 第 81 回全国大会講演論文集, AN00349328, pp. 335-336
 - [4] 山本拓実 他:リアルタイムな都市交通情報管理に向けたダイナミックマップのシミュレーション評価環境の構築, 情報処理学会 第 80 回全国大会講演論文集, AN00349328, pp. 37-38
 - [5] 三好竜平 他:自動運転のための運転行動意思決定システム開発に向けた統合シミュレータの構築, 第 34 回ファジィシステムシンポジウム, TH1-3
 - [6] 株式会社ジェーエフピー, 仮想化検証システム「ViViD」, https://www.jfp.co.jp/pdf/JFP_ViViD.pdf
 - [7] Wikipedia, 辰巳ジャンクション, https://ja.wikipedia.org/wiki/辰巳ジャンクション#/media/ファイル:Tatumi_JCT_1.jpg
 - [8] ISO 26262:2018 Road vehicles — Functional safety.
 - [9] ISO/PAS 21448:2019 Road vehicles — Safety of the intended functionality.