

データと知能が紡ぐ未来社会

# 自動運転における人間とAIの協調

ESD21新春イベント

武田一哉

名古屋大学 未来社会創造機構/情報学研究科

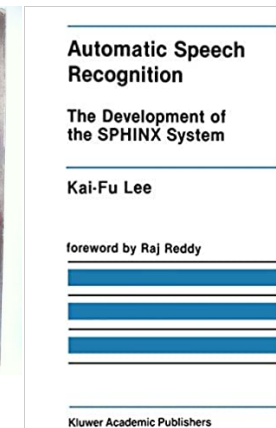
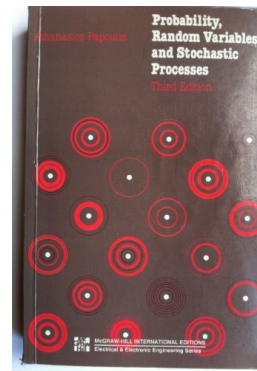
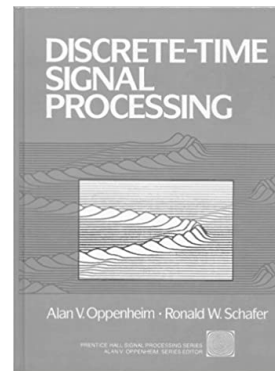
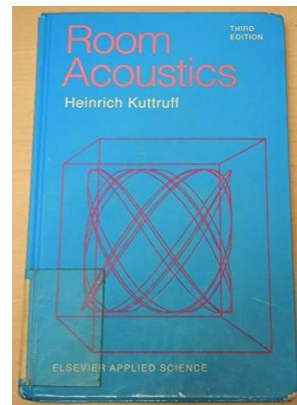
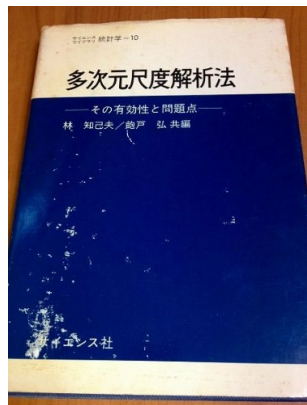
2026.2.2

# 講演者略歴 武田一哉

- 1979 名古屋市立向陽高校卒業
- 1985 名古屋大学工学部（電気電子）修士了（池谷研）
- 1985 KDD（国際電信電話 現KDDI）入社
- 1986 ATR（国際電気通信基礎技術研究所）出向
  - 音声データベース・音声合成システムの研究開発
- 1990 KDD研究所復職
  - 音声認識・音声対話システムの研究開発
- 1995 名古屋大学・工学部・助教授
  - 音声・音響情報処理の教育研究
- 2003 名古屋大学・情報科学研究科・教授
  - 行動信号処理の教育研究
- 2013 名古屋大学・未来社会創造機構／情報科学研究科・教授
  - （兼）博士課程リーディングプログラム「実世界データ循環学」 コーディネーター（2013-）
  - （兼）株式会社 ティアフォー 取締役 2015-2025（2016-2023 まで代表取締役）
  - （兼）数理データ科学教育研究センター・センター長（2019-2024）
  - （兼）（一社）「人間機械協奏技術コンソーシアム（JST OPERA事業後継）」代表理事 2020年～
  - （兼）名古屋大学副総長（情報システム・情報系戦略・スタートアップ担当）、情報連携推進本部長 2020～2024年度
  - （兼）名古屋大学総長特別補佐（国際卓越担当）、情報連携推進本部長 2025年度～
  - （兼）株式会社Central Japan Innovation Capital（東海国立大学ベンチャーキャピタル）代表取締役 2024年～
  - （兼）東海国立大学機構スタートアップ統括室 アドバイザー 2025年～



- ・ 信号処理理論，音声やセンサ信号の生成モデル，および機械学習に立脚し，大規模なデータから人間の行動のような複雑かつ知的な現象を理解するための研究分野
- ・ 信号処理（複素関数論、確率過程）
- ・ 生成モデル（運動と波動）
- ・ AI・大規模データ（統計的推定、機械学習）



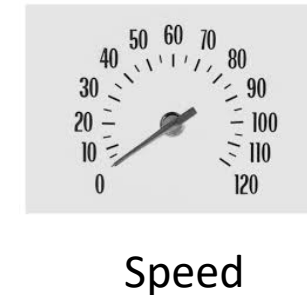
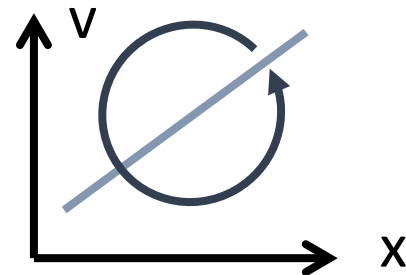
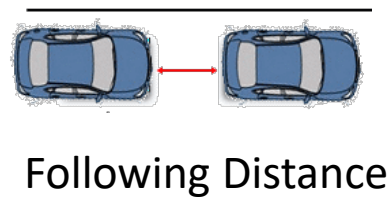


