

自動運転車の安全性評価に向けた 仮想空間シミュレーションDIVP®の開発と応用

神奈川工科大学 井上 秀雄



Scenario

AD-URBAN

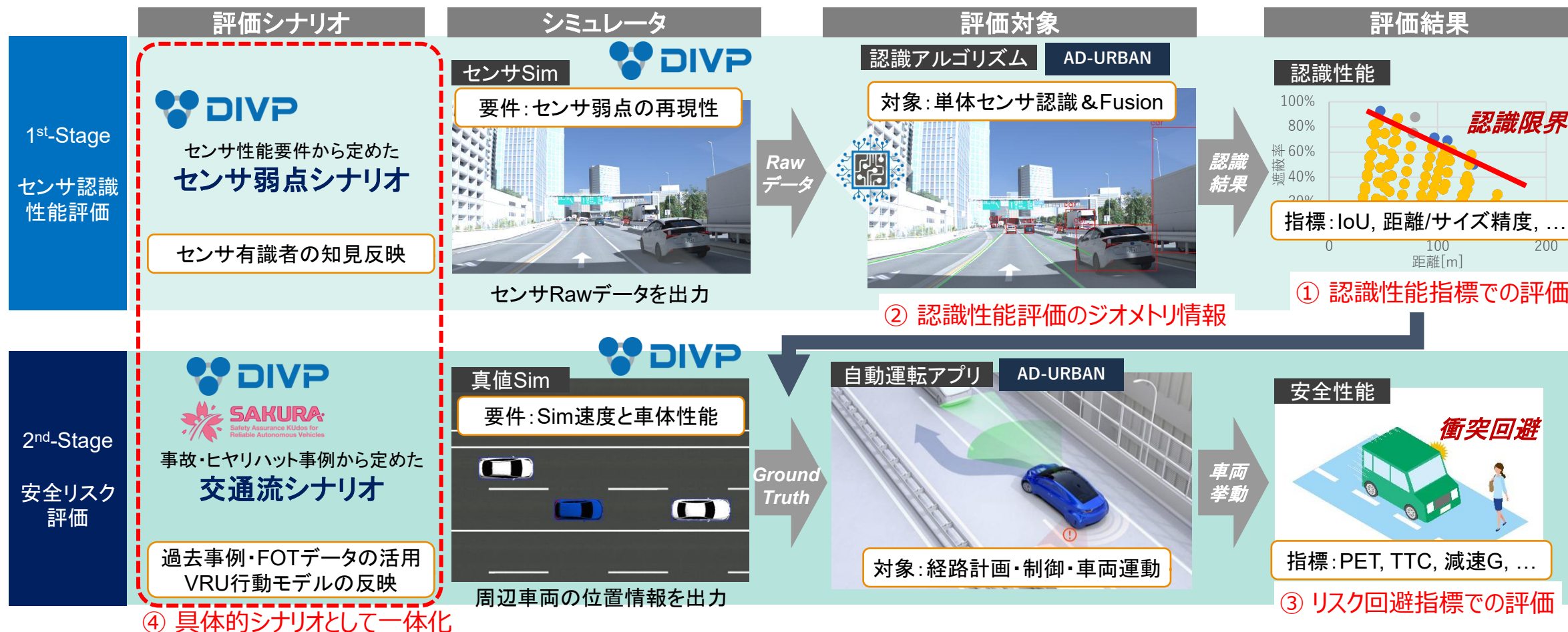
AD System



2-stages シミュレーションでの安全性評価体系と評価指標の確立

2Stages評価体系をDIVP・AD-URBAN・SAKURA連携で構築

仮想空間上でセンサ認識性能に基づいた安全性評価が行える評価プラットフォームを構築する



地域実証実験と仮想空間によるデジタルツイン検証の確立が目標

DIVP 1st-stage; センサーパーセプションシミュレーション

自動運転の安全性評価に貢献する

実現象と一致性の高い仮想空間シミュレーションプラットフォームを構築

- 実現象と一致性の高いセンサと走行環境のシミュレーションモデル
- シナリオ生成～認識性能評価～車両制御検証を一貫して評価可能なプラットフォーム
- 既存シミュレーションとの結合性の充実

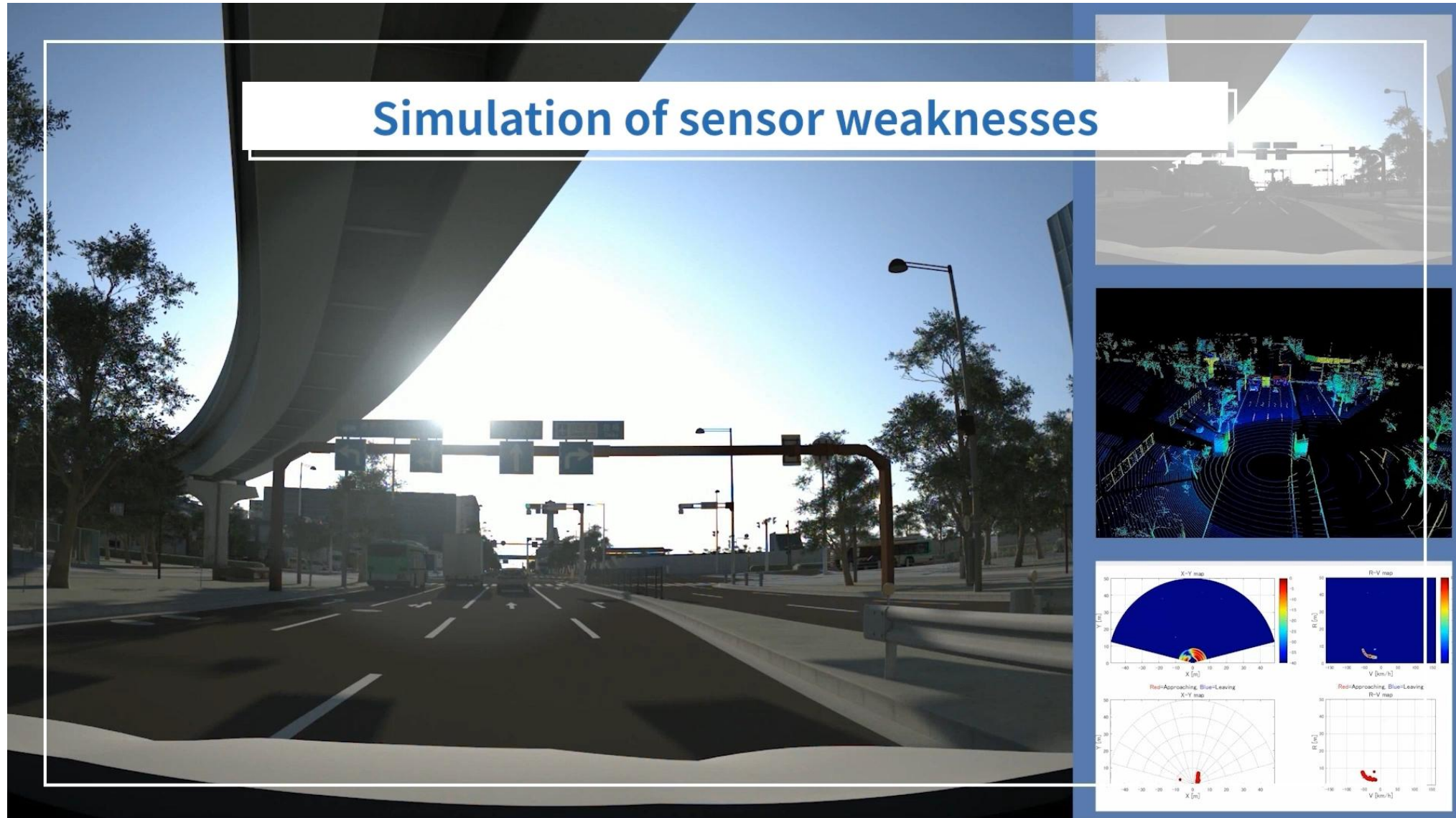


現実空間



センサ視界の仮想空間モデル, センサ内部モデル へ

DIVP outline; sensor weakness scenarios



認識限界評価；仮想空間を用いたシステム評価

雨天時の信号認識；仮想空間シミュレーションにて認識限界性能の検証が可能

実証実験の雨天画像例（激し降雨遭遇できず）
→信号認識限界不明

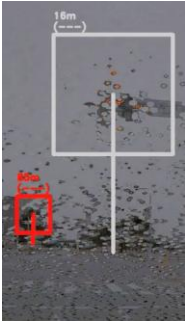


実証実験	通常天候	雨天 (数mm/h)
認識率	0.982	0.984

DIVP シミュレーションで激しい降雨設定可
→信号認識限界検証が可能



シミュレーション	通常天候	雨天 (激しい降雨)
認識率	0.989	0.868



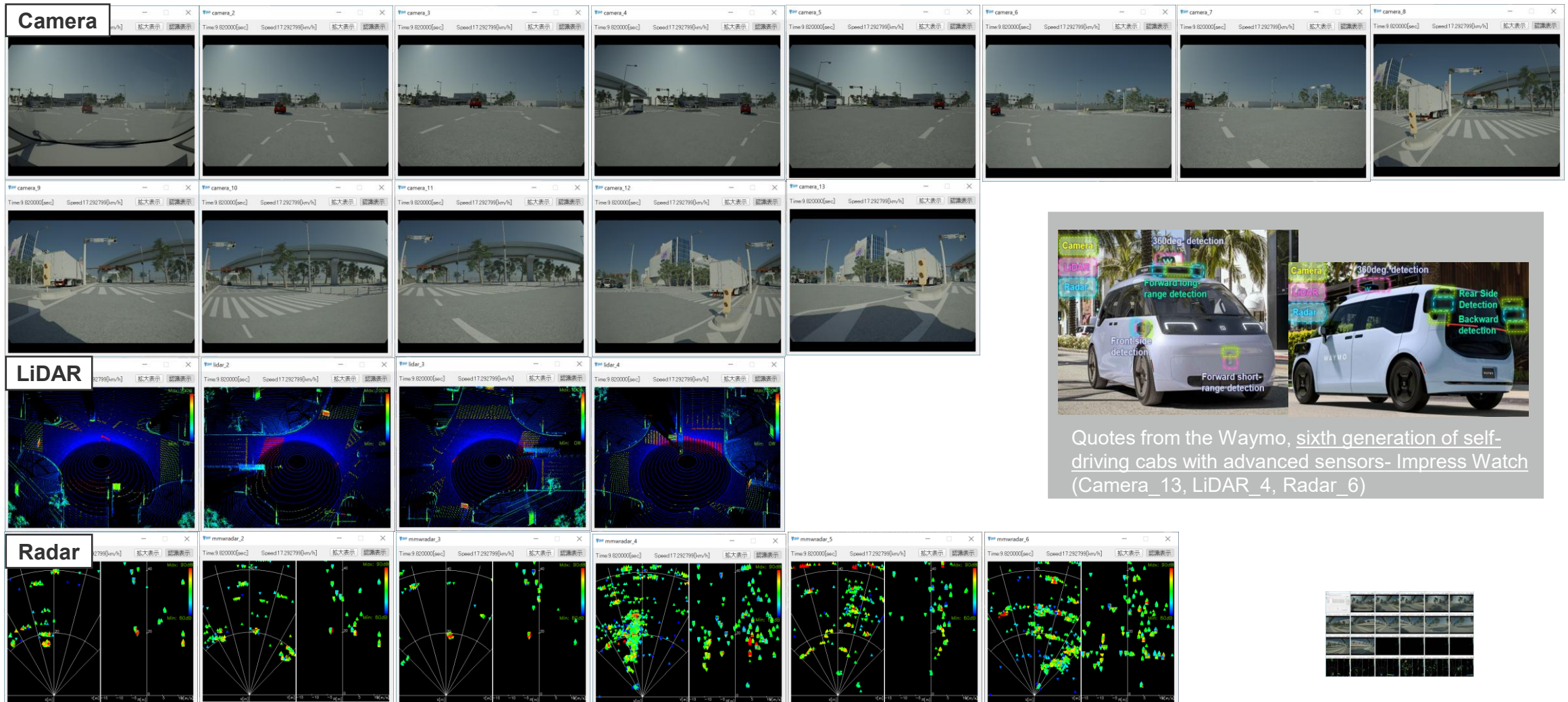
外挿による
評価が可能

Sim.にて降雨量の増大により全体的な認識率の悪化を確認

- ・雨滴での遮蔽による未検出
- ・色合いの変化による誤認識 等

Performance of new DIVP[®] platform

新DIVPプラットフォームは、クラウド上で大容量・高速のマルチセンサー計算を実現します。例として、13台のカメラ、4台のLiDAR、6台のレーダー、合計23個のマルチセンサーを同時に計算させることが可能です。



