

自動運転評価プラットフォーム (DIVP)

Driving Intelligence Validation Platform (DIVP)

渡 邊 龍 雄

要 約 自動運転の開発と検証を効率的に行うために、物理現象を忠実に再現したシミュレーション技術が注目されている。BIPROGY は内閣府が進める SIP 第2期に参画し、自動運転評価プラットフォーム (DIVP) の研究開発に取り組んでいる。BIPROGY が担当するのは、カメラ、LiDAR、ミリ波レーダーの三つのセンサモデル向けに、レイトレーシング法で空間描画処理を行う電磁波伝搬シミュレーションである。それぞれのシミュレーションでは一定の成果が出ている。今後は様々な自然現象を再現してシミュレーションの有効性を高めていく。

Abstract In order to conduct the development and verification of autonomous driving efficiently, simulation technology that reproduces physical phenomena with high accuracy is attracting attention. BIPROGY has participated in the second phase of SIP promoted by the Cabinet Office and has been researching and developing the driving intelligence validation platform (DIVP). BIPROGY is in charge of electromagnetic wave propagation simulation that performs space drawing processing using the ray tracing method for three sensor models: camera, LiDAR, and millimeter-wave radar. Each simulation yields a certain result. In the future, we will reproduce various natural phenomena to enhance the effectiveness of the simulation.

1. は じ め に

自動運転の実現によって、ユーザーの利便性が向上するだけでなく、交通事故の低減、交通渋滞の削減、交通制約者のモビリティの確保、物流・移動サービスのドライバー不足の改善・コスト低減などの様々な社会課題が解決され、すべての人が持続可能で質の高い生活を送ることができる社会の実現につながる事が期待されている。

一方で、完全自動運転（自動運転レベル5）の実現という過度の期待から目覚め、より現実的な取り組みに移りつつあるとはいえ、様々な環境条件下での安全性や信頼性のある自動運転システムの開発と検証を行っていくためには、まだまだ課題が多い。特に問題となるのが、開発した自動運転システムの検証が実車での走行によるものが主体となっており、実際に問題が発生する条件を意図的に設定することが困難であることや、テストに膨大な時間を要してしまうことである。これを解決する手法として、MBD（モデルベース開発）が注目されているが、実空間で起こる物理現象を忠実に再現したシミュレーションモデルの開発が進んでおらず、機能レベルの検証にとどまっている。

BIPROGY 株式会社（以降、BIPROGY）では、内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」第2期に参画し、2018年より物理現象の再現にフォーカスした自動運転評価プラットフォーム（Driving Intelligence Validation Platform：DIVP）の研究開発に取り組んできた。本稿でその概要を紹介する。まず2章でDIVPの概要を述べ、BIPROGYが担

当する部分から、3章でプラットフォームのアーキテクチャ、4章で空間描画処理および5章で実験結果に基づく一致性の高いシミュレーションモデルの開発について説明した後、6章でカメラ、LiDAR、ミリ波レーダーのシミュレーション結果を示す。

2. DIVP (Driving Intelligence Validation Platform)

本章では、自動運転評価プラットフォーム (DIVP) の概要について述べる。

2.1 SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)

SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) は、内閣府ホームページ^[1]で次のように説明されている。

SIP は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議が司令塔機能を発揮して、府省の枠や旧来の分野を超えたマネジメントにより、科学技術イノベーション実現のために創設した国家プロジェクトである。国民にとって真に重要な社会的課題や、日本経済再生に寄与できるような世界を先導する 10 の課題に取り組む。各課題を強力にリードする 10 名のプログラムディレクター (PD) を中心に産学官連携を図り、基礎研究から実用化・事業化、すなわち出口までを見据えて一貫通貫で研究開発を推進。経済成長の原動力であり、社会を飛躍的に変える科学技術イノベーションを強力に推し進めていく。

SIP の 10 のテーマの一つに「自動運転 (システムとサービスの拡張)」がある。図 1 が SIP の実施体制である。プログラムディレクターはトヨタ自動車株式会社 先進技術開発カンパニー フェローの葛巻清吾氏が担当しており、自動運転の一般公道での実証実験や移動サービスの実証、自動運転の安全性評価技術の開発など、自動運転の実用化と普及拡大を目指した研究開発が行われている。