BF Skinner

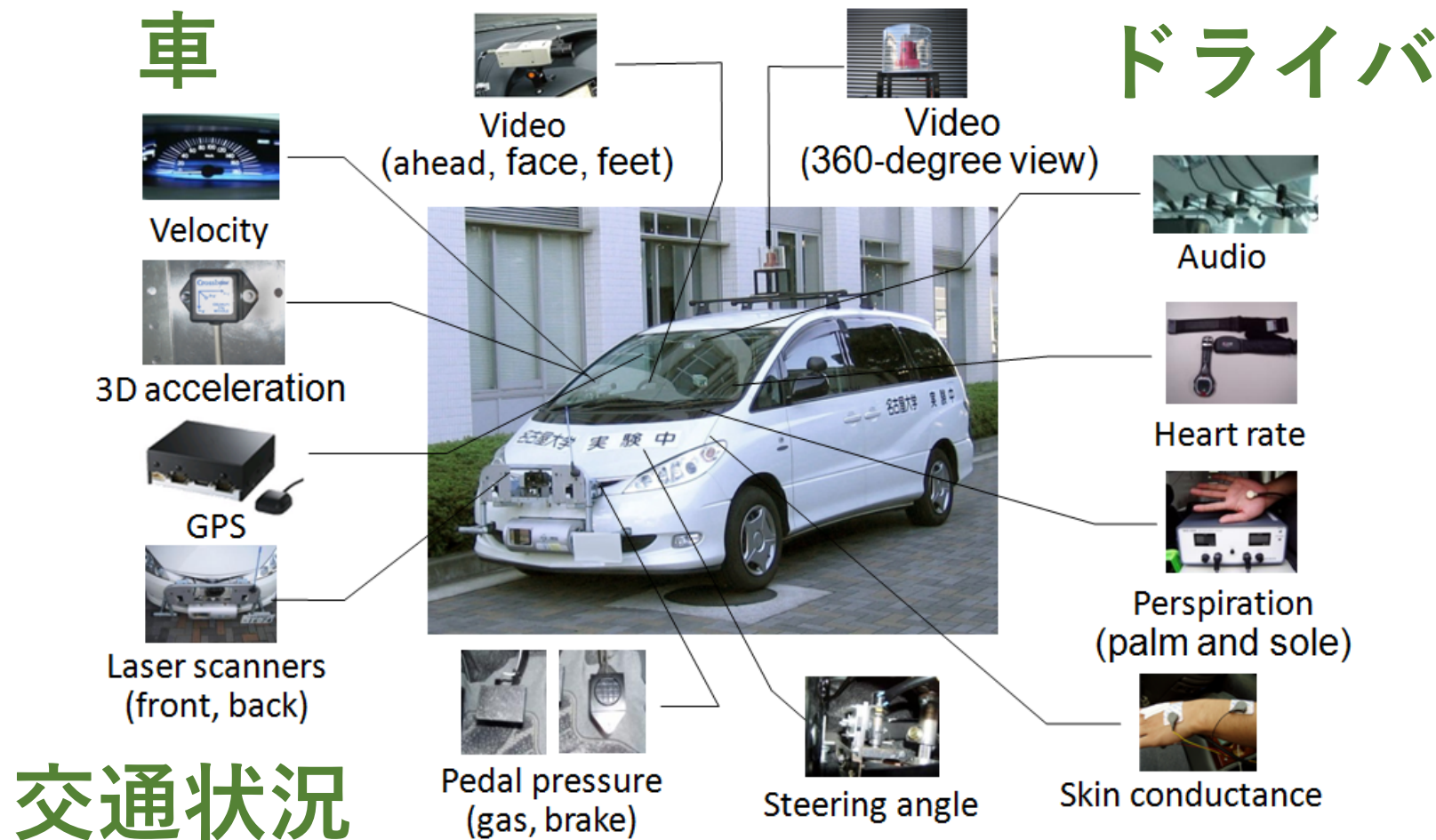


行動を入力に対応する出力と考え「観察を計測に変えた」

# 自動車運転の数理モデル



- 線形回帰:  $v = ax + b$
- ばねモデル:  $m\ddot{x} = -k(x - x_0)$





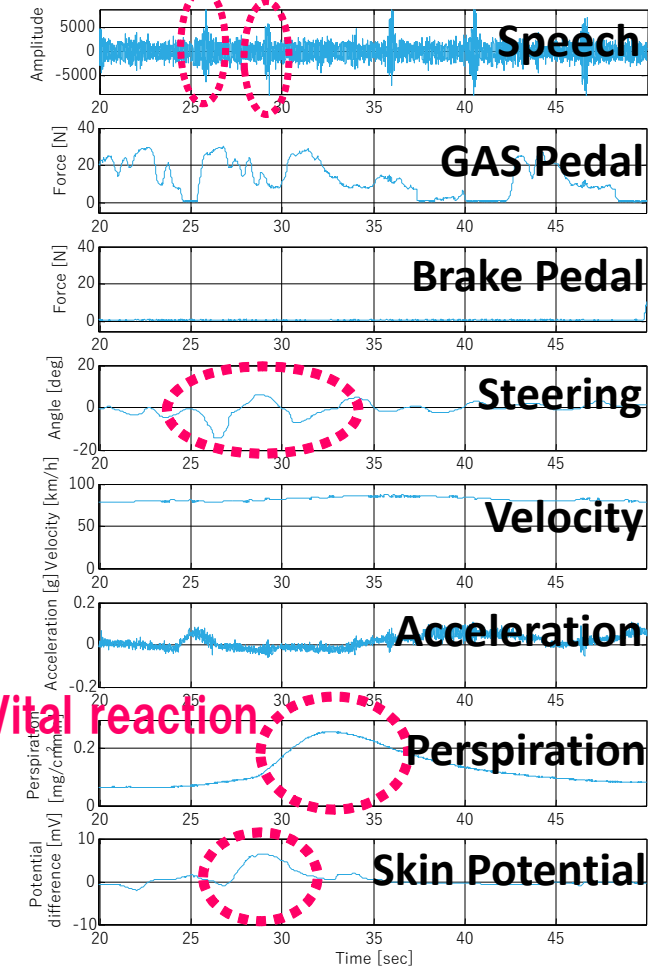
# 運転行動信号群



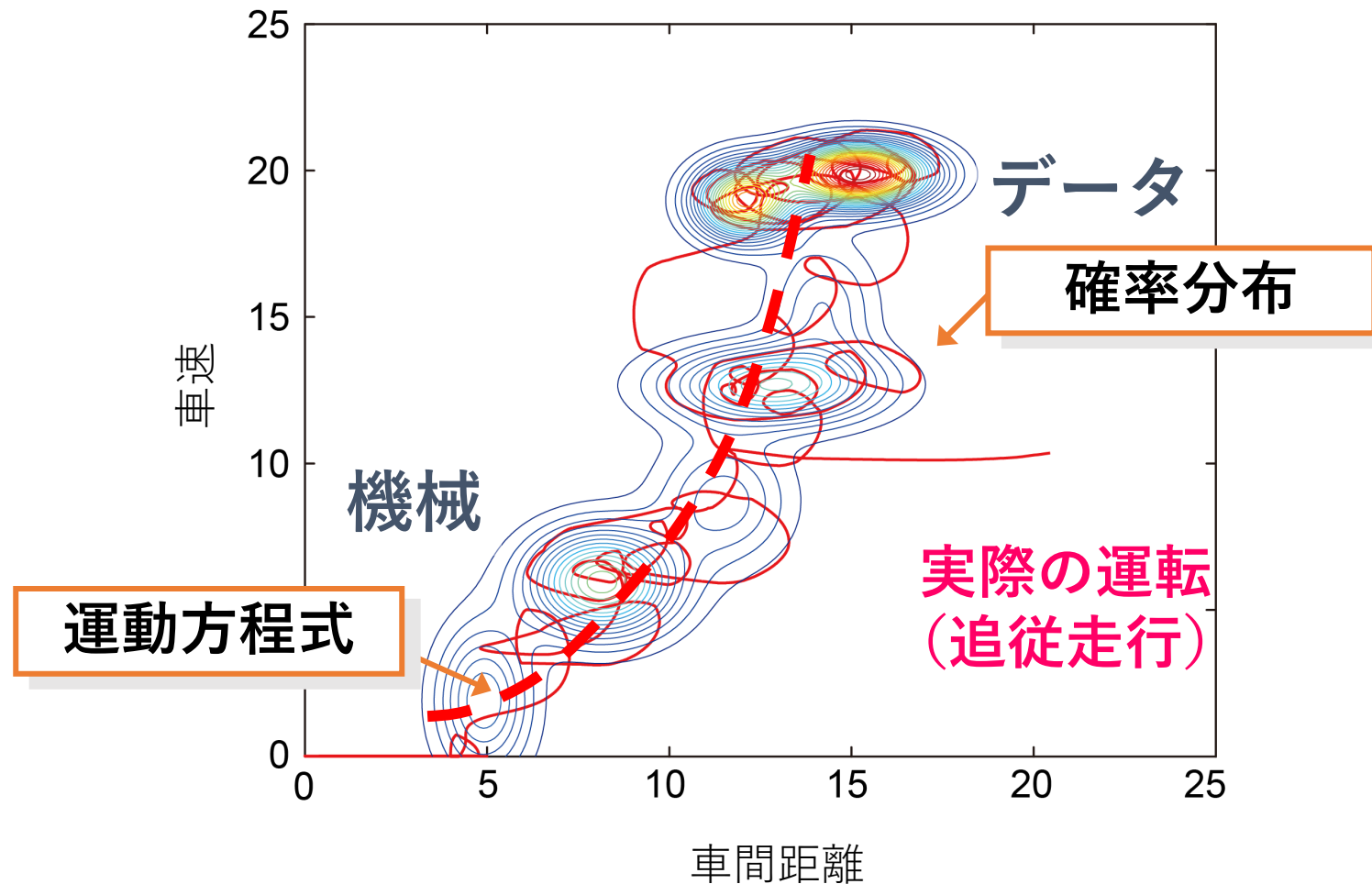
## Tags

HWY、NO\_TSK、DRZ、  
LN\_\*、POS\_LN\_\*、LOS\_AB、  
LN\_ENDS\_IN、CAR\_FOLLOW、  
FACE\_POS、HEAD\_OTHER

## Bump

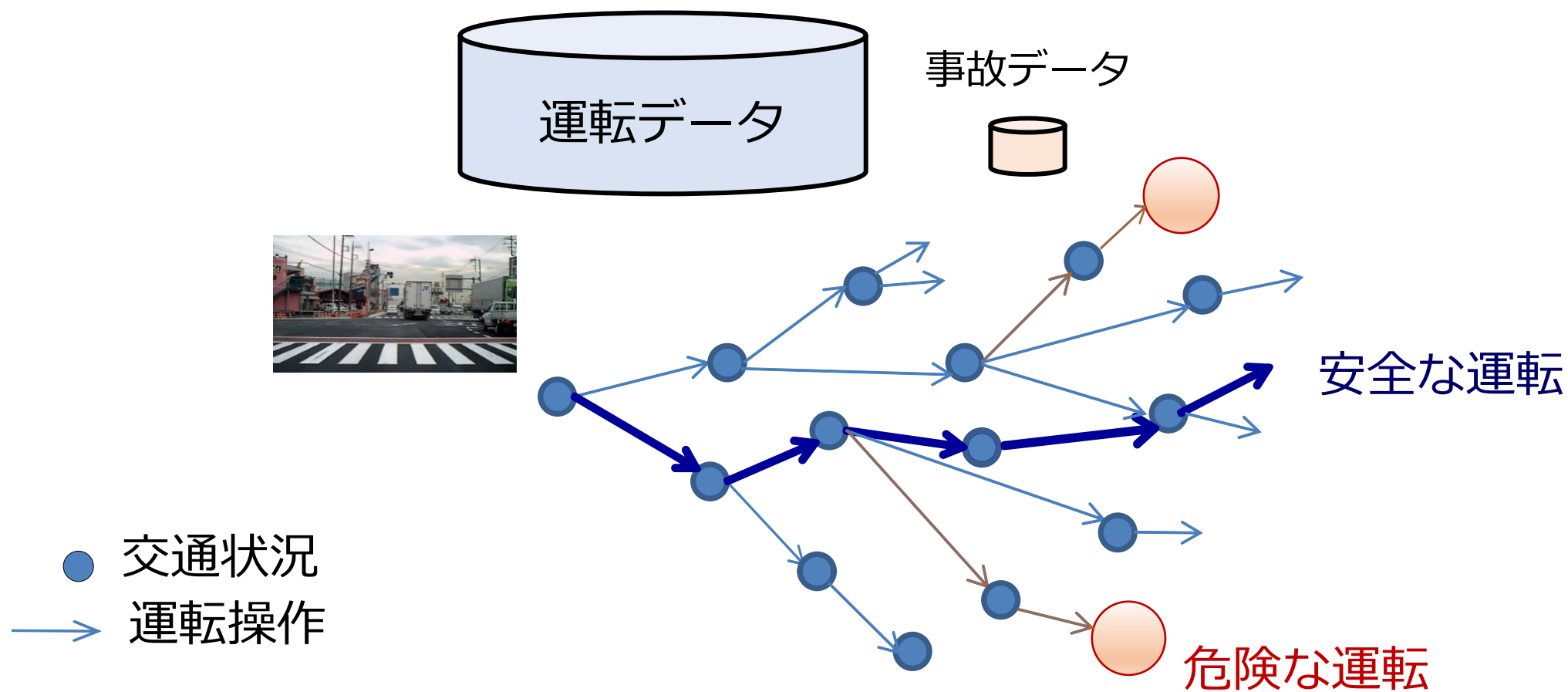


# データを知識として活用する（データ駆動型科学）

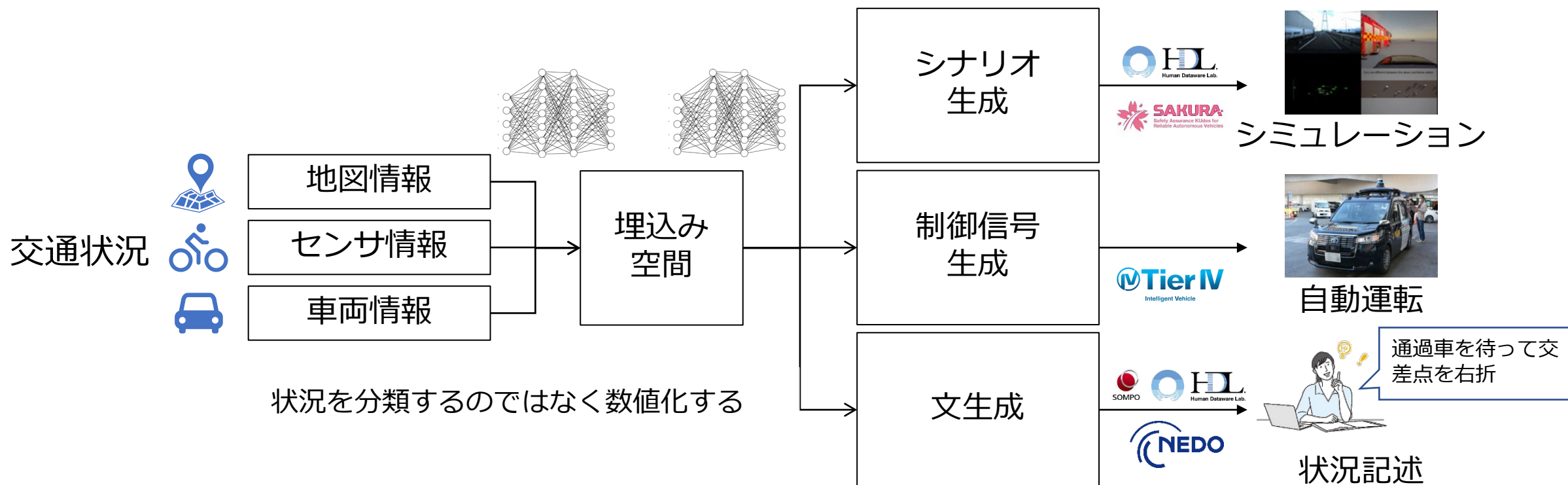