DIVP® sim.利用の自己位置推定アルゴリズム評価

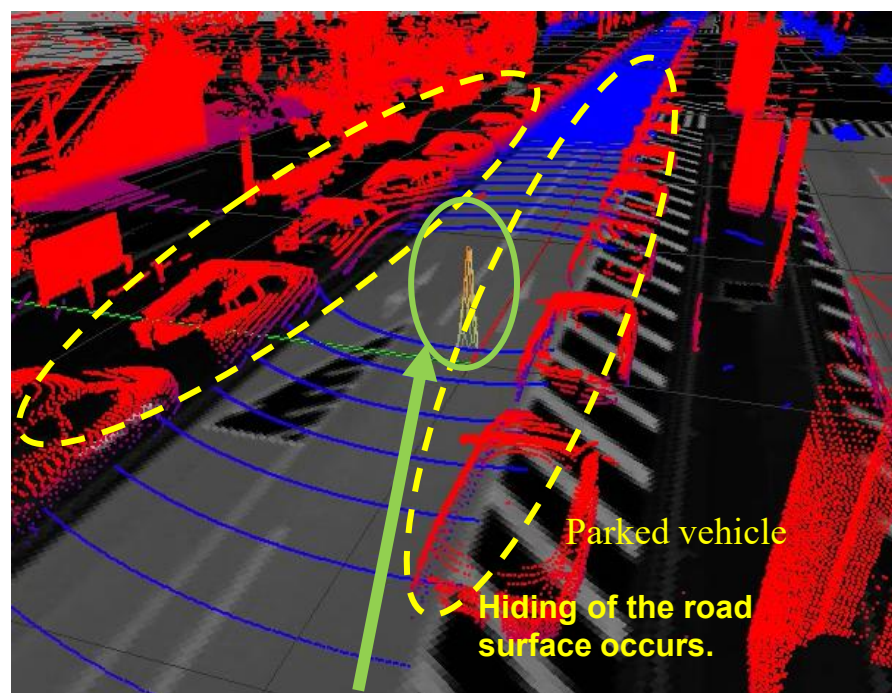
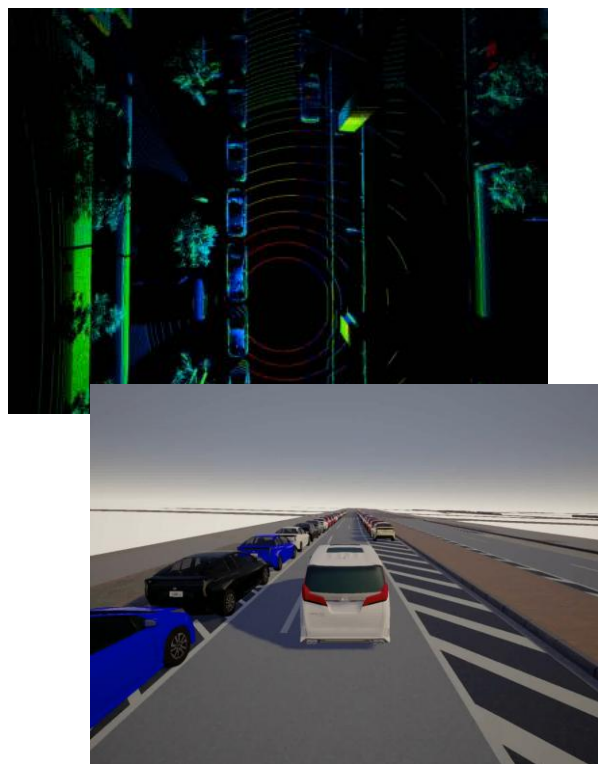
エッジケース条件に対するシステム制御のロバスト性、性能限界の評価例

AD-URBANと連携し、**一致性の高いセンサSim** + **センサ弱点シナリオ**による性能限界値を探索

DIVP® LiDAR & Camera Sim. →

LiDAR & Algorithm output →

Effect on localizing accuracy



Estimated location
(posterior probability density distribution)



システムとしては評価したいが現実では**設定困難な悪条件**を、DIVP®シミュレーションが提供し、AD-URBAN(金沢大学Proj.)の自己位置推定アルゴリズムの高いロバスト性が検証できた。

DIVPシミュレーションによる動的な事故再現

見通しの良い交差点で、逆光により横断車両を認識できなかった事故や、自転車による死亡事故などをDIVPシミュレーションで再現 → 事故防止策の検討が可能。



晴天，逆光での交差点事故再現



夜間の自転車死亡事故の再現



L4 FOTバス評価: Turn right and left at T-intersection

カメラは、街路樹から道路を横切り横断歩道を渡る自転車を、バスに非常に近づくまで認識できない。

Using “Yolo v8” as a recognition algorithm

Camera mounting position

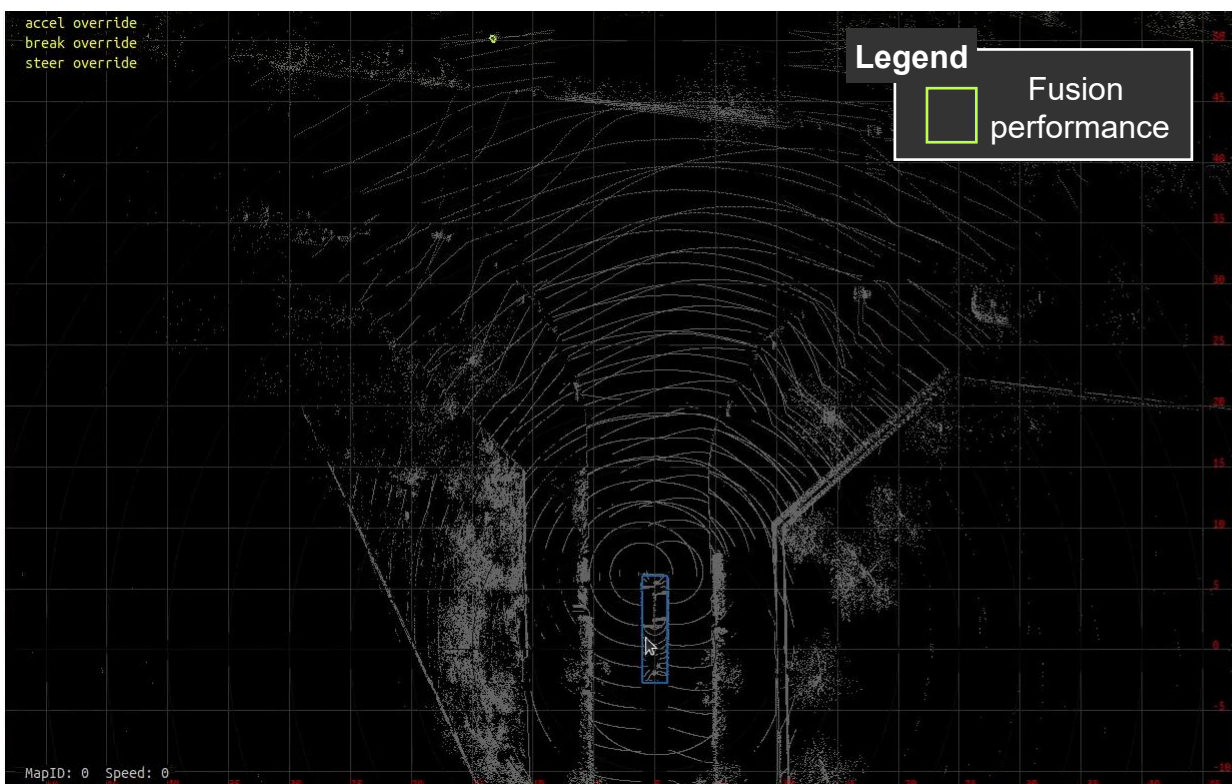
Forward detecting camera



L4FOTバス評価: フュージョンでの街路樹等で遮蔽される歩行者認識の向上

個々のセンサー認識およびフュージョン認識の評価を実施。正確な真値に基づく各センサ認識性能とフュージョン認識性能の評価がシミュレーションで可能であることが確認できた。歩行者認識のトラッキング性能の向上につながる。

Fusion performance [LiDAR image]



Fusion performance [Camera image]