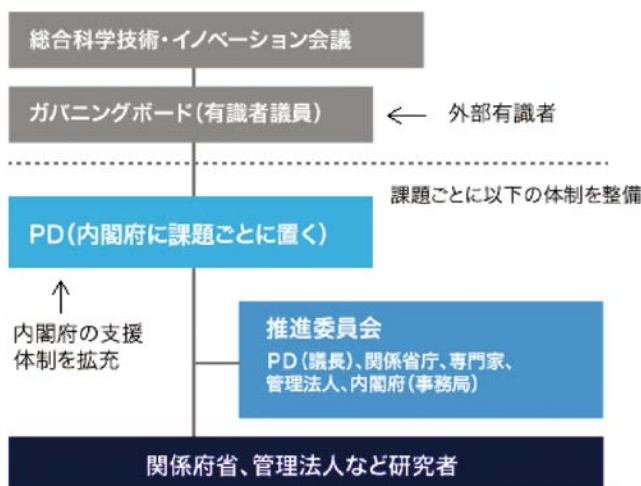


図 1 SIP の実施体制^[1]

2.2 DIVP コンソーシアムへの参画

2018 年、BIPROGY は神奈川工科大学の井上秀雄教授をリーダーとするコンソーシアムに参画し、研究開発テーマ「仮想空間での自動走行評価環境整備手法の開発」にて、SIP 第 2 期

に応募し採択された。以降、DIVPのプラットフォーム部と空間描画部の研究開発担当(図2)として、プロジェクトに携わってきた。DIVPコンソーシアムは産学10団体(当初)で構成され、参加団体がそれぞれの強みを活かしてプラットフォーム構築に貢献している。

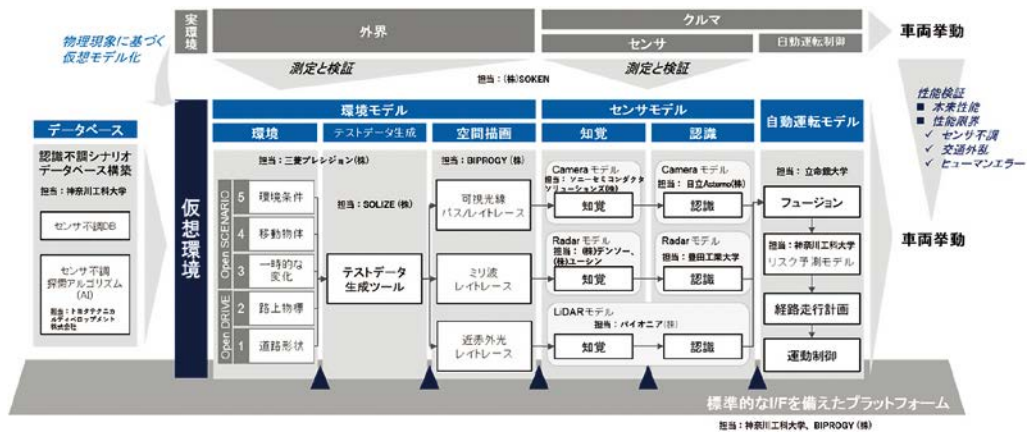


図2 DIVPの研究開発担当^[2]