# 現実世界の被覆（多様な交通状況の分類）



# 深層学習を用いた運転のモデル（運転知能AI）



## 学習型自動運転の現在位置

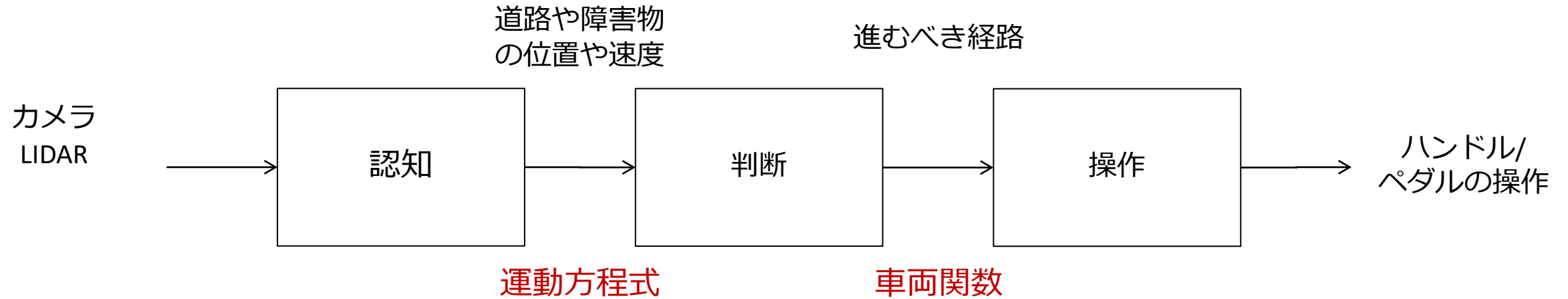


# 初期の E2E (End to End) 自動運転の研究例

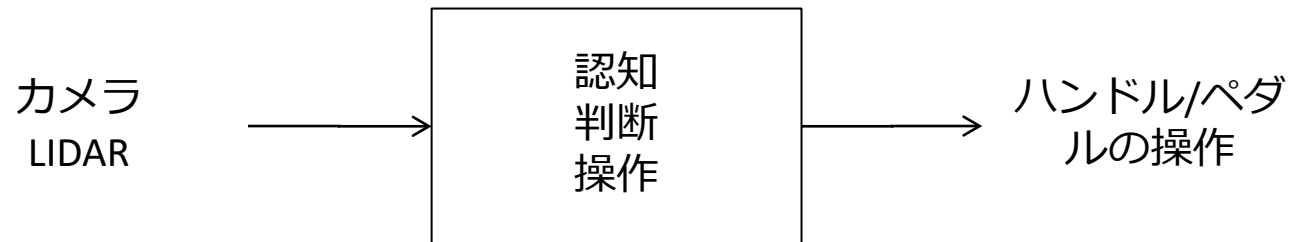


Bojarsky, Mariusz et al., End to End Learning for Self-Driving Cars, arXiv:1604.07316, 2016

## • モジュール型（工程間の誤差が累積）



## • End-to-end 型（理解は困難だが学習による全体最適化が可能）



## • A. 安全性 (Safety)

- 運転の最優先目標、衝突回避を重視。(ISO 26262やSOTIFなどの既存の安全規格は報酬関数に直接適用可能な安全性の定義は明示せず。)
- 直接的アプローチ: 衝突が発生した場合に負の報酬、衝突の速度を考慮する方法、衝突の種類(歩行者、車両、静止障害物)に応じて異なるペナルティを割り当てる方法