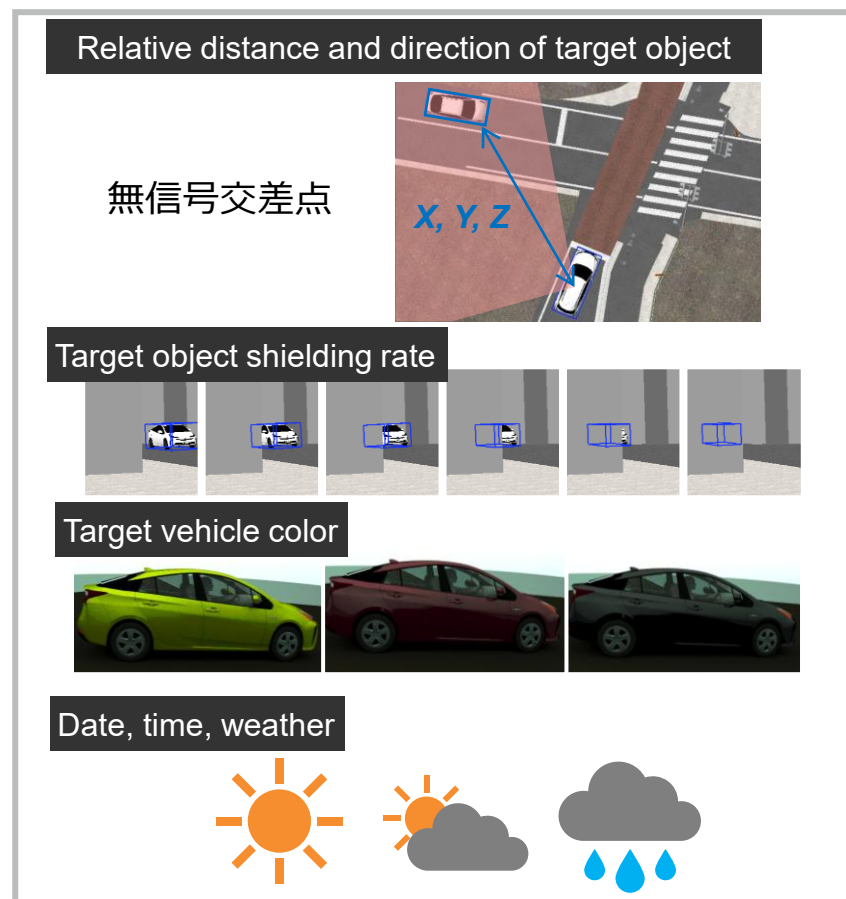
2nd stage評価：自動運転車の衝突回避行動の評価

FOTユースケースから得られた統合シナリオを用いて、認識性能に基づく自動運転車の衝突回避行動の評価が可能。

Legend

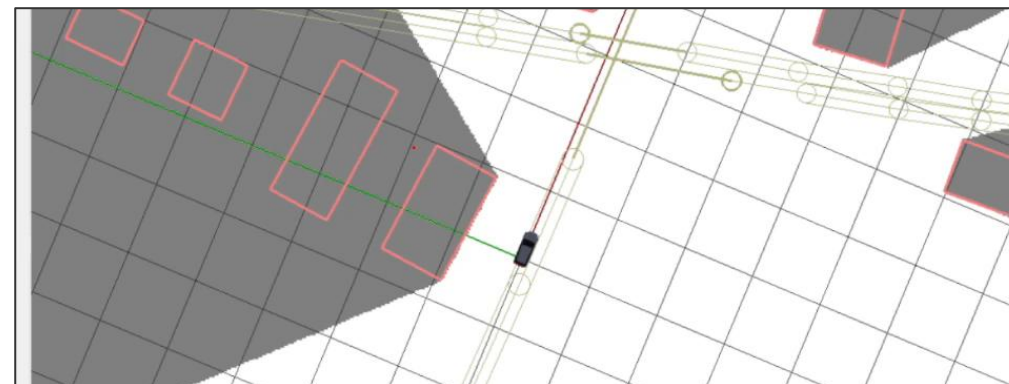
 : Ego-ADS.	 : shielding buildings
 : Undetected-V.	 : Blind spot
 : Detected-V	

FOTユースケースからの統合シナリオ（シナリオ数；10,000以上）

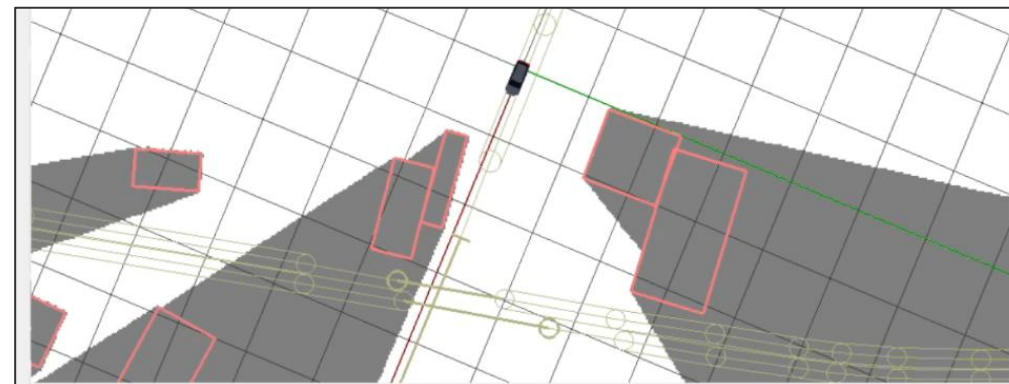


Though
1st-stage
recognition
performance

自動運転車の認識性能に基づく衝突回避行動の評価



A. ADS車は横断車両を認識し安全余裕を判断し回避しながら交差点を通過。

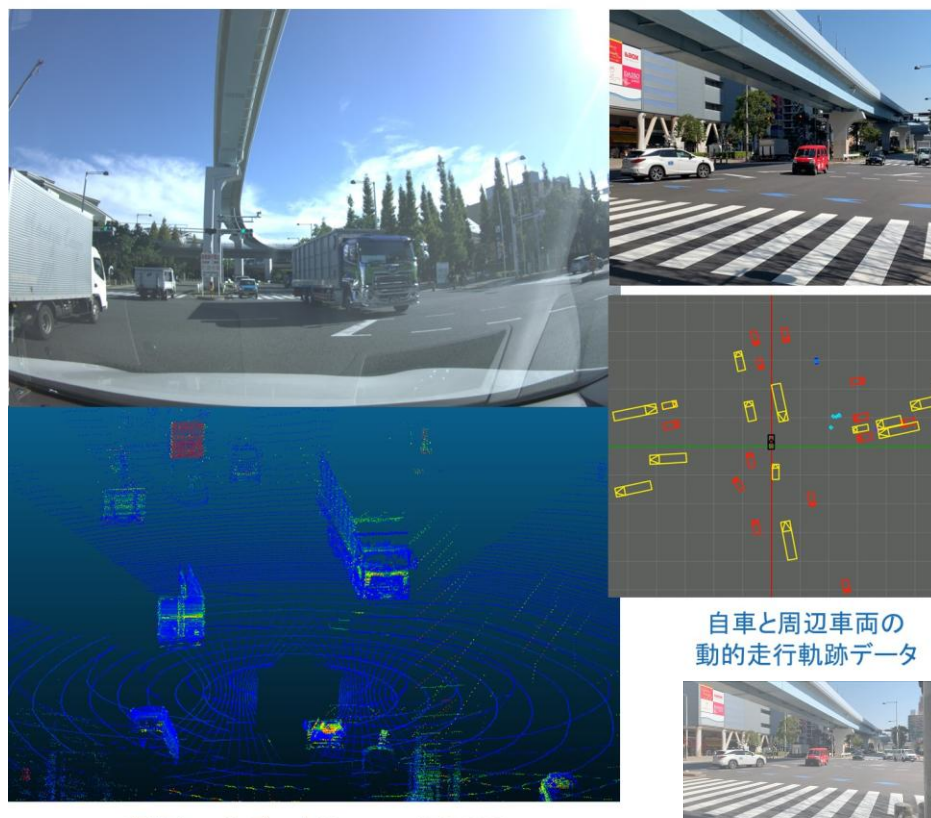


B. ADS車は、建物と影のコントラストがないために横断車両を間際まで認識できず、立ち往生。

2nd stage評価：公道で取得した交差点での軌跡データの再現と活用

自動運転車のFOTからの交通データをもとに、DIVPシミュレータで交差点走行シナリオを再現し、様々な環境条件を変化させて安全性を評価する。

公道での走行軌跡データ

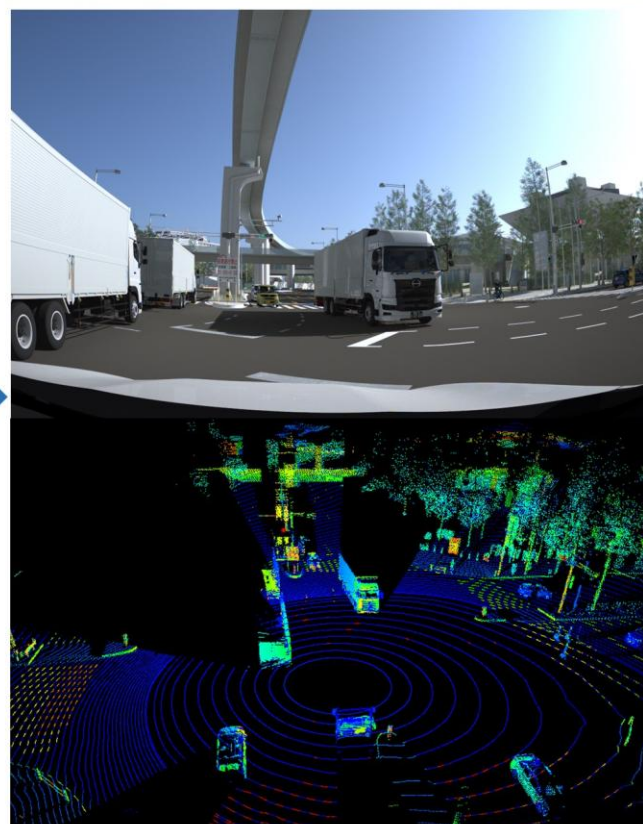


実機センサデータ(Camera/LiDAR)

自車と周辺車両の
動的走行軌跡データ



シミュレーションでの再現



更に厳しい条件を設定

天候変更



周辺のBRU(交通弱者)を追加



リスクシナリオ生成のパイプラインと2nd stage評価（回避可能性）

- ① 人間ドライバー主観から危険と感じた場面を収集したニアミスデータソースが特徴.
- ② このデータ群のカメラ画像から自車および他車の軌跡を抽出し、統計的パラメータデータを生成.
- ③ 更に、自動運転車の走行挙動を評価するため、新たなSCT（安全クッション時間）指標を考案.
→ヒヤリハット相当の危険度レベルとその発生頻度に対する安全マージンの定量的な評価に活用可能.

① ニアミス走行データ取得

Near-miss data



② ODD （運航設計領域）

リスクアセスメント実践
Hazard and Risk Assessment
Ref, ISO26262, ISO21448

③ 解析（軌跡,パラメータ値抽出） ⑤ リスクシナリオデータセット生成 & リスクシナリオ類型化

- 動的軌跡
- 熟練ドライバの暗黙知
- パラメータ抽出
- SCT指標によるインシデント検出

- ミクロ評価；
リスク類型化での確定系シナリオ生成
- マクロ評価；
適切なリスクシナリオ混合の
ランダム実験用シナリオ生成
- 生成ツールと標準活用
OpenX, toolchain (SDMG,...)