3. プラットフォームのアーキテクチャ

自動運転シミュレーションのモデル構成を図3に示す。

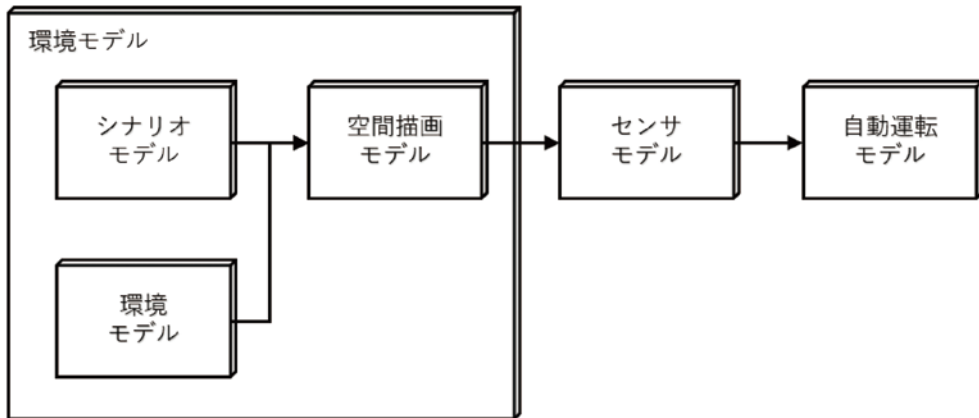


図3 自動運転シミュレーションのモデル構成

シナリオモデルは、シミュレーションに登場する交通参加者がシミュレーション中にどのような軌跡を取るかを規定するほか、時刻(昼間、夜間など)や天候などのシミュレーション条件を規定する。

環境モデルは、道路形状や信号機、交通標識、街並みなどの所謂マップ(図4)や、自動車(図5)、バス、自転車、歩行者(図6)などの交通参加者の形状を定義し、反射率(図7)や誘電率などの素材の物理的な特性を規定するモデルである。

空間描画モデルは、シナリオモデルと環境モデルを入力として、センサモデルの入力を生成するモデル、所謂レンダリング処理を行うモデルである。

センサモデルは、カメラやLiDAR、ミリ波レーダーなどのセンサの振る舞いを再現するモデルで空間描画結果を入力とし、視野内に存在する認識対象物の種類や位置、移動方向などの情報を出力する。

