



University of Tsukuba  
筑波大学

TFOS年次シンポジウム  
2019年12月7日

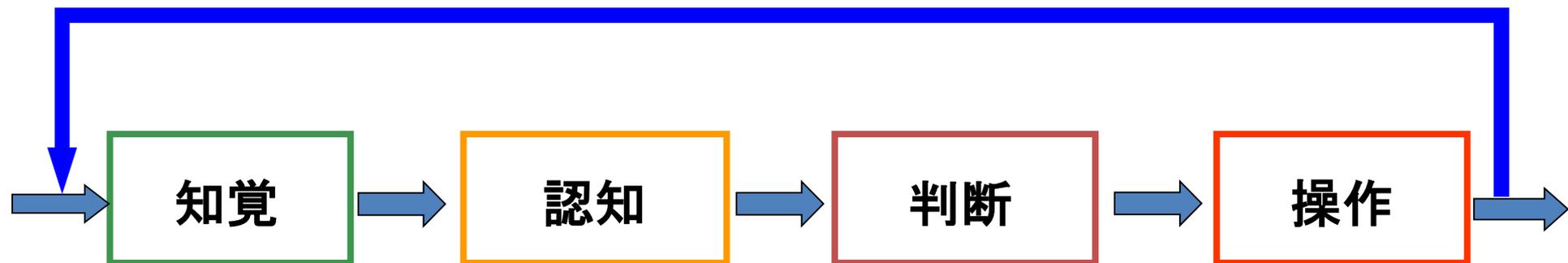
# 誰のための、何のための自動運転

## ～ 自動車の自動化に係る問いに答える ～

筑波大学副学長・理事  
稲垣 敏之

inagaki.toshiyuki.gb@un.tsukuba.ac.jp  
<http://css.risk.tsukuba.ac.jp/project/kakenhiS.html>

# 情報処理過程で生じるさまざまな失敗



- 見落とし、聞き落とし
- 能力の限界で見えない、聞こえない
- 実体のないものが見える、聞こえる

- 情報の意味が理解できない (知識ベースミスイク)
- 過去の経験を誤用 (ルールベースミスイク)

- 不適切な行為を選択 (知識ベースミスイク、ルールベースミスイク)
- 不適切な不作為 (リスクの過小評価)

- 意図せぬ行為による置換 (スリップ)
- 手順の一部の欠落や失念 (ラプス)
- 行為実行不能 (能力の限界)