④ 不確定リスクの統計的決定

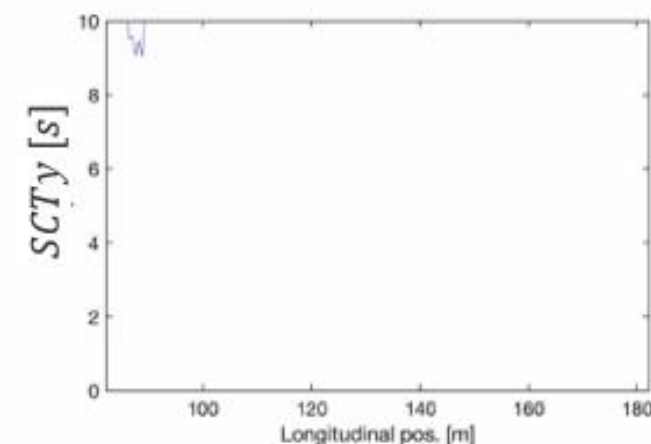
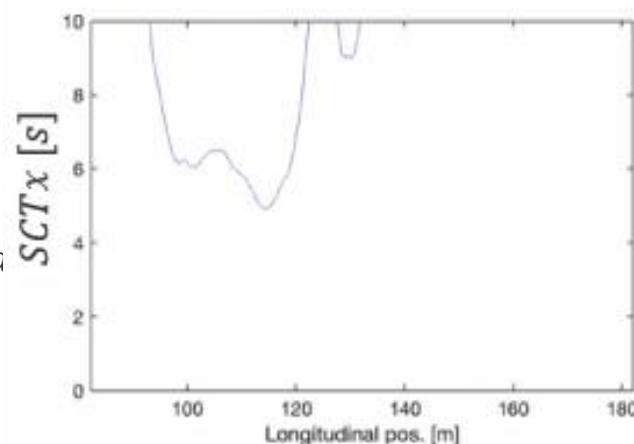
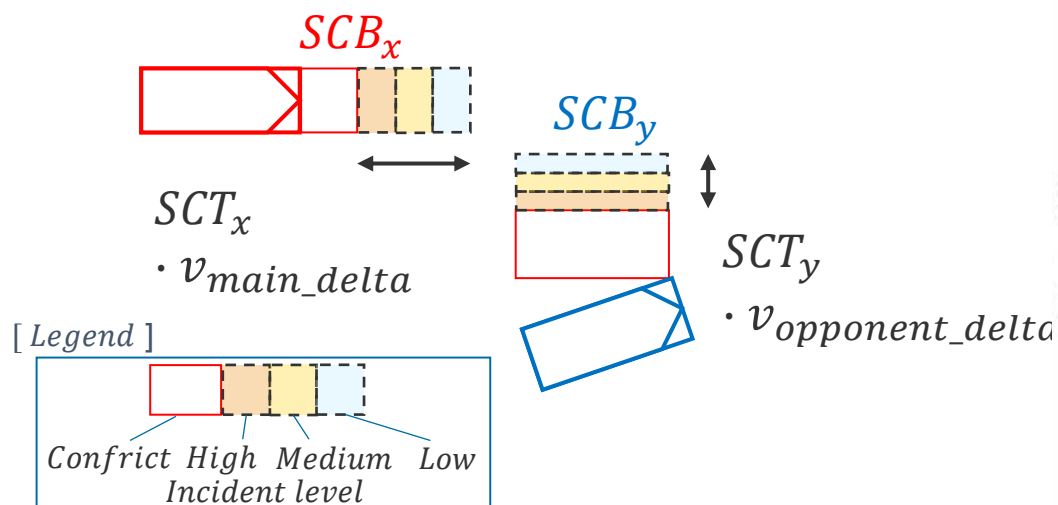
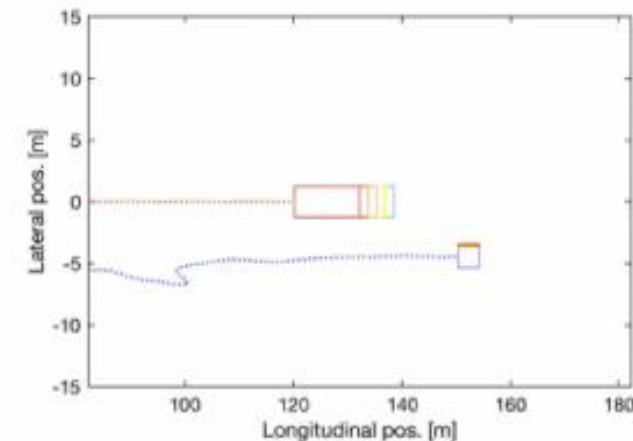
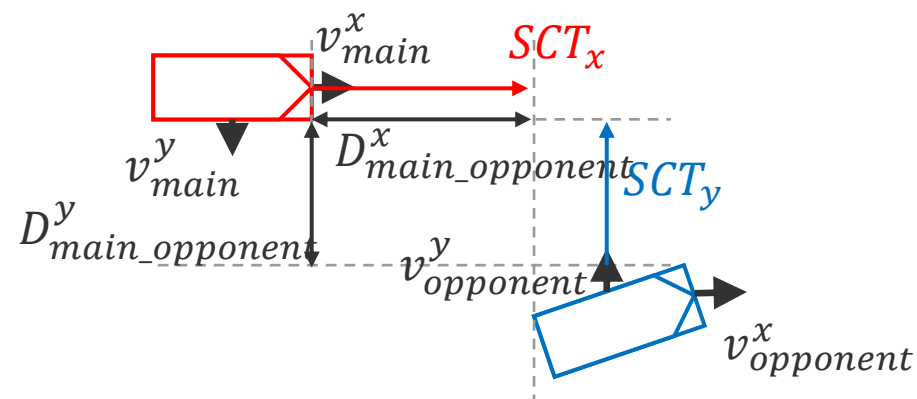
- 1) 交通流リスク
 - 2) 交通弱者(VRU)リスク
 - 3) 認識リスク
- ジオメトリックリスク；遮蔽(3D構造物/動的物標等)
 - センシング弱点リスク；センサ電磁波の走行環境での原理的リスク

⑥ 運転行動の安全性評価

- 決定系シナリオ評価
→SCT指標での安全余裕度評価
- ランダム実験（シミュレーション）での
危険度レベル(Severity)と
発生頻度(Exposure)
の統計的評価
→SCT指標活用

安全上のインシデント指標: Safety Cushion Time (& Box)

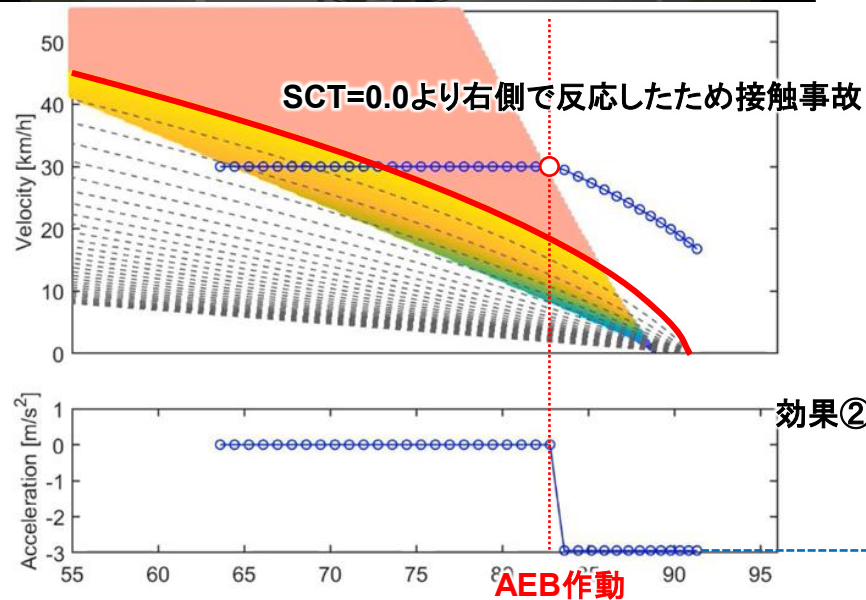
- 1) Safety Cushion Time と Safety Cushion Boxを安全上重要なインシデント指標として検討中
- 2) この定量指標は、実際の高速道路における人間の危険認識の主観に合っている。
- 3) この指標を使って「危険場面の抽出」「シミュレーションの時空間環境におけるインシデントレベルと発生頻度の評価」が可能となる。



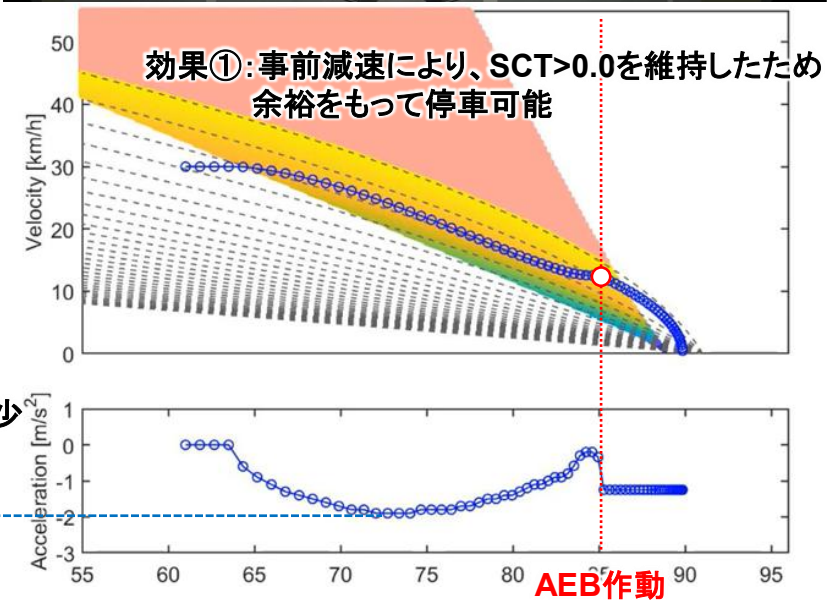
安全余裕度から運転行動を評価するSafety-Cushion-Time (SCT) の定義

安全・リスクに対する自動運転システムの対応能力が評価できる指標を提案
「かもしれない運転」に該当する対応能力の指標としてSCTの実装と検証を実施

事前減速なし



事前減速あり



SCTを用いてAEBの事故回避性能を示せることを確認

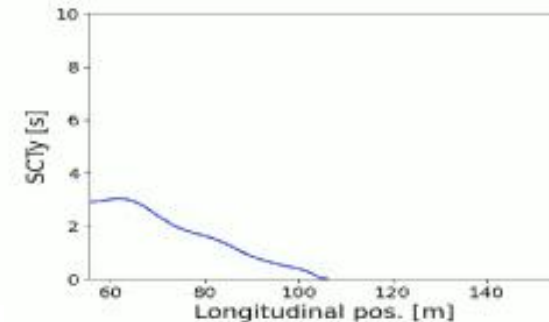
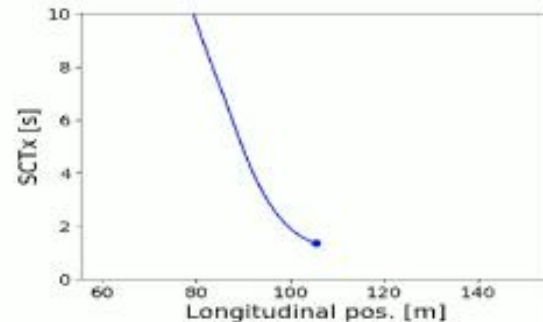
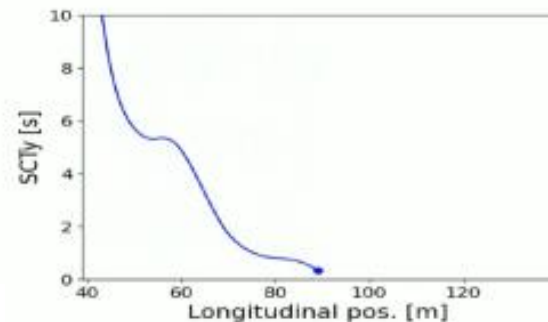
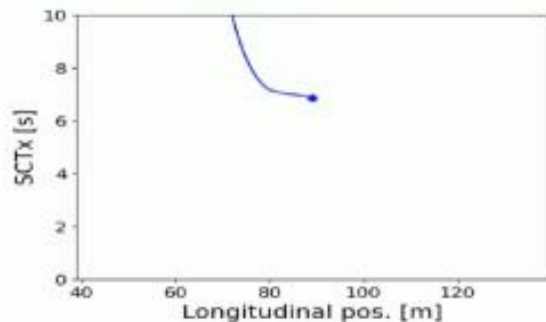
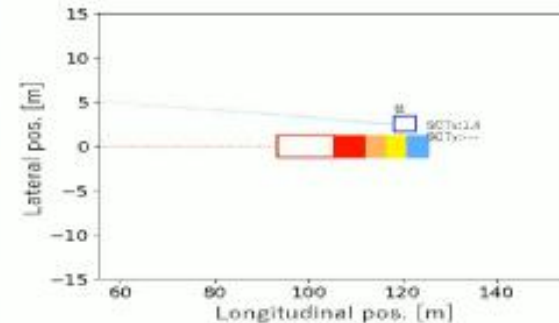
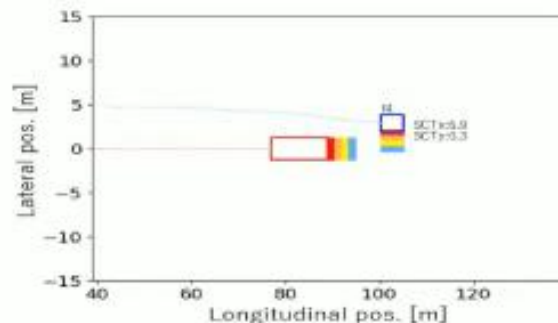
DIVPシミュレーションでの合流リスクシナリオの仮想空間への再現と拡張