- 状況的アプローチ: 衝突リスクレベルに基づく報酬の割り当て。最近接車両や障害物との距離、衝突時間(TTC)

## • B. 速度 (Progress)

- 走行距離や速度、目標速度からの逸脱を罰するアプローチなど。気象条件等未対応。
- 静止した障害物が進路を遮る単純な状況下、長時間待機する累積ペナルティが衝突ペナルティを上回るなどの課題。

## • C. 快適性 (Comfort)

- 重要な要素だが、考慮する研究は少ない
- 加減速やジャーク(加速度の変化率)、急ブレーキ、ステアリングのスムーズさ(高いステアリング角度やカウンターステアリングのペナルティ)など。

## • D. 交通ルール遵守 (Traffic rules conformance)

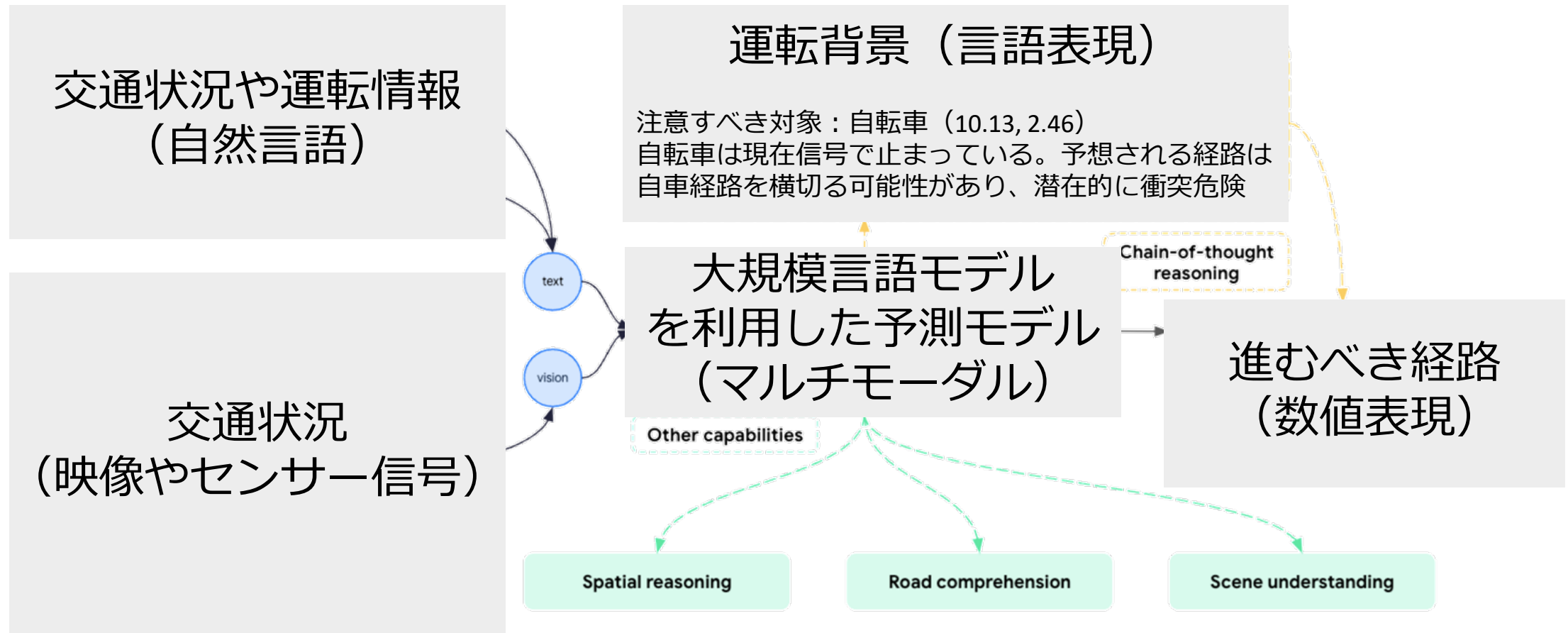
- 安全とルール順守の分離
- 車線維持の報酬、速度超過のペナルティ、車間距離ペナルティ、優先通行権の遵守など、より文脈に即したアプローチが可能。