# 代表的な運転支援技術 (その1)

## ACC (Adaptive Cruise Control)

一定速で走行する機能および車間距離を制御する機能を持った装置

### 先行車なし

設定した速度で走行



### 先行車あり

車間距離を一定に保って走行



先行車に続いて停止

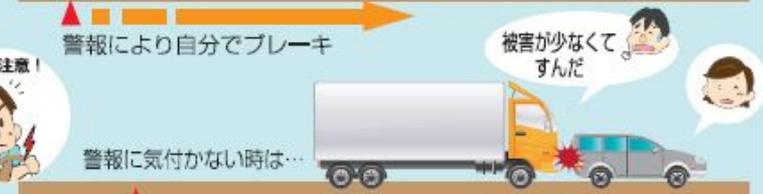
## 衝突被害軽減ブレーキ

前方の障害物との衝突を予測して警報し、衝突被害を軽減するために制動制御する装置

### システムあり



### システムなし



## レーンキープアシスト

走行車線の中央付近を維持するよう操作力を制御する装置

### システムあり

車線維持支援



操舵支援



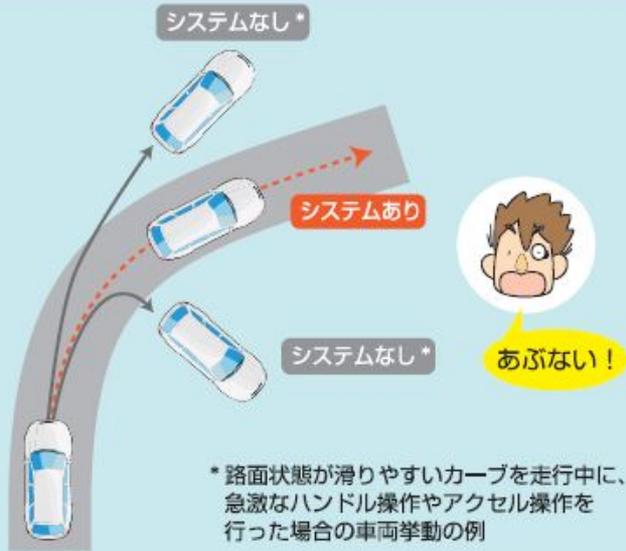
運転負荷軽減  
車線逸脱警報



# 代表的なASV技術 (その2)

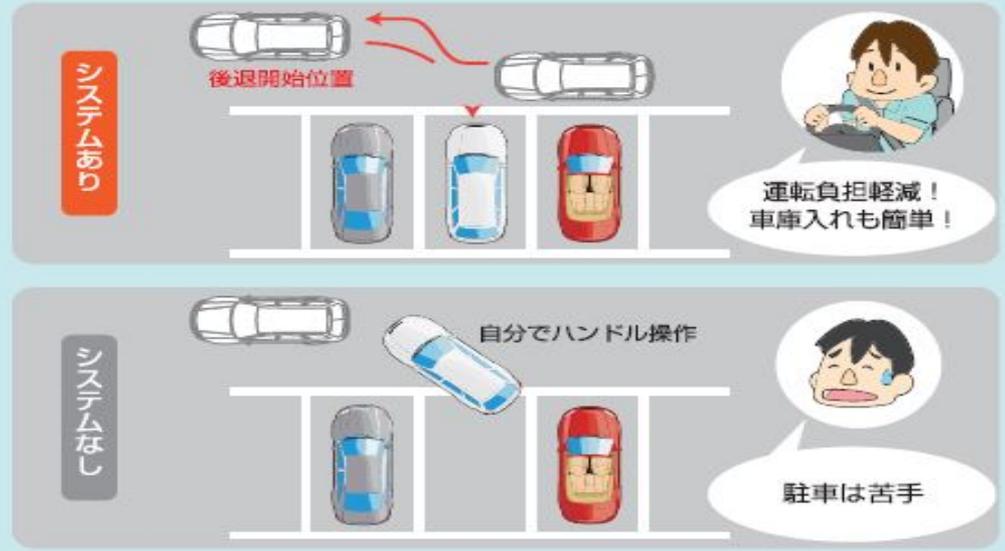
## ESC (Electronic Stability Control)