SCTの定量的リスク指標を用いることで、実車両を再現し、より危険な状況にまで拡張したリスクシナリオでのシミュレーション評価が可能となる。

合流リスクシナリオの仮想空間への再現



合流時の接近リスクを仮想空間上でより危険なシナリオに拡張し、ADS車の運転行動の安全性を評価できる。



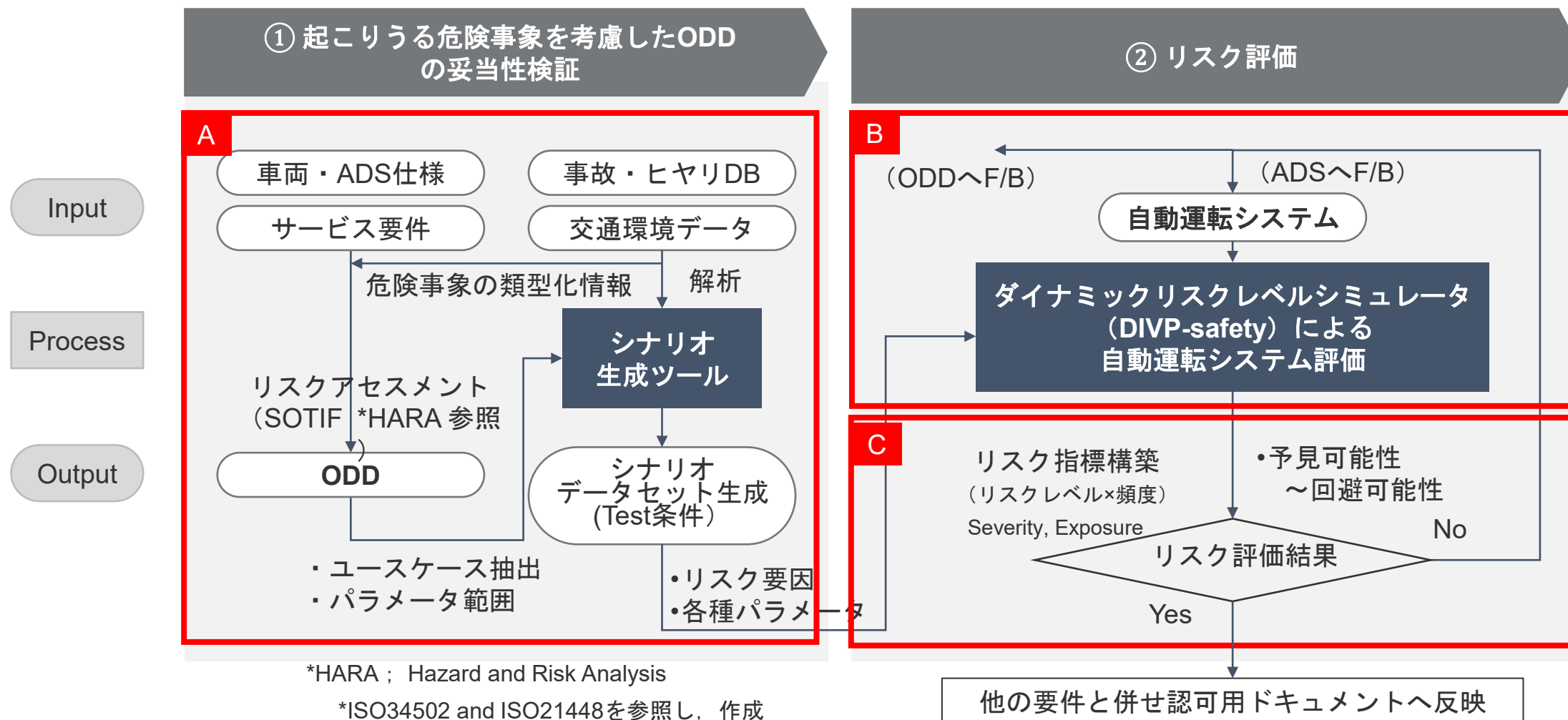
交通流シミュレーションにおけるランダム実験による安全性評価

ODDにより決定されたリスクシナリオを織り込んだ交通流を作成。自車両の運転行動におけるニアミスの発生頻度をSCT指標を用いて評価する (DIVP~Wissim (PTV) のツールチェーンを活用)。



まとめ ; 日本におけるADSの安全評価フレームワークの提案と推進

本プロジェクトでは、シミュレーションを活用した安全性評価のフレームワークを構築した。これはADS (L4) 地域実証等のプロジェクトと連携し、このフレームワークの実用性を検証。





Driving Intelligence Validation Platform

Key word

- Risk Assessment
- AI for Active Safety
- VRU Safety

Contact Information

 **DIVP
Consortium**



**V-Drive
Technologies**



Thank you for your kind attention!

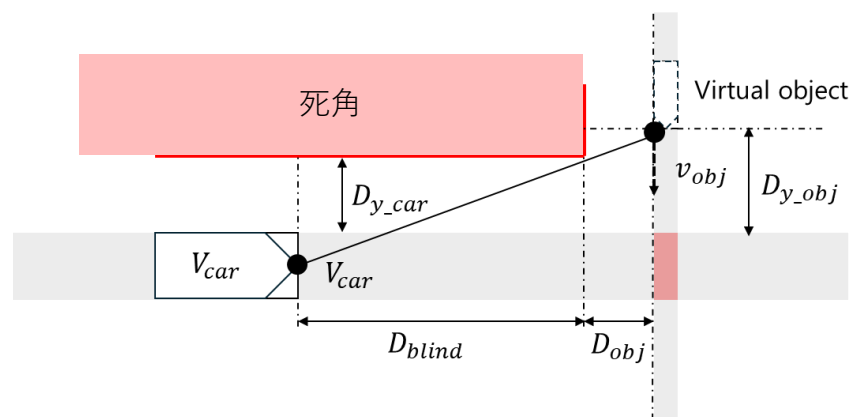
Tokyo Odaiba → Virtual Community Ground



Safety Cushion Time (SCT)の基本的理解

安全・リスクに対する自動運転システムの対応能力が評価できる指標を提案
「かもしれない運転」に該当する対応能力の指標としてSCTの実装と検証を実施

Safety-Cushion-Timeの定義



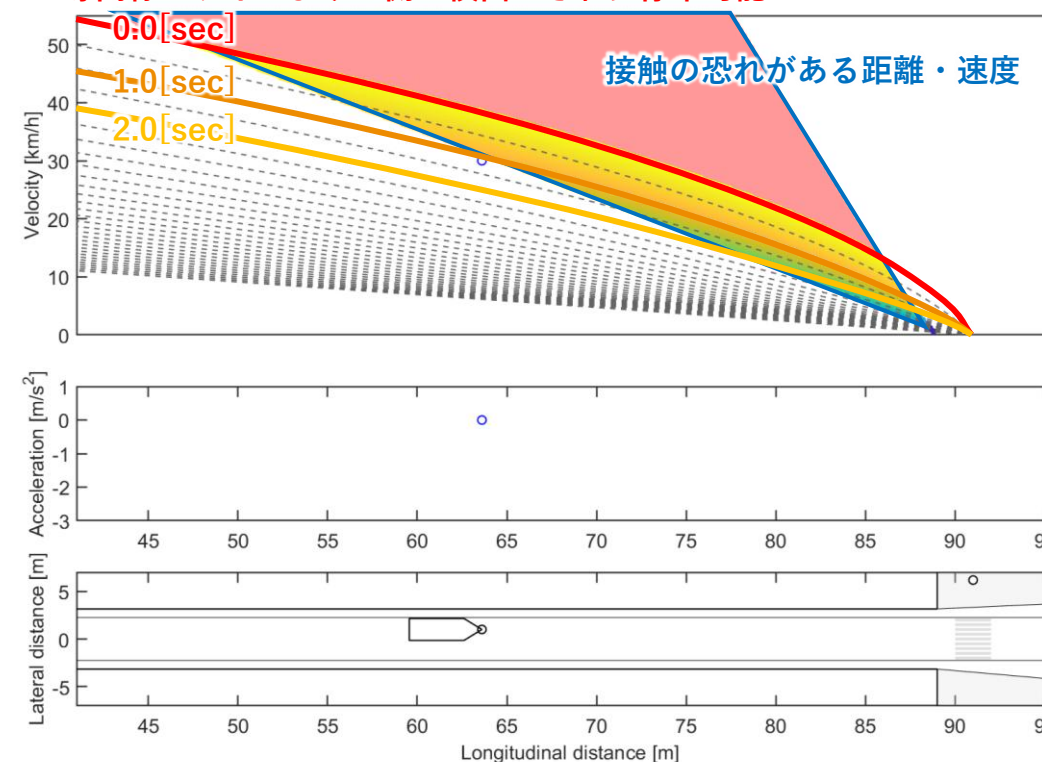
$$SCT(t^*) = \underbrace{\frac{D_{blind}(t^*) + D_{obj}(t^*)}{V_{car}(t^*)}}_{\text{接触までの時間} = \text{TTC}} + \underbrace{\frac{V_{car}(t^*)}{2a_{mean}}}_{\text{減速による延長時間}} - \underbrace{\tau}_{\text{空走時間 (= 反応時間)}}$$