# 業界動向（モジュラー vs. E2E）

#	企業（本拠）	サービス段階	End-to-End AI 採用	補足メモ
1	Waymo（米）	本格商用：フェニックス、サンフランシスコ等で完全無人運行中	部分的 - EMMA <sup>1)</sup> など一部モデルで E2E 学習を研究導入	2025 年 7 月にティーン向けアカウントも開始
2	Cruise（米）	2025 年春にフェニックスで有人再開、無人再開を段階的準備	未採用（モジュラー中心）	同社スタックは従来型の認識-予測-計画分離型
3	Zoox（米）	社員・招待客向け無人試乗をシアトル等で実施、商用目前	未採用（モジュラー）	公開資料で perception→prediction→planning の 3 段階構成を明示
4	Motional（米/韓）	IONIQ 5 Robotaxi でラスベガス有料パイロット	未採用（モジュラー）	2025 年 1 月に高速域自動走行テスト公開
5	Tesla（米）	オースティンで限定ロボタクシー・パイロット運行開始	採用（コア技術）	FSD <sup>2)</sup> v12 以降カメラ専用 End-to-End NN。限定 20 台・安全監視員同乗
6	Baidu Apollo Go（中）	武漢・重慶等 15 都市で完全無人の有料サービス	部分的 - ADFM L4 <sup>3)</sup> 大規模モデルを統合	Uber との海外展開も発表（Asia & ME）
7	AutoX（中）	深圳で 65 平方マイルの完全無人運行	部分的 - “AI Driver” と称する統合 NN 研究	Alibaba 出資、他都市へ拡大中
8	Pony.ai（中/米）	2025 年中に Gen-7 ロボタクシー 1,000 台量産へ	部分的（研究段階）	コスト 70% 削減し大量展開を目指す
9	WeRide（中）	広州中心部で 24 時間有料ネットワーク運行	未採用（モジュラー）	ロボバスも商用化、LiDAR 多重構成
10	DiDi Autonomous（中）	GAC Aion と量産型 L4 車を 2025 年末投入予定	部分的（大型 LLM/LLV 活用検証）	世界初の All-solid-state LiDAR 量産車
11	Wayve（英）	ロンドン等で安全員同乗データ収集、北米でも一般化実証	採用（コア技術）	マップレス・車種非依存の純 End-to-End “AI Driver”
12	Mobileye MoovitAV（イスラエル）	ドイツ/UAE でフェーズド・パイロット、Lyft 提携で 2026 商用化	未採用（モジュラー）	EyeQ™/REM™ を核にセンサー融合パイプライン

# EMMA: End-to-end Multimodal Model for Autonomous driving



- Geminiを基盤としたE2Eマルチモーダル自動運転モデル
- カメラセンサーデータから、走行経路や知覚オブジェクト、道路グラフといった多様な運転関連の情報をテキストで生成
- 複数の運転タスクを統一された言語空間で処理する汎用モデルとしての可能性。

## • 特徴

- マルチモーダルLLMであるGemini 1.0 Nano-1を基盤に利用し、Geminiの「世界知識」と推論能力を活用。
- カメラセンサーデータ（画像や動画）と、ナビゲーション指示や自己車両の状態といった非センサー入力は自然言語テキストとして表現。走行経路、知覚オブジェクト、道路グラフといった多様な情報も、タスク固有のプロンプトを用いてテキストで生成。**運転タスクを言語空間で処理。**

## • 学習プロセス:

- ファインチューニング: 運転ログ（データ）を用いて、走行経路生成、3D物体検出、道路グラフ推定、シーン理解など、さまざまな運転タスク向けにファインチューニング。
- 運転タスクは「視覚的質問応答」問題として定式化、タスク固有のプロンプト（例：「3Dですべてのオブジェクトを検出して下さい」）も活用。
- 自己車両の将来位置のみを教師として自己教師あり学習。ラベル付けは不要。
- 推論能力と説明可能性を高めるため、走行経路を予測する前に、シーン記述、重要オブジェクト、行動、メタ運転といった意思決定の根拠（Rationale）を言語で記述可能。
- 複数の運転タスク（プランニング、物体検出、道路グラフ推定など）を共同学習し、高い性能を発揮

## 安全性の検証

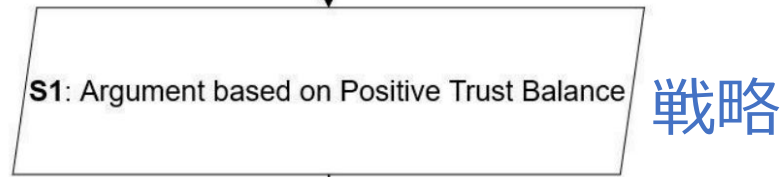
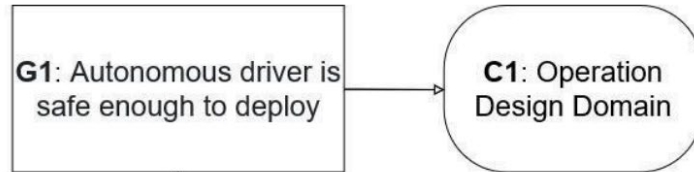
# 安全に関する標準

観点 / Standard	ISO 26262 (機能安全)	ISO 21448 SOTIF (意図した機能の安全)	UL 4600 (Safety Case)	IEEE P7009 (Fail-Safe 等級)
主眼	故障 <b>Safety</b> HW/SW 故障時の暴走を防ぐ	性能限界 <b>Safety</b> 誤認識・ 不完全判断 → 危険を防ぐ	総合論証「本製品は十分に 安全」 - 論証 + 証拠	フェイルセーフ設計故障/ 誤作動時に安全状態へ遷移
適用範囲	量産車 E/E システム全般	ADAS・自動運転の“正常機 能”	レベル4/5 自律製品（車以 外も）	自律・半自律システム全領 域
形式	国際規格 (ISO) 「要求+プ ロセス」	国際規格 (ISO) 「要求+ガ イド」	UL 規格「Safety Case 構 造」	IEEE 標準「設計 & 試験ガ イド」
核となる概念	ASIL、V-モデル、FMEDA	シナリオカバレッジ、未知 リスク探索	GSN Safety Case、継続的 保証	Fail-Safe グレード Weak-A~Strong-E
安全ターゲット	故障率 (SPFM/LFM)、診 断カバー率	誤認シナリオをALARPへ 低減	安全主張 論証木	安全状態到達時間・冗長度 を数値化
実務での順序	① H/W 故障対策をここで 設計	② 認識限界をここで洗い出 す	③ ①②の成果物を束ねて Safety Case	④ Fail-Safe 設計を定量認 証
関係性	—	ISO 26262を補完（故障は 対象外）	ISO 26262 + SOTIF の証拠 を包含	ISO 26262/SOTIF/UL460 0 に示す“数値的 Fail-Safe 性”の証拠源
代表的アウトプット	安全要求仕様書、 ASIL D ECU	シナリオライブラリ、 OEDR KPI	GSN+エビデンス群	Fail-Safe 等級試験報告書
利用フェーズ	設計～量産まで	設計・シナリオ検証	設計後／OTA 更新時	設計・試験・認証

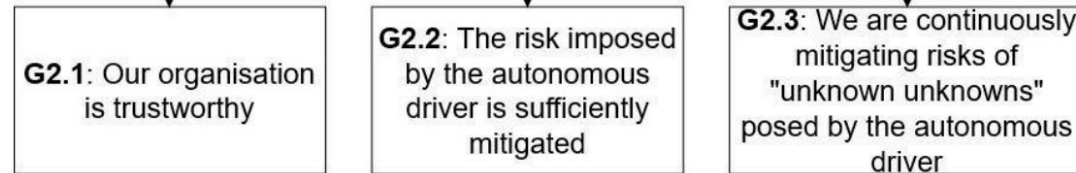
ASIL: Analysis of Safety and Integrity Level (SEC), FMEDA: Failure Modes Effects & Diagnostic Analysis, GSN: Goal Structure Network  
 SPFM: Single-Point Fault Metric/LFM: Latent Fault Metric, ALARP: As Low As Reasonably Practicable  
 OEDR: Object and Event Detection and Response, SOTIF: Safety Of the Intended Functionality