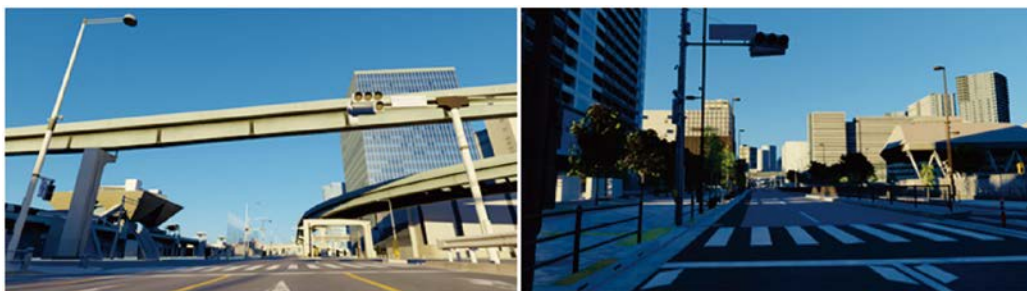


図4 マップの例



図5 自動車モデルの例



図6 大型車両、歩行者モデルの例

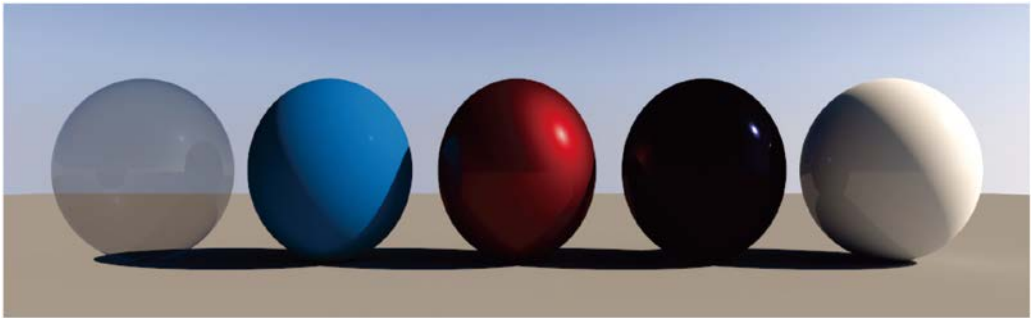


図7 球に異なる反射率を適用した例

自動運転モデル（あるいは、自動運転制御モデル）は、センサモデルが認識した外界の認識対象物の情報を基に、自動車をどのように制御するかを決定するモデルである。

DIVPではセンサメーカーが作成するセンサモデルと、OEM^{*1}が作成する自動運転制御モデルを連成した解析を容易に行えるようにすることを目標としている。モデル間のインターフェースを標準化することで、各モデルを任意に差し替えることができ、シミュレーション実施までにかかる時間やコストを削減することができる。DIVPのアーキテクチャを図8に示す。各モデルを任意に差し替える仕組みはFMIを採用し、モデル間の通信インターフェースとしてROSを採用している。

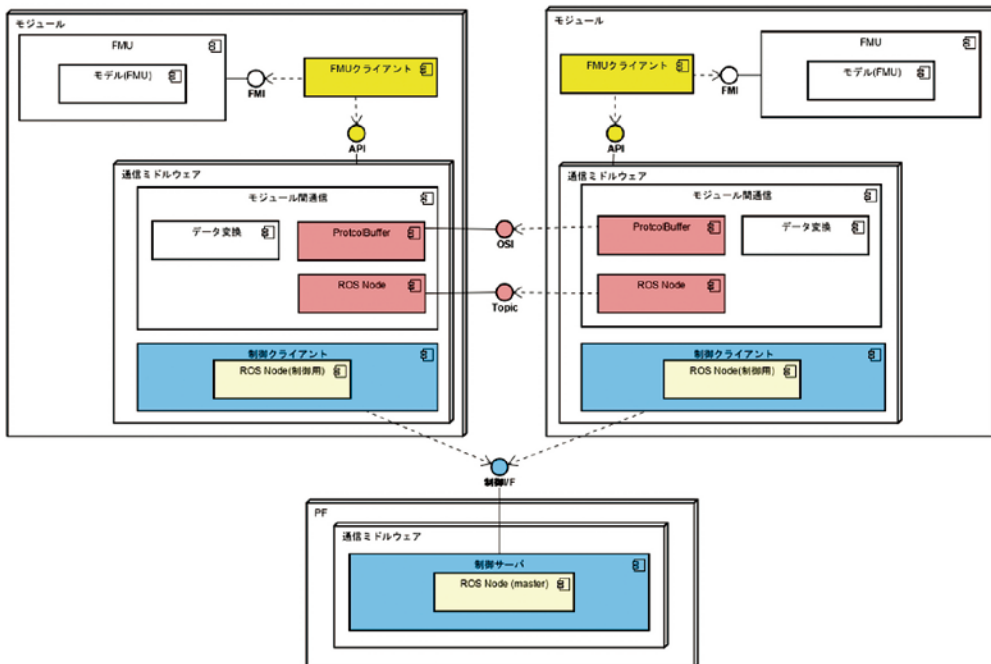


図8 DIVPのアーキテクチャ

FMI（Functional Mock-up Interface）はインターフェースを規定したXMLファイルと機能を提供するライブラリ、もしくはC言語のソースコードを組み合わせたコンテナにより動的モデルを交換するための仕様で、170以上のツールでサポートされている。モデル交換の仕

組みにより、シミュレータの有効性が高まるだけでなく、作成したモデルを様々なシミュレーションツールで利用できるようになるため、モデルの再利用性が向上する。

ROS (Robot Operating System) はロボット向けアプリケーションを開発するためのライブラリとツール類を提供する開発ツールキットである。ROS は様々なシミュレーションツールで採用が進んでおり、ROS を用いることで異なるシミュレータを連携させたコシミュレーション (Co-Simulation) を手軽に実現できる。

4. 空間描画処理

カメラ, LiDAR, ミリ波レーダーはアクティブセンサ^{*2}であるか, パッシブセンサ^{*3}であるかといった差や, 取り扱う電磁波の波長帯が異なるという差異はあるが, 電磁波の伝搬を計算するという点では共通である。DIVP では, レイトレーシング法^{*4}を用いて, 電磁波が空間を伝搬し, 物体にぶつかって反射するという振る舞いを模擬する。本章では各センサ向けの空間描画処理について概説する。