$SCT < 0.0$. . . 接触事故

従来指標 **TTC** に **予測行動モデル** を加えた指標

SCTを用いた行動評価

SCTの等高線→ラインより左側で検出できれば停車可能



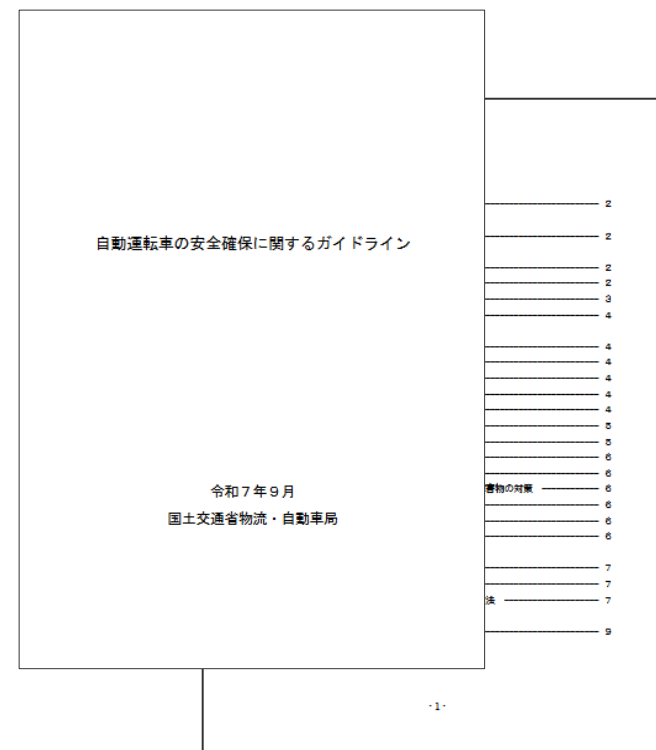
次項：シミュレーションデモを用いた効果説明

自動運転車の安全確保に関するガイドライン

国土交通省 物流・自動車局，令和 7 年 9 月発行「自動運転車の安全確保に関するガイドライン」より抜粋。

<https://www.mlit.go.jp/jidosha/content/001912973.pdf#page=3.00>

- ① 自動運転車は、道路交通法を遵守（※）する
- ② 自動運転車は、他の交通参加者が道路交通法を遵守する限り、事故を発生させない
- ③ 自動運転車は、他の交通参加者が道路交通法を遵守しない場合であっても、できる限り事故を発生させない
- ④ 自動運転車は、他の交通参加者が道路交通法を遵守せず、事故が不可避な場合であっても、できる限り被害の軽減に努める



WP29におけるSim活用の議論

こうした課題感からか、現在WP29では、“ Virtual testing and credibility assessment”について議論が進んでおり、Annexの中でフレームワークが示されている状況

国土交通省

【レベル3・4】自動運転システムの国際ガイドラインの概要

● 日本が自動運転車に求められる安全性能やその評価手法を提案し、専門家会議の共同議長国として議論を主導

● 本ガイドラインをもとに、今後、法的拘束力のある国連基準（UNR/GTR）の策定に向けて議論中。引き続き、共同議長国として議論を主導。

求められる安全性能

求められる安全レベル

● 交通法規を遵守すること

● 注意深く有能な人間ドライバーと同等以上の安全性を有すること 等

交通シナリオによる評価

以下の3つの分類毎に必要なシナリオを設定

➢ 通常の交通状況

➢ 衝突の危険性がある場合

➢ 不具合発生時

乗員等とのインタラクション

● 乗員等にシステム作動状況や緊急時を知らせること 等

評価手法

安全性能の要件への適合性を下記手法にて評価

➢ 製造者の安全管理体制

➢ 自動運転車の性能テスト

● シミュレーション

● 試験路での試験

● 実交通環境での試験

➢ 使用過程時のモニタリング

ODDフレームワーク

安全性の要件

製造者の安全管理体制

テスト手法

実交通環境での試験

試験路での試験

シミュレーション

システムの行動能力

シナリオ生成の手法

シナリオ

安全性評価

テスト環境の評価

モニタリング

15

国土交通省

シミュレーションの信頼性評価

● シミュレーションによる試験は、その結果の信頼性が確認された場合にのみ使用できる

● ガイドラインにおける信頼性評価フレームワークでは、実車試験の結果等を踏まえつつ、モデル及びシミュレーションの管理・解析・検証・妥当性確認を行い、信頼性を証明することとしている

シミュレーション信頼性評価フレームワーク

ADS審査

評価によるレビュー

信頼性評価

モデルおよびシミュレーションの管理

リリース管理

チームの経験

データの経緯

モデルおよびシミュレーションの解析

相関関係

仮定と制限

ツールチェーンの範囲/説明

影響度評価

ロジカルシナリオ

モデルおよびシミュレーションの検証

感度分析

計算の検証

コード検証

モデルおよびシミュレーションの妥当性確認

統合されたシステム

関連システム (例：センサー、車両およびその他のサブシステム)

評価者による試験

試験目標

ODD解析

システム解析

19

出典 :MLIT猶野様講演資料及び、ECE/TRANS/WP.29/2024/39 working document 16/04/2024 (GRVA) - Guidelines and recommendations for Automated Driving System safety requirements, assessments and test methods to inform regulatory development | UNECE

22

251124_Japan Mobility Show Nagoya 2025_3大学合同シンポジウム

神奈川工科大学
KANAGAWA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

DIVP

「実効性のある安全性評価フレームワーク Proj.」等の他省庁活動との関係(案)

【L4法規要件検討】へ提案し、自動運転車の安全性確保に関するガイドライン原案に貢献を企画中。

国際規則・枠組み：WP29、ISO21448（SOTIF）、ISO3450X 等
国内規則・枠組み：国交省「自動運転車の安全確保に関するガイドライン」等

自動運転（レベル4）の法規要件策定に関する有識者会議（L4 法規要件検討）

SBIR
（国交省）

自動運転の安全性を評価するためのフレームワークや自動運転パッケージの開発

一般道：L4MaaS・塩尻実証

デジタル全総
（経産省_情経課）

車両開発時に安全性評価の手法として有用であるニアミス情報の利活用エコシステムの構築

高速道：新東名100KM区間

RoAD to the L4
（経産省・国交省）

無人自動運転サービスの実現及び普及、社会受容性の醸成等

一般道：柏の葉実証

自動運転車の安全性評価基盤構築_DIVP/SAKURA/AD-URBAN（経産省_自動車課）

国内外の基準・
枠組み

実効性のある
標準化

実証実験の運営～
ベストプラクティス化

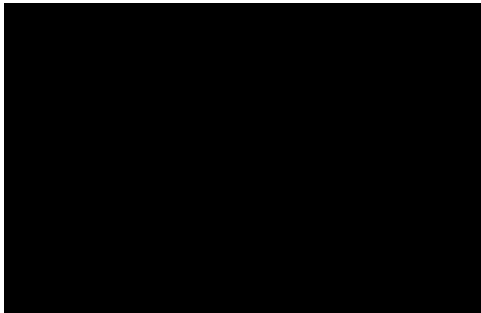
DIVP applications; infrastructure sensors' view

Created environmental models for Suruga Bay Numazu SA, Enshu Morimachi PA, and Hamamatsu IC; adjusted and ran infra. camera & LiDAR simulations.

Simulation locations on the New Tokyo-Nagoya Expressway

- Objective : Mainline traffic monitoring to assist automated vehicles in merging
- Installation position : Near the start of the merge lane
- Scope of coverage : Assumed 250m upstream of the main line

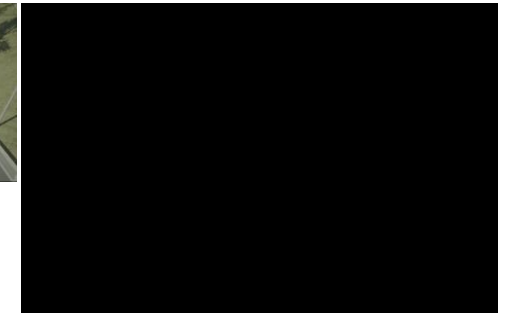
Suruga Bay Numazu SA



Enshu Morimachi PA



Hamamatsu IC

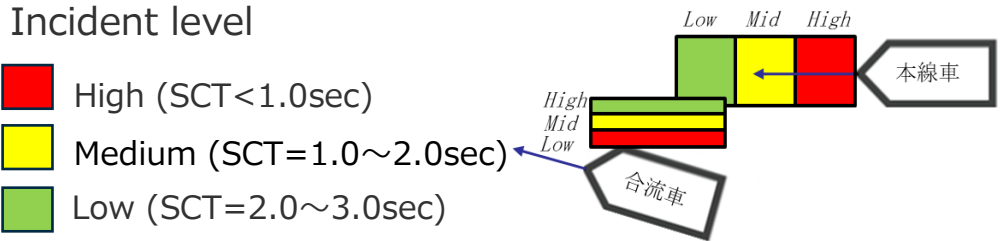


交通流ランダムリスクシナリオ実験でのニアミス発生頻度結果例

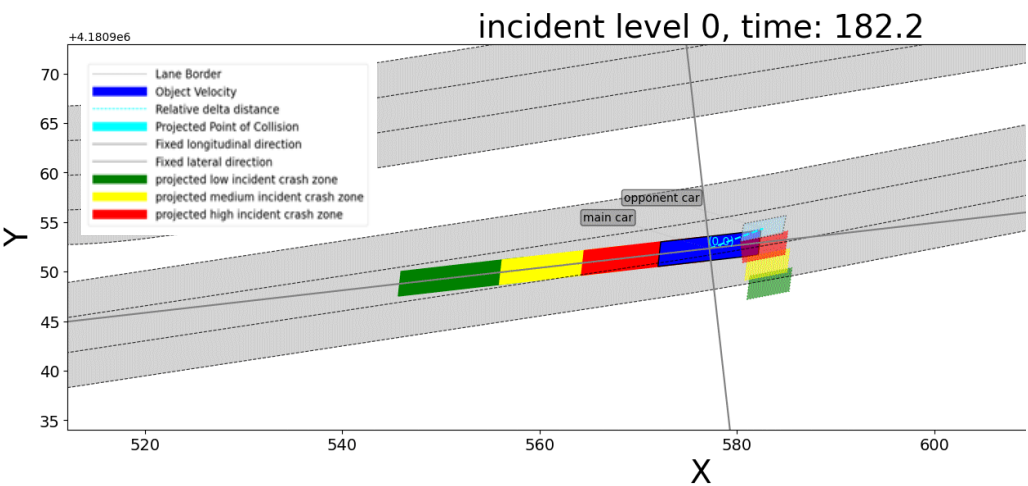
ODDによって決定されたリスクシナリオで定義された交通流に基づき、SCT指標を用いてADS車の運転行動におけるニアミスの発生頻度を評価した例

Safety Cushion Simulation results

Incident level



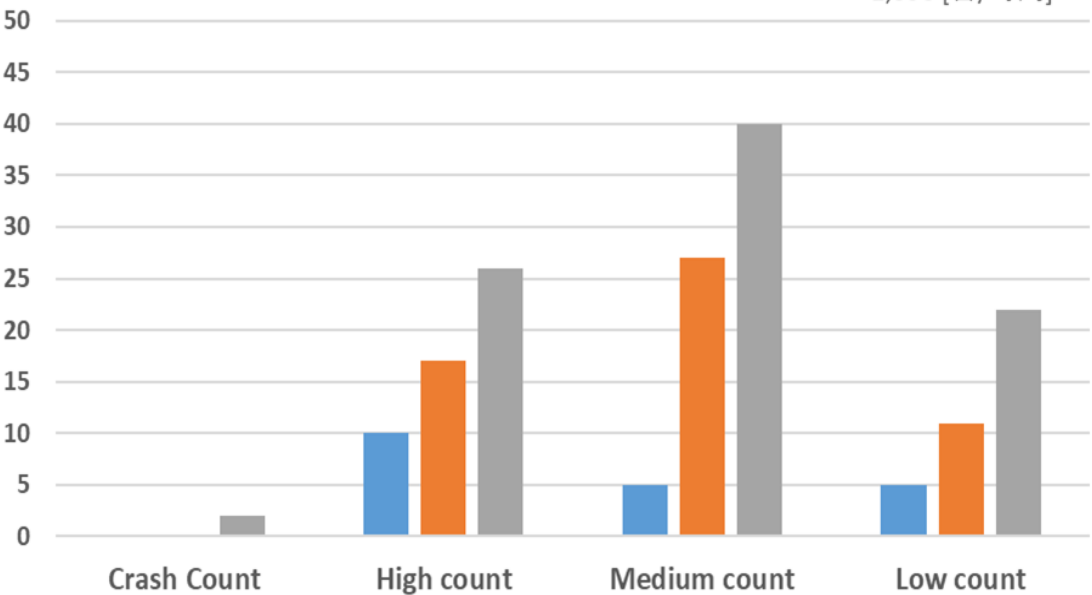
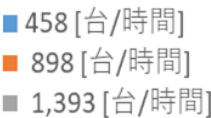
大ヒヤリの検出例