# Goal Structured Network (論証ツリー) of UL4600

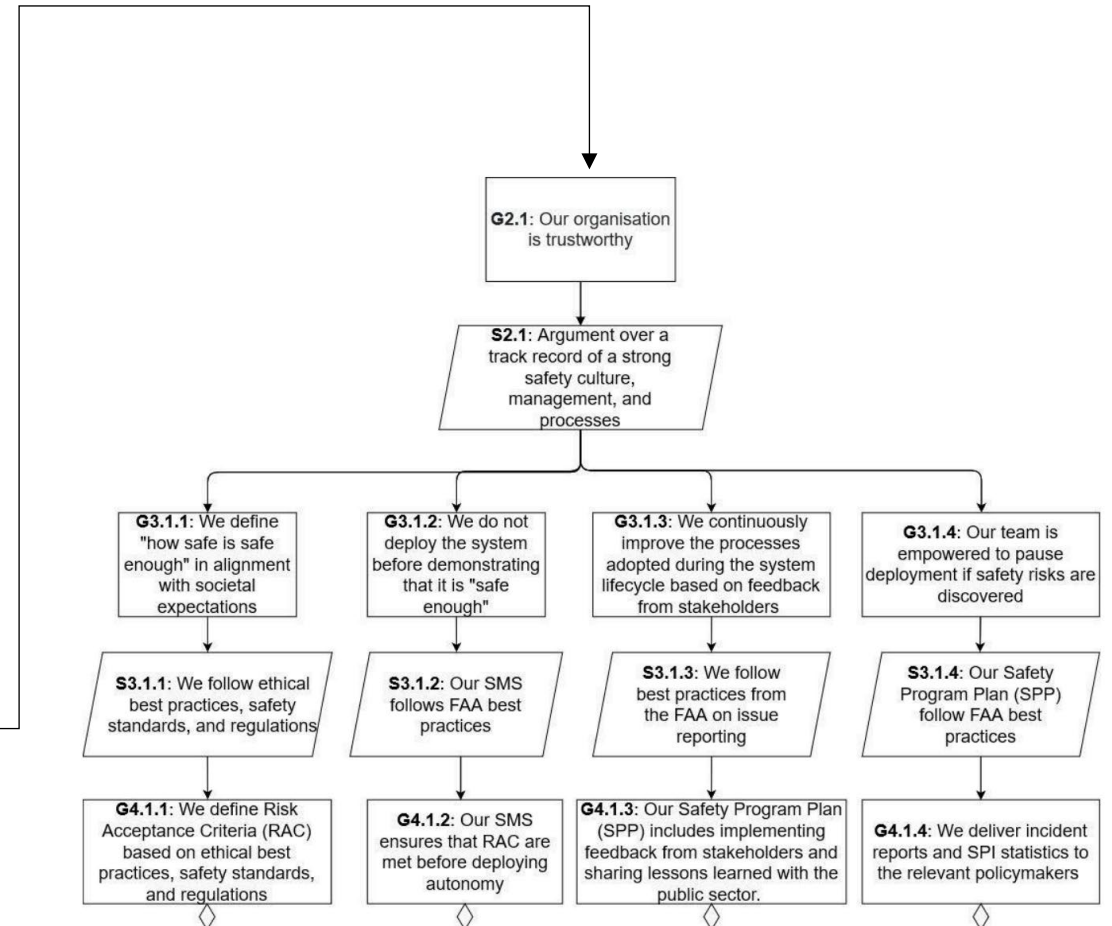
ゴール



戦略



サブゴール





# 自動運転の責任分担

Responsible（実行責任）, Accountable（最終責任）, Consulted（協議先）, Informed（周知先）

企業	考え方	責任分担
Waymo	<b>Safety Case</b> 主義：UL 4600 互換の論証ツリーで各レイヤの証拠を紐付け。学習モデルはフォールトコンテインメント（誤りの伝播抑止）領域と定義。	<b>開発＝運行の一体</b> • Safety Case と受け入れ基準（12項目）、A/R を自社で完結。
Tesla	NN 一本化でも <b>Navigation Guardrails</b> （レーン逸脱・前方安全距離）を別 SoC で監視。ISO 26262 未認証だが一部部品は ASIL-D（NVIDIA HW）	<b>開発・製造＝Tesla、運行＝ユーザー（L2）</b> • 監督前提と配信/利用ガードでリスクを制御。
Baidu Apollo ADFM	モジュラーに ASIL-D 設計 → 統合微調整。ASIL 設計書を TÜV Rheinland で審査取得（SW+HW）	<b>開発＝Baidu、運行＝Baidu/都市事業者。</b> • 冗長知覚＋RSS＋運行認証（上路試点）の組合せで責任を分担
NVIDIA DRIVE	SoC と SDK を <b>IEC 61508 &amp; ISO 26262 ASIL-D</b> 前提で提供し、顧客が上位 SOTIF/UL4600 を構築できるよう Safety Workbook 付属	<b>安全プラットフォームを提供</b> • 第三者認証/証拠で顧客の Safety Case 構築を支援するが、運行責任は顧客側。

- A/R Accountable and Responsible、SoC: System on a Chip（システムの機能を単体にまとめた集積回路）,
- ASIL: Analysis of Safety and Integrity Level（安全性の分析）, TÜV Rheinland: 独認証機関, IEC 61508

# 自動運転AIをめぐる社会制度

- 米国における自動運転タクシー（ロボタクシー）の営業運行は、連邦法と州法が補完的に役割を担う。特に州政府の裁量が大きい。
- 1. 連邦レベル：ガイドライン主導で義務規制は限定的
  - NHTSA（国家道路交通安全局）：NHTSAは主に「自動車そのものの安全基準（Federal Motor Vehicle Safety Standards, FMVSS）」を所管。現時点では、自動運転専用車両向けのFMVSSは未整備だが、一部適用免除（exemption）を認める権限。メーカーは「一部適用免除」により車両を運行。
    - Serve the public interest, Fall under economic hardship, innovation, low-emissions development, or ensure safety equivalency;
  - NHTSAは法的拘束力のある許認可ではなく、「自動運転車に関するガイダンス」を複数回発行（例: AV 4.0, 2020年）。安全性やデータ共有に関する自主的なガイドラインが中心で、営業許可を与えるのは州政府の権限。
- 2. 州レベル：営業運行に対する規制権限の所在
  - 州政府の規制権限：自動運転車の「登録」「公道走行の許可」「営業ライセンス」「保険要件」などは、各州政府が独自に制度設計。
  - 営業運行を合法化している主な州：カリフォルニア州（Waymo、Cruiseなど）、アリゾナ州（Waymoが最も早く営業開始）、テキサス州（Aurora、Waymoが準備中）

- 国家レベルの枠組みを土台に、都市ごとの細かな運用ルール
- 1. 国家の基本枠組み：市場アクセス＋運用内容の決定
  - 製品と公道許可をセットで試行：**量産前提の自動運転車を対象に**、どの車種をどの条件で市場に入れ、公道を走らせるかを定める通知。量産・インフラ整備・クラウド連携・商用モデル検証を段階的に進める
  - 企業・車種の選定→ 指定区域・時間・条件を付した限定運用→ 実績に応じた範囲拡大・商用化可否の判断。
- 2. 都市（地方）ルール：区域・安全体制・許認可
  - 北京市：安全評価を通過した無人タクシーの有償運行を許可。公道試行・商用申請の手順を整備
  - 深圳市：いち早く条例レベルで制度化。道路テスト／試験運用／登録／使用管理／インフラ／サイバー・データ保護／違反・事故処理／法的責任まで一気通貫で規定。
    - 区域・時間・気象等、運行設計領域（ODD）の順守、遠隔監視・介入体制の常設、車両登録・保険・安全評価の事前確認、運行データの定期提出、インシデント時の報告・是正計画
- 3. データ・サイバーの横断規制（ロボタク運用に必須）
  - 個人情報や「重要データ」を含む車載データの収集・保存・利用・越境移転を規律。事業者の責務・安全管理・開示を明確化。
  - 都市条例にネットワーク安全・データ保護を置き、違反時の行政処分・法的責任まで規定（深圳）。