4.1 カメラ空間描画

可視光線の伝搬を, 回折などの一部現象を除いて物理的に正確に計算するためには, レンダリング方程式を解かなければならない。レンダリング方程式は, 図9に示すように, ある物体の表面 x において, 点 x から視点方向 ω_0 に出射される放射輝度を $L_0(x, \omega_0)$, 点 x へある方向 ω_i から入射する放射輝度を $L_i(x, \omega_i)$, 点 x における物体の自己発光の放射輝度を $L_e(x, \omega_0)$, 点 x において ω_i 方向から入射して ω_0 方向へ出射する場合の反射率 (BSDF) を $f_r(x, \omega_0, \omega_i)$, 点 x における法線ベクトルを n とすると, (1) 式のように表される。

$$L_0(x, \omega_0) = L_e(x, \omega_0) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega_0, \omega_i) L_i(x, \omega_i) \langle \omega_i, n \rangle d\omega_i \quad (1)$$

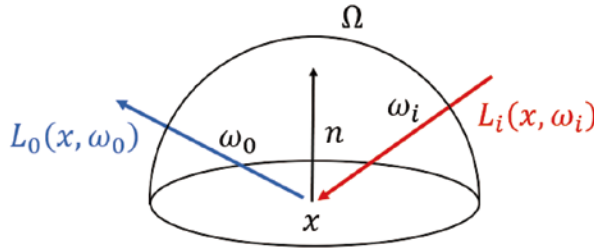


図9 レンダリング方程式

レンダリング方程式を解析的に解くことは困難なため, モンテカルロ積分を行って積分の近似値を算出する。このようなレイトレーシング手法をモンテカルロ・レイトレーシングという。DIVP ではモンテカルロ・レイトレーシングを用いた空間描画処理を実装している。

4.2 LiDAR 空間描画

DIVP ではパルス TOF 方式の LiDAR 向けの空間描画処理を実装している。パルス TOF 方式は, センサから出射されたパルス波が物体で反射して戻ってくるまでの時間を計測することで, 物体までの距離を検知する方式である (図10)。

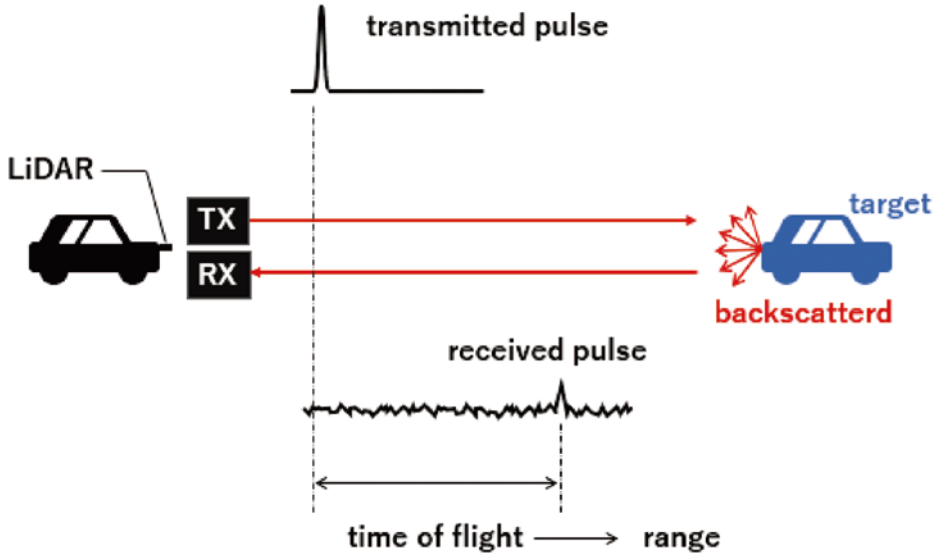
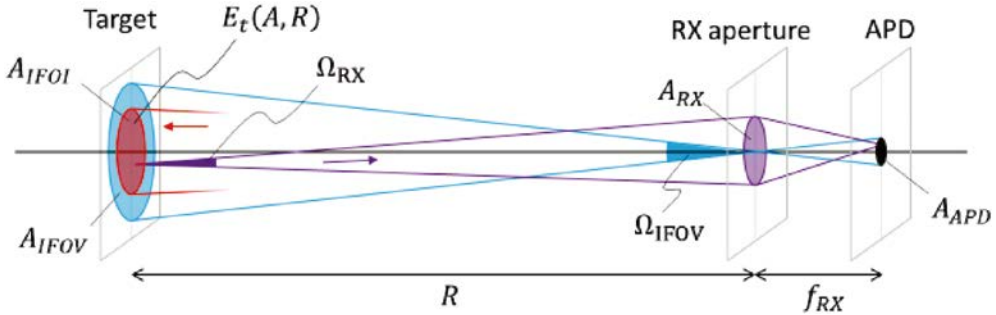