Increase in incidents due to increased traffic flow volume

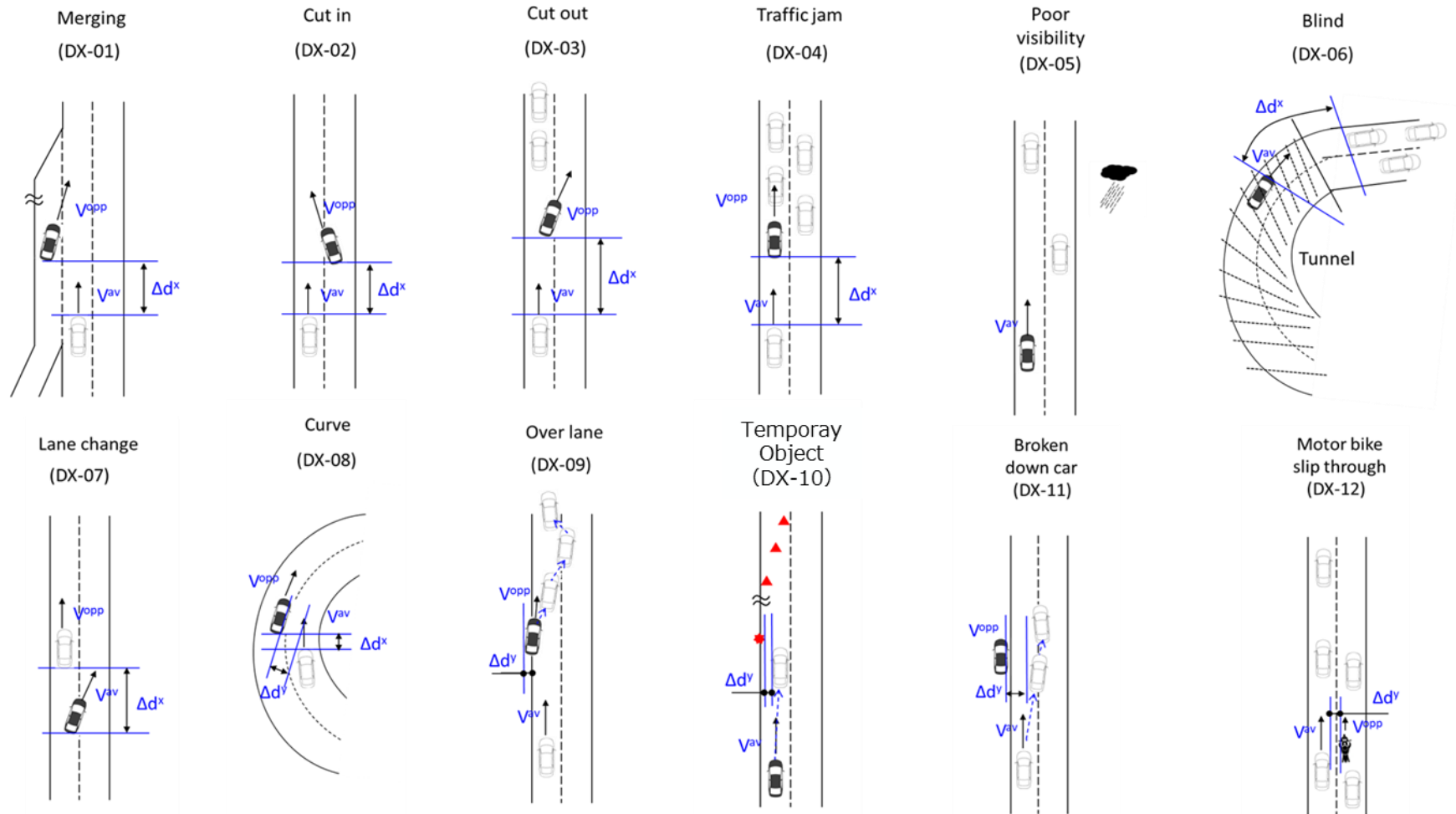
交通量をパラメータとしてニアミスの発生頻度をSCT指標で検出
→交通量の増加に伴い、ニアミスは確実に増加。

Vehicles/h



ニアミスデータに基づき高速道路におけるリスクシナリオを12に類型化

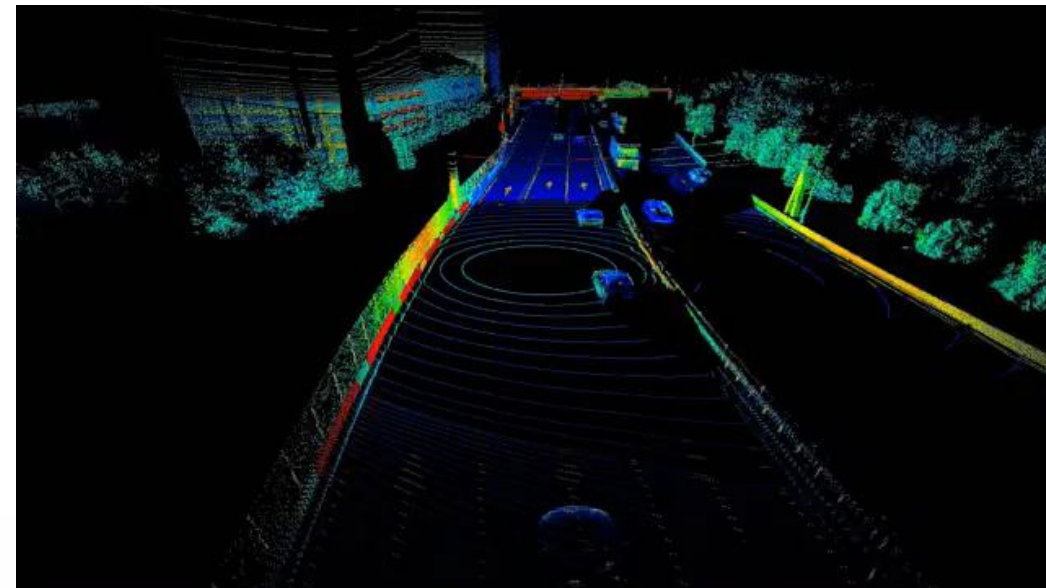
トラック運転手の経験・知識と物流トラック運転データに基づき、12類型に分類された高速道路リスクシナリオ。
この分類に基づき、ニアミスデータを分類し、軌跡やパラメータおよび周辺車両との関係性を定量的に抽出する。



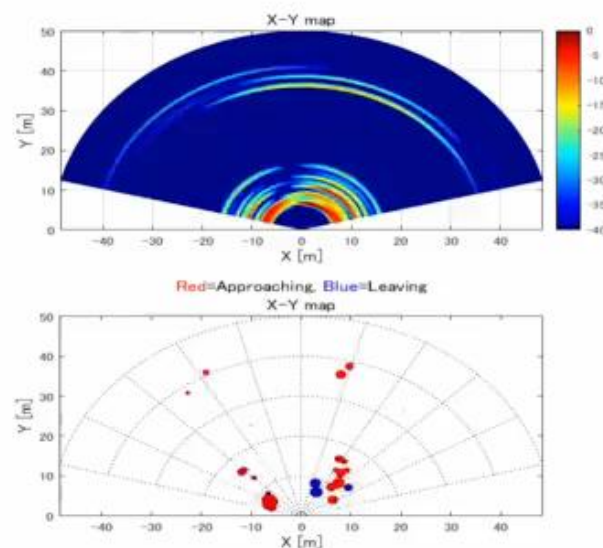
DIVP シミュレーション概要



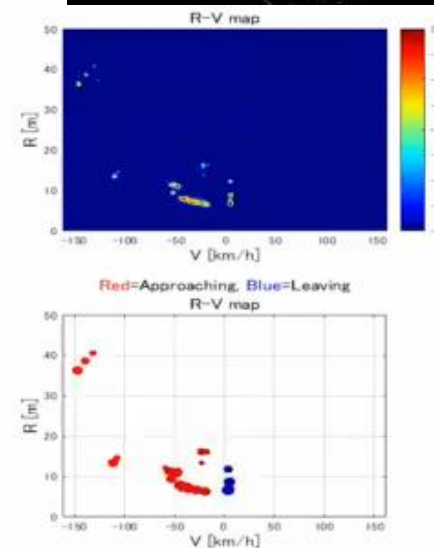
Camera



LiDAR



Radar



シミュレータによるCI高速道路と
お台場AD-FOTエリアの
仮想センサ出力 例

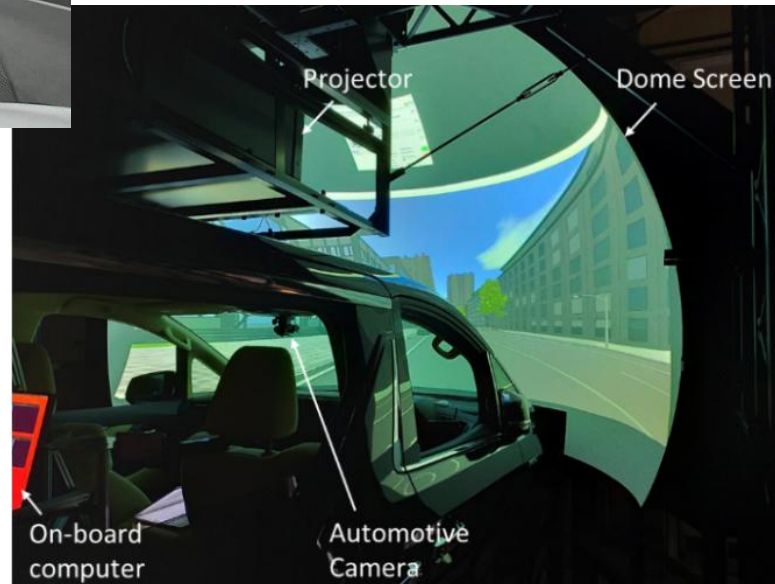
Cut-in reproduction using DIVP simulator & dome screen

Simultaneous evaluation of camera recognition and driver perception using DIVP real images and KAIT spherical screen.