車両の横滑りの状況に応じて、制動力や駆動力を制御する装置

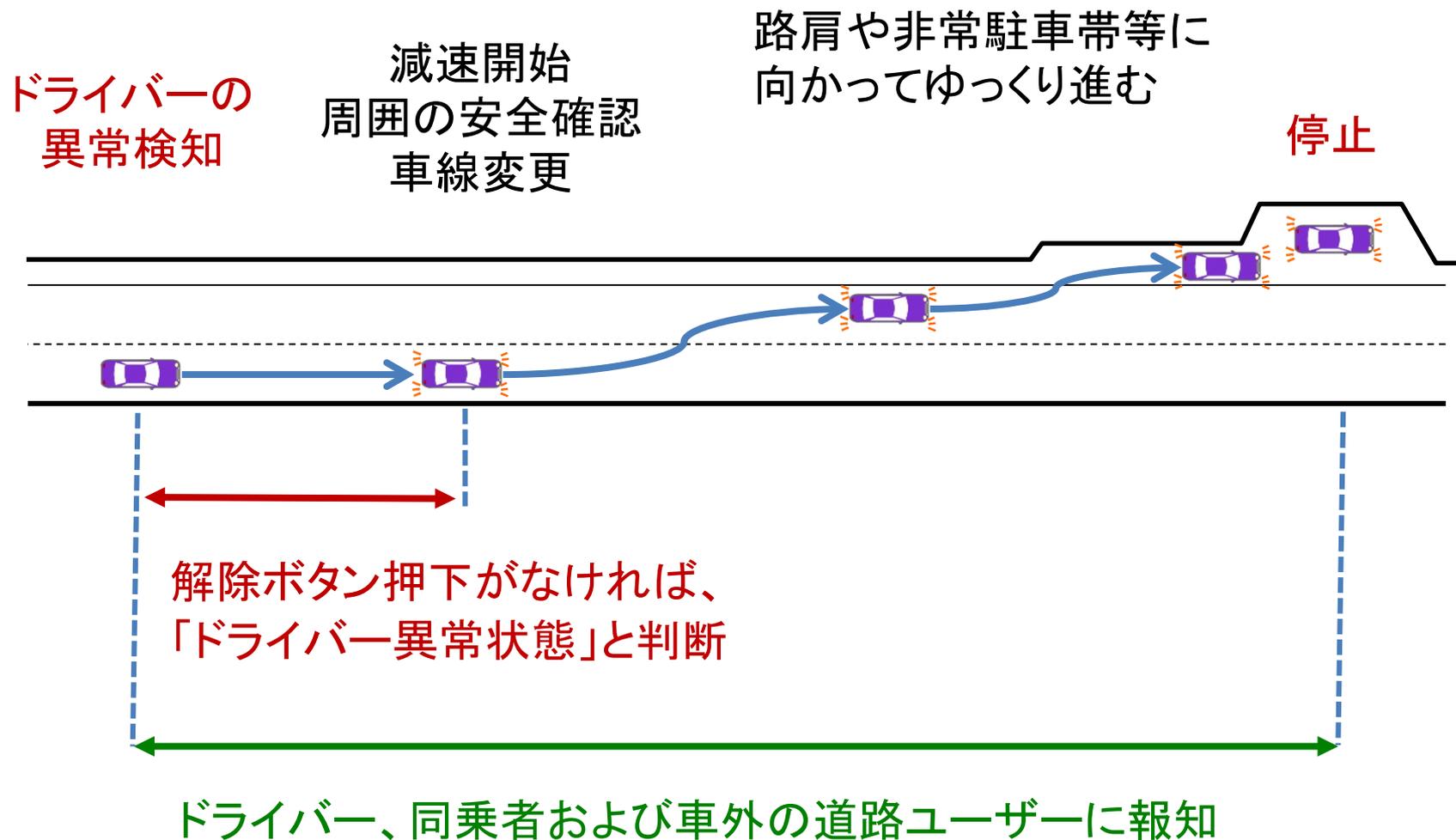


## 駐車支援システム

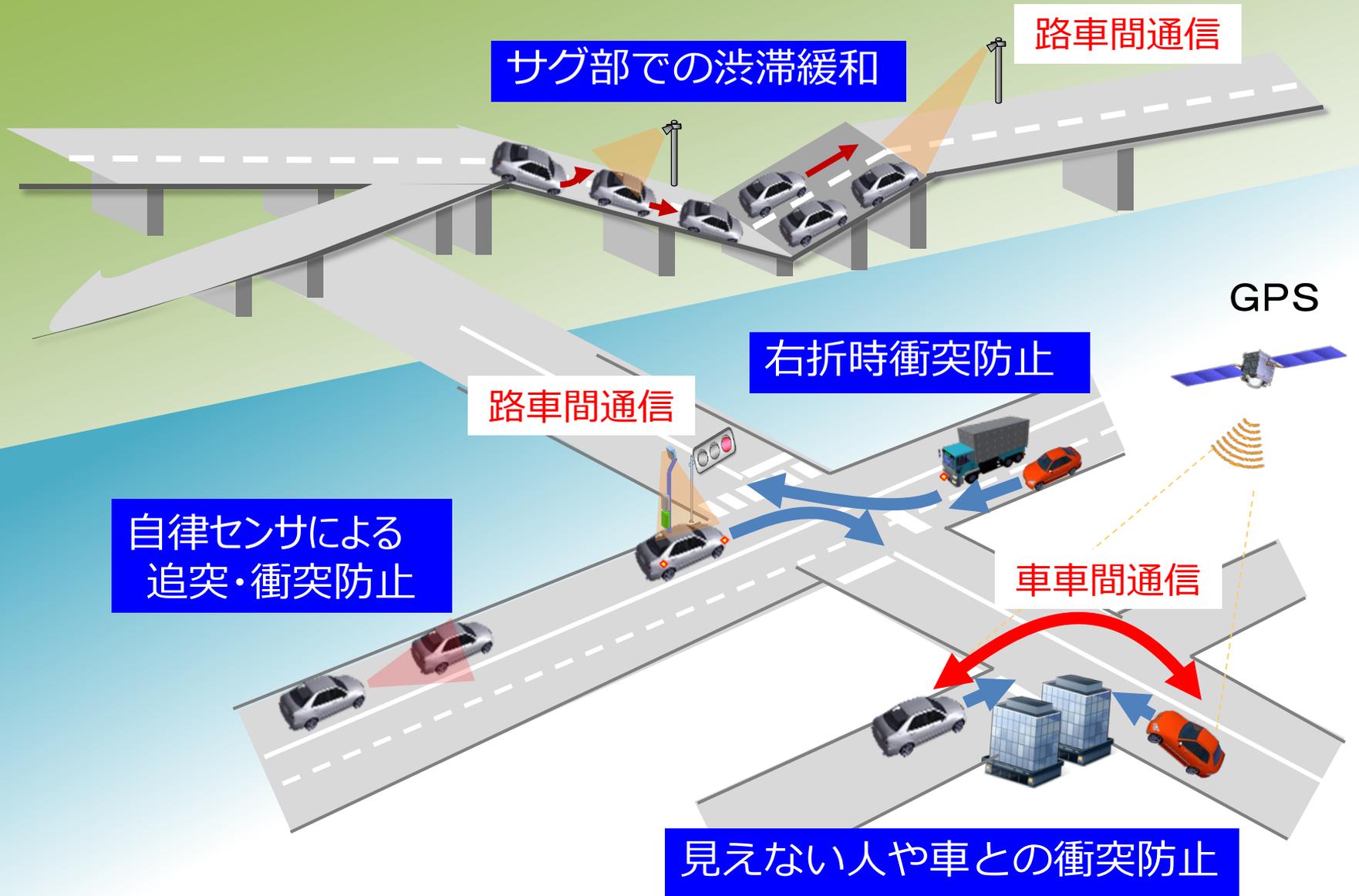
後退駐車時、ハンドルを自動制御して後退駐車を補助する装置



# ドライバー異常時対応システム

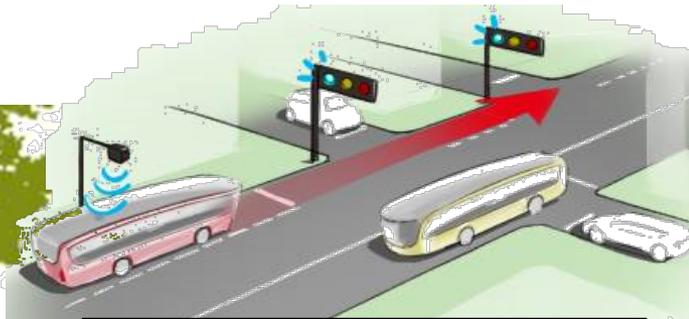


# 自動運転による交通事故・渋滞の軽減

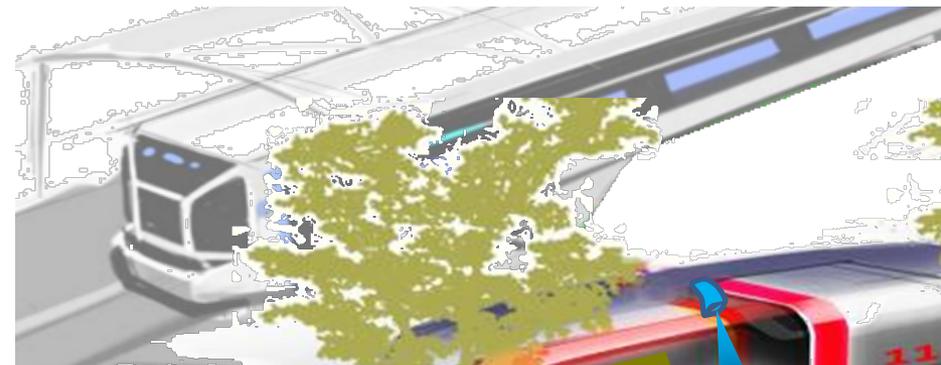


# 自動運転を活用した次世代都市交通

スムーズな加減速、乗客転倒防止



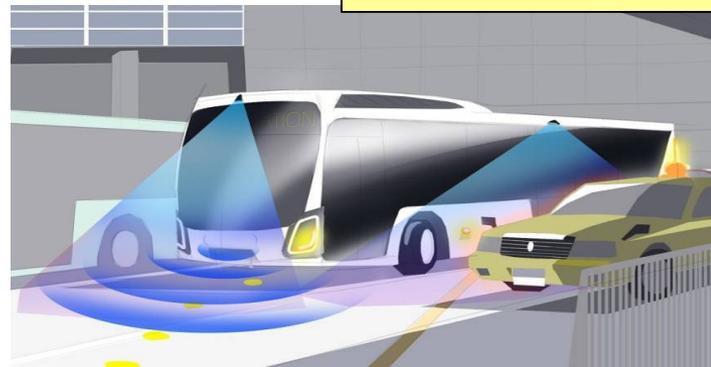
統合的・有機的な運行



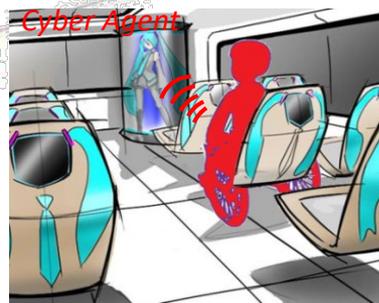