- 【2020年】レベル3解禁と道路交通法改正の施行
  - 2020年4月1日、自動運転レベル3（条件付き自動運転）を解禁する改正道路交通法が施行。
    - 自動運転中は、一定の条件下でドライバーが前方を注視していなくてもよいと規定。
    - システムからの「介入要請」時には、ドライバーが即座に運転に復帰する義務がある。
    - レベル3車両の条件や義務の明確化。
    - 損害賠償に関しては引き続き運転者（使用者責任）が問われる。
  - ホンダの「レジェンド」が世界初のレベル3型式指定車両として販売。
- 【2022年】レベル4に向けた法整備の本格化
  - 「自動運転レベル4実現に向けた制度整備検討会」（国交省・警察庁など）での議論。
    - 地域交通や高齢者の移動支援の文脈で、限定地域・限定条件でのレベル4（無人運転）の実装が議論。
  - 国交省は、道路運送車両法や道路運送法の改正を視野に、認可制度の設計。
- 【2023年】道路交通法・道路運送車両法の改正（レベル4合法化）
  - 2023年4月、自動運転レベル4を可能にする法改正が成立。
    - 同年2023年5月1日施行。
    - 道路交通法に「特定自動運行」を新設。
    - 運転者がいない場合でも、事業者が「自動運行装置」の運行管理責任を負うと規定。
  - 国交省による「遠隔型自動運転」許可制度、限定区域内での遠隔監視型の無人運行サービスが合法化。

- **米国：先ず走らせて問題があれば事後是正**

- 運行責任：州主体。カリフォルニアは DMV（車両のテスト・デプロイ）×CPUC（有償サービス）の二層許認可。許可の主体は企業（Waymo 等）＝事業者責任が前面。事故時は NHTSA の常設報告命令（SGO）で即時報告・是正の枠組み。
- 是正措置の実例：Cruise は 2023/10 に DMV が安全リスクを理由に許可停止。行政的に即時停止できる運用が定着。
- 運行形態の差：Waymo はサンフランシスコで無人商用運行。一方 Tesla は安全ドライバー同乗の「監督付き」で開始（CPUCの枠内）と報じられ、責任は引き続き事業者／運転者側に残る形。

- **中国：「製品の市場アクセス＋試験運用条件」を事前に規定**

- 制度の層：2018 年以降の全国ロードテスト指針→ 2021 年の全国試行規程→ 2023/11 の L3/L4 パイロット“市場アクセス”通知で、量産型 L3/L4 の限定運用に踏み込む。製造者（MIIT 認可）×運行者（交通当局管理）の二本立てで責任を明確化。
- 都市規則：北京は 2024 年に商用運行ルールを明文化し、監視・保険・データ提出を含む事業者の義務を具体化。

- **日本：「車両適合＋運行許可」を事前に規定**

- レベル4制度：2023/4 施行の道路交通法改正で「特定自動運行」を新設。特定自動運行実施者が公安委員会の許可主体となり、遠隔監視の主任者や事故時の対応義務が法定＝運行主体の一次責任を明確化。
- 車両側の適合：道路運送車両法の保安基準に ADS（自動運行装置）を組み込み、EDR/OTA 再認証等を運用。製造者・型式面の責任も制度的に担保。



# 特定自動運行制度

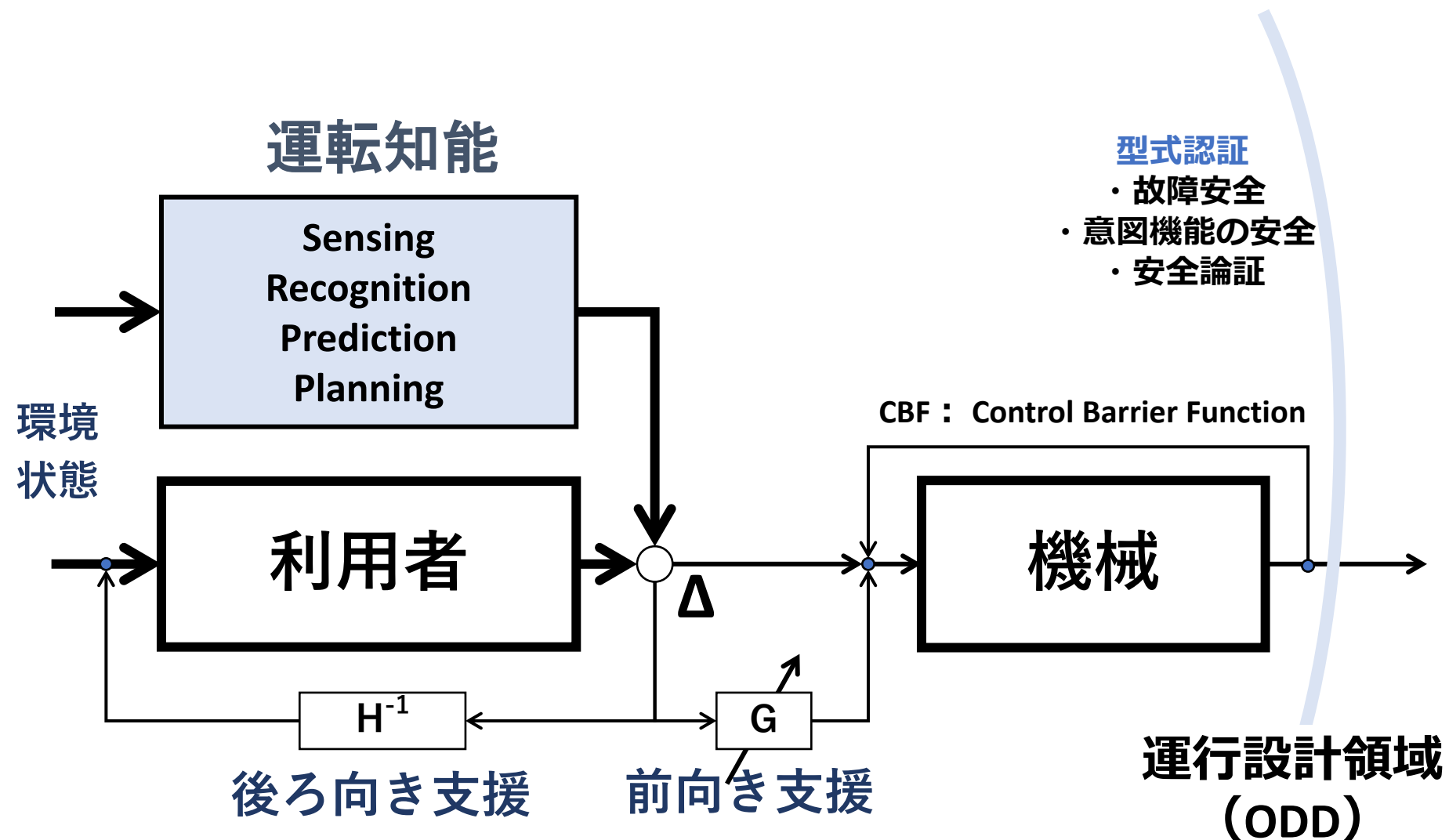
役割	根拠法・告示	制度の中身	主な管轄
① 公道での運行許可 (誰が・どこを走れるか)	道路交通法（2022 年改正→2023 年 4 月施行）第 75 条の 12～15 〈特定自動運行〉	特定自動運行計画 を都道府県公安委員会へ提出し、✓ 運行経路・時間帯✓ ODD（天候・速度上限…） ✓ 遠隔監視体制✓ 危険発生時の停止措置 …を審査 → <b>許可制</b>	警察庁 / 各都道府県公安委員会
② 車両システムの技術基準 (自動運行装置が安全か)	道路運送車両法・第 40～42 条（保安基準） + 国交省告示「自動運行装置等基準」（2023.1 改正）	自動運行装置（ADS）を保安基準の対象装置に追加。✓ システム故障検知・フェイルセーフ✓ EDR（作動状態記録装置）の搭載✓ OTA アップデート時の再認証手順	国交省（自動車局）
③ 旅客・貨物サービス事業	道路運送法（旅客）貨物自動車運送事業法	ロボタクシー＝第二種免許/タクシー事業の枠組みで・特定自動運行実施者が「道路運送事業許可」を取得・運賃・ダイヤ設定の事前届出	国交省（自動車局・各運輸局）
④ 遠隔監視者の運転責任	改正 道路交通法施行令（特定自動運行主任者）	無人走行中の一次責任者を <b>特定自動運行主任者</b> と規定。緊急時に手動介入できる通信・UI を義務化。	警察庁
⑤ 地方実装の調整窓口	地域公共交通活性化再生法（特定事業計画）	自治体が公共交通の不足区間をロボタクシーで補完する場合、「地域公共交通計画」の中でルート・停留所を位置付け。	国交省 + 自治体