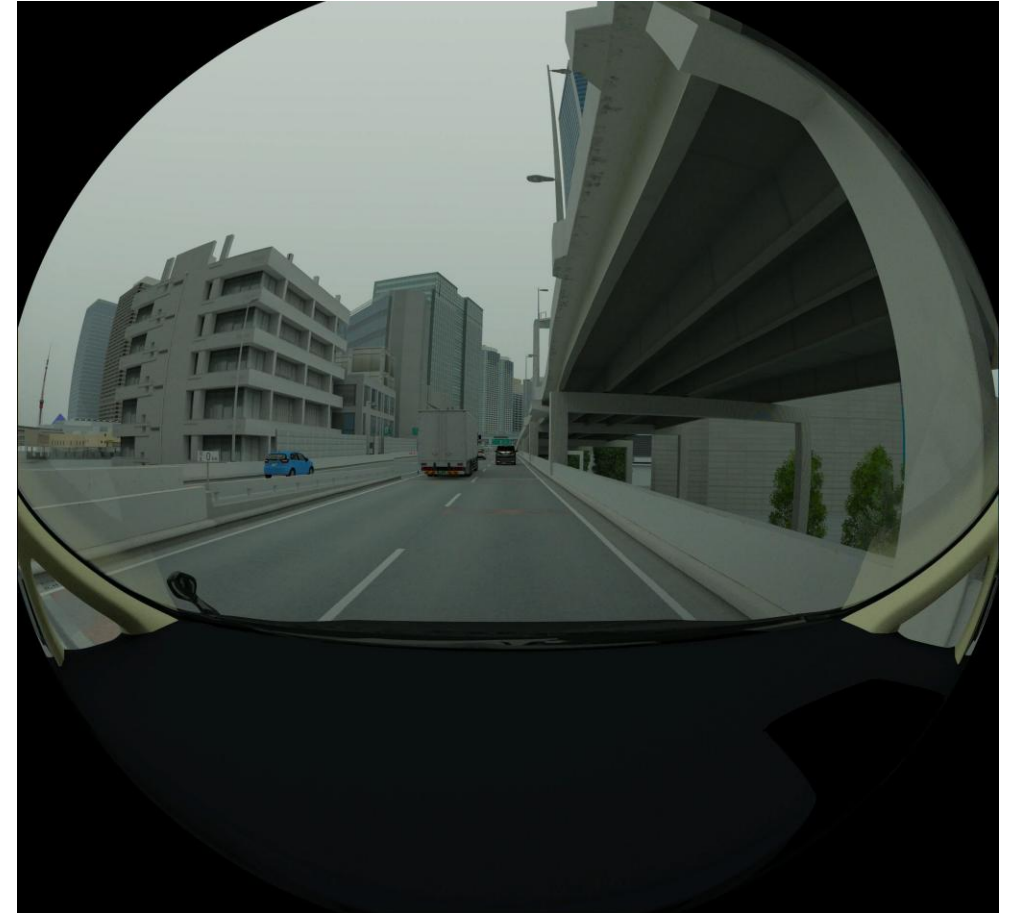


Cut-in scene
on a public road

Camera HIL;
KAIT spherical screen facility



DIVP simulation Video on spherical Screen



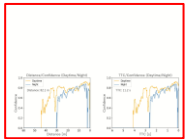
Deceleration control can be designed for cut-ins that do not cause anxiety to humans, such as ADAS/ADS.

DIVPによる動的な事故再現（例）

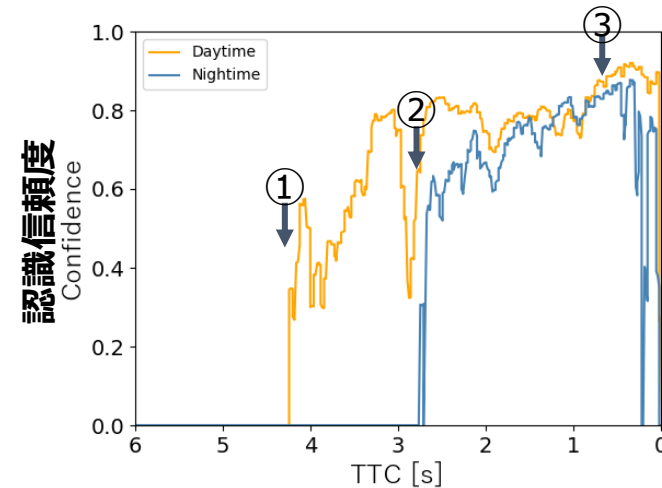
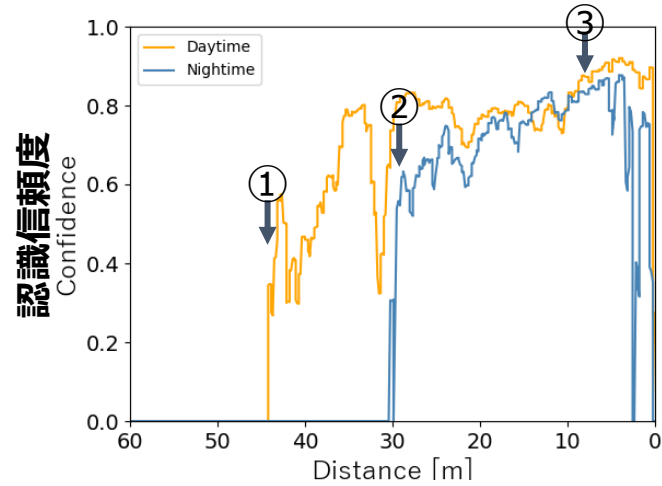
静的事故情報から動的な仮想空間での事故再現がDIVPシミュレータで可能

→センサの認識位置から、回避可能性（ジオメトリリスク）を評価可能、
① 距離: 44m, TTC: 4.1s

歩行者からの
相対距離



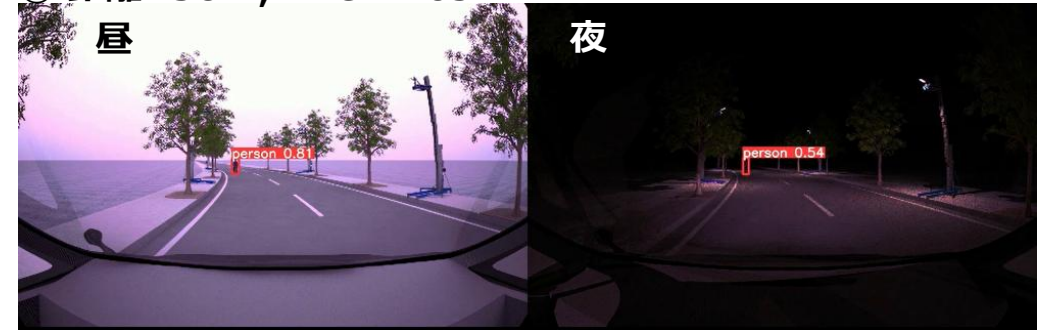
歩行者からの
TTC
(Time to Collision)



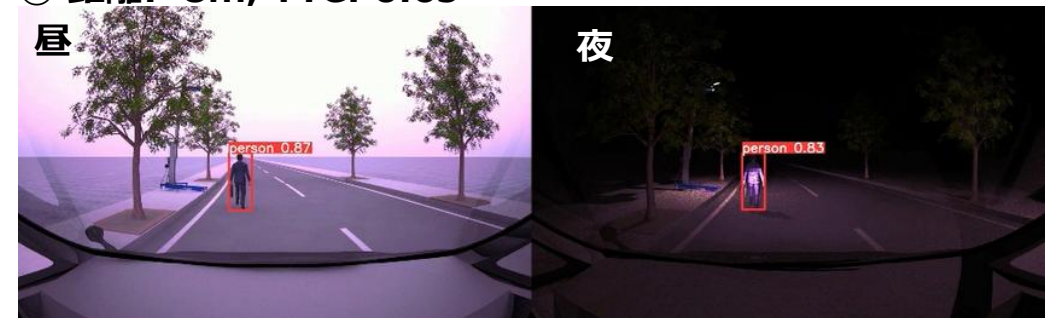
① 距離: 44m, TTC: 4.1s



② 距離: 30m, TTC: 2.6s

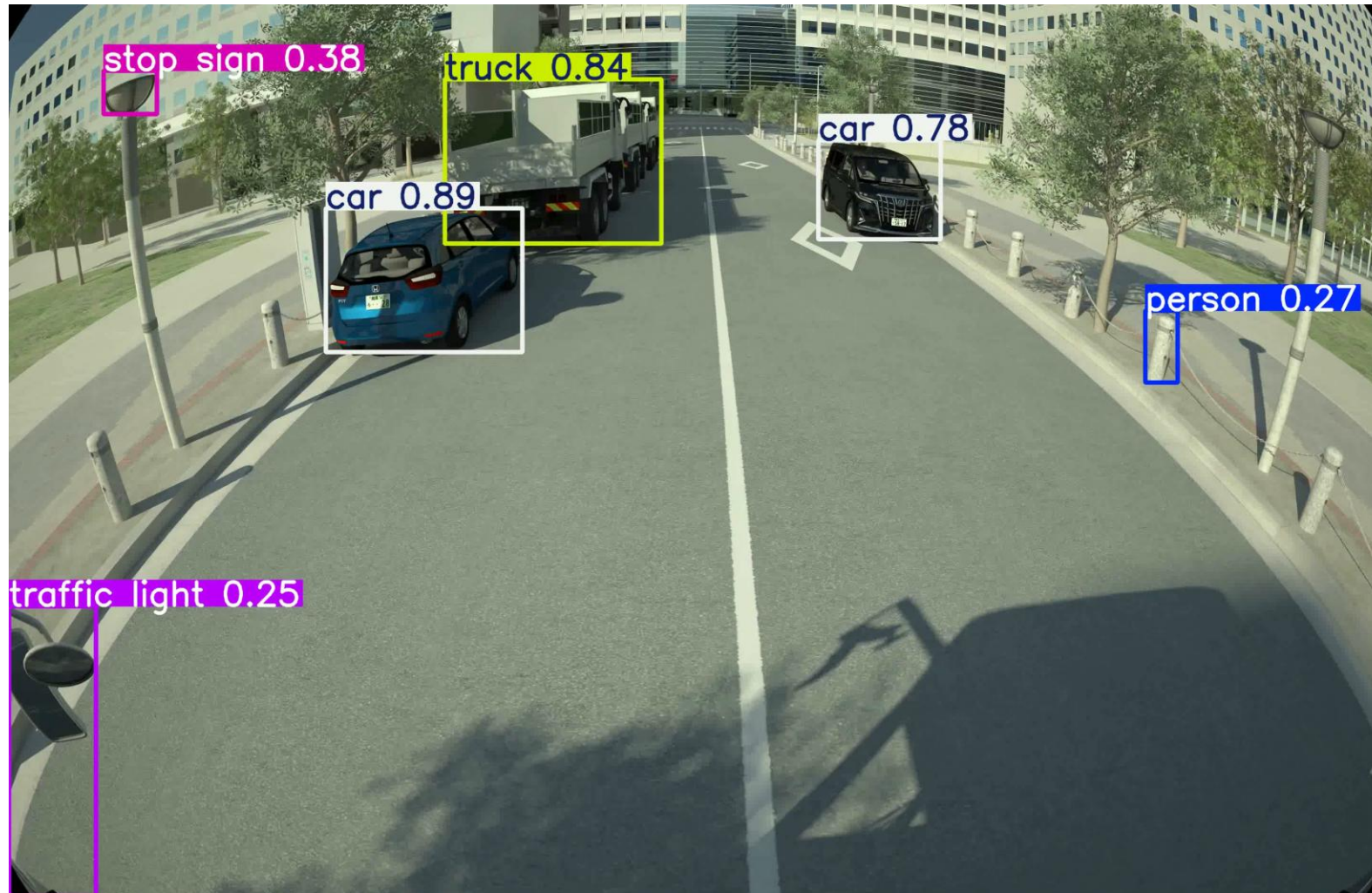


③ 距離: 8m, TTC: 0.6s



Hazardous use case (2) : Pedestrians and children darting out

A camera view mounted high on the bus is effective and allows early recognition of children flying out. However, there are cases where children and roadside poles are misidentified.



Using “Yolo v8”
as a recognition
algorithm