交通流整流、定時運行



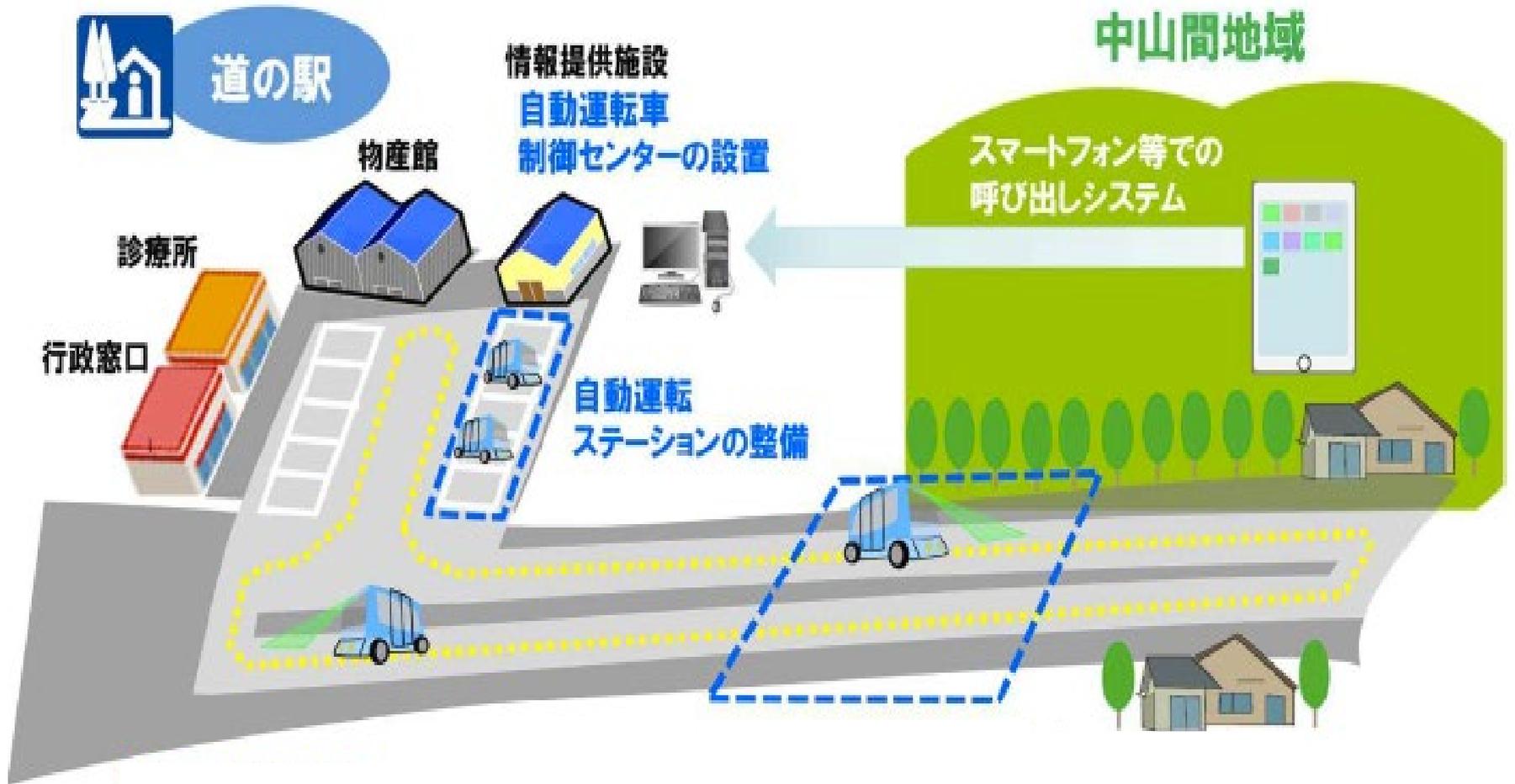
事故低減  
運転負荷軽減



乗降時間短縮  
乗降安全性向上



# 自動運転を活用した地方における移動サービス



# 移動サービスのための公道実証実験

①【市街地モデル】 石川県輪島市  
(小型カート利用) 2017.12~



②【過疎地モデル】 福井県永平寺町  
(小型カート利用)



③【観光地モデル】 沖縄県北谷町  
(小型カート利用)



④【コミュニティバス】 茨城県日立市  
(小型バス利用)



# 自動運転を活用した物流の効率化

## 電子牽引による後続無人隊列走行システム



- 最高速度は 80 km/h
- 被牽引車は2台まで
- 車間は 10m
- 隊列の全長は最長で 56m