# 我が国のレベル4 自動運転サービスの責任分担

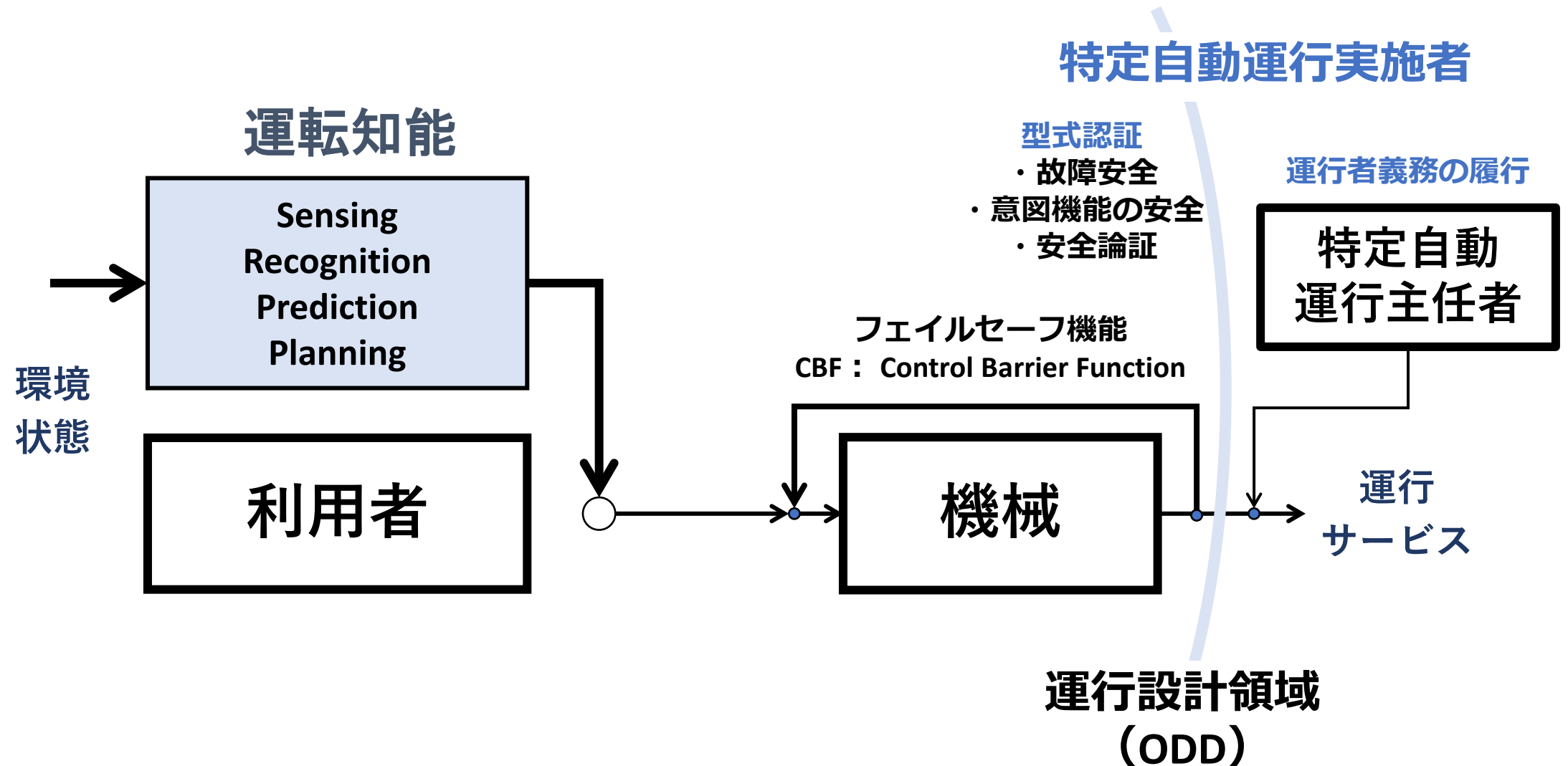
- **自動運行装置**：国土交通大臣が付する条件で使用される場合において、自動車を運行する者の操縦に係る「認知、予測、判断及び操作に係る能力の全部」を代替する機能を有する装置。
- 特定自動運行を行おうとする者は、特定自動運行を行おうとする場所を管轄する都道府県公安委員会に、経路や交通事故発生時の対応方法等を記載した**特定自動運行計画等を提出し、許可**を受けなければならない。
- また、許可を受けた者（**特定自動運行実施者**）は、車内又は遠隔監視を行うための車外の決められた場所に**特定自動運行主任者を配置**した上で、特定自動運行計画に従って特定自動運行を行う義務を負うとともに、当該特定自動運行主任者は、交通事故があった場合に必要な措置を講じなければならない。
- 制度趣旨
  - 定型的・一般的な運転操作に係る交通ルールは自動運転システムが遵守
  - 自動運転システムのみによる対応が困難な交通ルール（事故時の救護・報告等）について、特定自動運行実施者や特定自動運行主任者に遵守を義務付ける。

- 路上を走る権利は〈道路交通法〉で 都道府県公安委員会許可
- 車両そのものの安全基準は〈道路運送車両法〉 + 国交省保安基準
- 商用輸送サービスは〈道路運送法〉で運輸局の事業許可が必要
- 無人時の責任者 = 特定自動運行主任者（遠隔監視）が法定
- 自治体は 地域公共交通計画で導入ルートを位置付け、国と協調

# L2-L3: 自動運転



# L4 自動運転



- データに基づく運転のモデル化
- 学習型の自動運転と E2E 構成
- 安全性の検証方法
- 自動運転をめぐる制度と責任の分担