図 10 パルス TOF 方式の LiDAR

LiDAR 空間描画では、レイトラシング処理で図 11 に示す信号伝搬モデルの情報を収集し、式(2)を解くことで受信光の強度を算出している。この式は、送信光が照射される面積を A_{IFOI} 、受信視野に入る物標の面積を A_{IFOV} 、受信レンズの受光角を Ω_{RX} 、受信視野角を Ω_{IFOV} 、受信開口面積を A_{RX} 、物標面への距離を R 、物標面上での照度を $E_t(A, R)$ 、物標反射率を ρ とした場合に、送信光の強度 P_t と受信光の強度 P_r の関係を表している。

図 11 LiDAR の信号伝搬モデル^[3]

$$P_r(R) = \frac{\rho}{\pi} \int_{A_{IFOV}(R)} \int_{\Omega_{RX}(R)} E_t(A, R) dA d\Omega = \frac{\rho}{\pi} \frac{A_{RX}}{R^2} P_t \quad (2)$$

4.3 ミリ波レーダー空間描画

DIVP では周波数変調連続波レーダー向けの処理を実装している。この方式のレーダーは、図 12 に示すように周波数を徐々に変えた連続波を送信し、受信した連続波の周波数との差分によって物標までの距離を検知する。

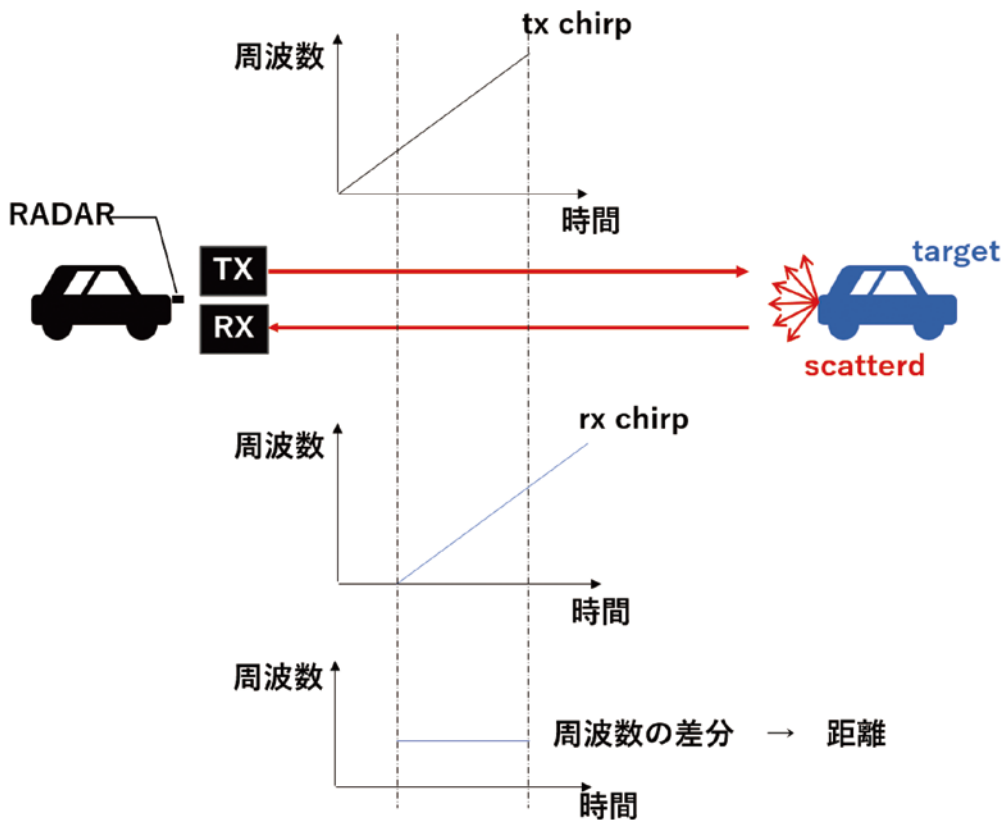


図 12 周波数変調連続波レーダー

ミリ波レーダー空間描画はレイトレーシング処理で電波の伝搬経路を算出し、(3)に示すレーダー方程式を解くことによって、受信波の信号強度を算出する。

$$P_r = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} P_t \quad (3)$$

レーダー方程式は、アンテナ利得を G 、波長を λ 、物標のレーダー反射断面積を σ 、目標までの距離を R とした場合に、送信電力 P_t と受信電力 P_r の関係を表している。なお、レーダー空間描画の計算時には、アンテナ利得 G は 0 [dB] として計算する。

5. 一致性の高いシミュレーションモデルの開発

物理現象に則った一致性の高いシミュレーションの開発と検証のために、試験場や実路での実験と、実験結果に基づいたシミュレーションモデルの開発を行っていることが DIVP の特徴である。図 13 は日本自動車研究所のテストコースで行った実験でのカメラ実機撮影結果と、実験時の条件に合わせたシミュレーション結果の比較例である。シミュレーション結果は実機撮影結果と遜色のないことが目視でき、カメラセンサの信号レベルでも誤差が 20% 以下であることが確認できている。20% という誤差は実機測定時に発生する測定誤差レベルであり、良い結果が得られていると言える。

図 13 カメラ実機とシミュレーションの比較^[3]

この結果を得るために、太陽の位置の条件を合わせるための実験日時や、天候、路面やガードレールなどの周辺構造物の反射率の現地測定結果などを、シミュレーションに反映している。LiDAR、ミリ波レーダーについても、それぞれの特徴に合わせた実験を行い、得られた実験結果に基づくシミュレーションモデル開発を行っている。

6. シミュレーション結果

DIVPで、カメラとミリ波レーダーのシミュレーションを行った結果が図 14 である。首都高 C1 の汐留トンネルを抜けた付近で前方にプリウスが走行しているケースで、左手がカメラシミュレーションの結果、右手がミリ波レーダーシミュレーションの結果である。

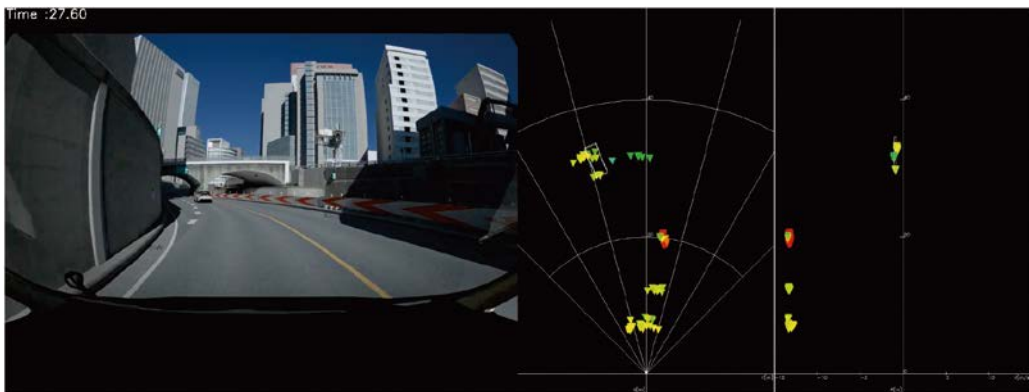


図 14 カメラとミリ波レーダーのシミュレーション結果例

図 15 は、左手がカメラシミュレーションの結果、右手が LiDAR シミュレーションの結果である。この例は、お台場の舗装に使われている強反射路面の再現を行っている。この舗装は東京オリンピックの開催に向けて、路面温度の上昇を抑えるために施工されたもので、一般の舗装路よりも赤外線反射率が高くなっており、シミュレーション結果でも路面が赤く（反射が強く）表示されていることを確認できる。

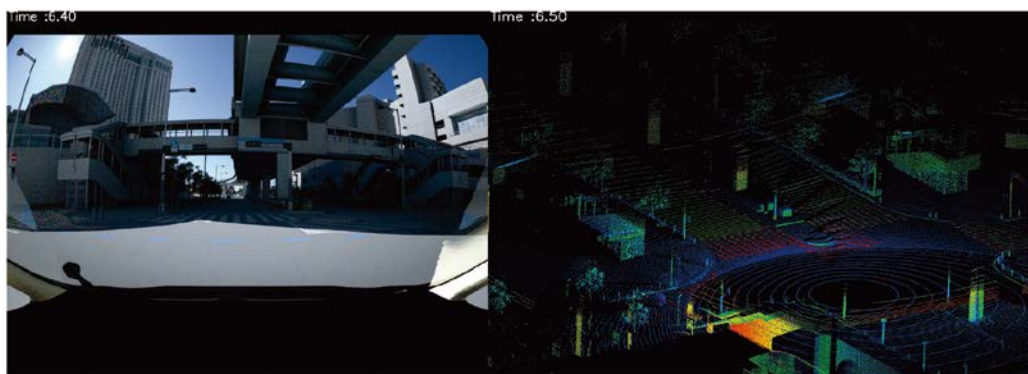


図 15 カメラとLiDARのシミュレーション結果例

シミュレーションを実機での検証の代替としていくためには、天候の変化による影響や周辺構造物による影響など、運転時に起こりうる様々な現象を再現しなければならない。図 16 は再現を行った逆光や降雨、ビル反射の影響などのモデルを用いてシミュレーションを行った結果である。今後も様々な自然現象の再現に取り組み、シミュレーションの有効性を高めていく予定である。



図 16 様々な現象のモデル化

7. お わ り に

BIPROGY は、自動運転シミュレーションの使用体験を通して、自動運転の実現に貢献することにより、社会課題の解決に取り組んでいく。シミュレータの有効性を向上させるため、現実世界で収集したデータを基に、物理法則に則した数値計算モデルの研究開発を継続していく。これにより、現実に近い物理的なシミュレーションができるようになれば、自動運転のテストを実車からシミュレーションに移行することが可能となる。自動運転向けのデジタルツインの実現に向けて、今後も取り組みを加速していく。

-
- * 1 自動車業界では、OEM は完成車メーカーの意味で用いられることが多い。
 - * 2 センサから測定対象に向けて信号を送り、その反射を検出するセンサ。
 - * 3 測定対象から放出される信号のみを検出するセンサ。
 - * 4 光源の位置や光量・方向など様々な要素を計算して、水面の反射やガラスに映る物体など微妙な光の描写をよりリアルに再現する技術。

- [2] 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期/自動運転 (システムとサービスの拡張) 仮想空間での自動走行評価環境整備手法の開発 平成30年度 報告書, DIVP Consortium, 2019年, https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd02/206_s.pdf
- [3] Driving Intelligence Validation Platform 令和2年度 成果報告, DIVP Consortium, 2021年, <https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd04/201s.pdf>

※ 上記参考文献に含まれる URL のリンク先は, 2022年8月16日時点での存在を確認.

執筆者紹介 渡 邊 龍 雄 (Tatsuo Watanabe)

2004年日本ユニシス(株)入社. 入社時より CAD/CAE システムの形状処理機能開発や, CG のレンダリング処理機能開発などに従事.