# 自動運転技術を活用して豊かな未来を！

- **交通事故の低減、渋滞の削減**  
運転者による**ヒューマンエラー**を防止
- **自動運転で交通社会の最適化**  
公共交通を補完し、**都市と地方の移動格差**を解消
- **物流の効率化、無人化を目指す**  
**ドライバー不足の解消、コスト削減への期待**
- **新しい移動体験で運転者の負担軽減**  
**未来モビリティで移動時間と空間をもっと自由に**
- **次世代モビリティと未来社会**  
**すべての人が移動の自由を手にした未来都市を実現**

# ひとくちに「自動運転」といっても、形態は多種多様



Photo: BMW



Phot: Volvo

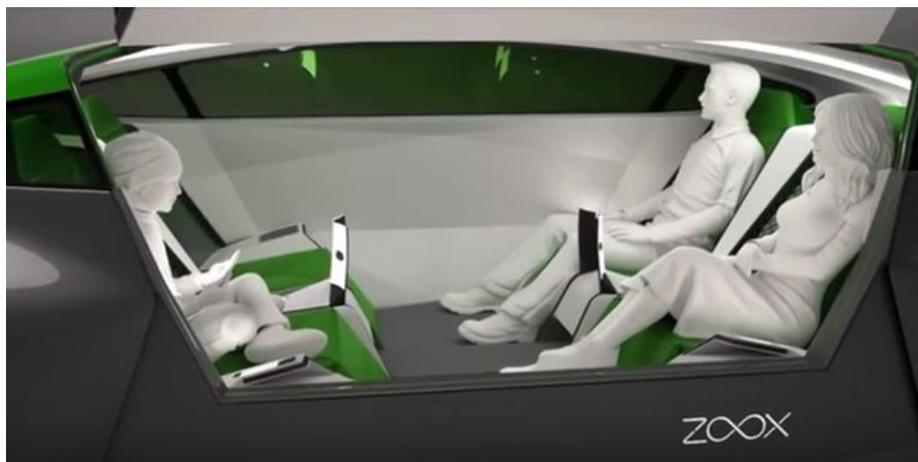


Photo: Zoox

# 自動運転レベル (Levels of Driving Automation)

ドライバーは動的運転タスクの一部を担当（環境及びシステムの監視ならびに必要な応じての介入はドライバーの役目）

1	Driver Assistance	特定の運行設計領域においてシステムは縦方向又は横方向のいずれか一方の車両運動制御を担当。ドライバーは動的運転タスクの残余分を担当。
2	Partial Driving Automation	特定の運行設計領域においてシステムは縦方向及び横方向の車両運動制御を担当。ドライバーは動的運転タスクの残余分と監視制御を担当。

システムは動的運転タスクのすべてを担当

3	Conditional Driving Automation	特定の運行設計領域においてシステムが全ての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なとき、システムは十分な時間余裕をもってドライバーに運転交代を要請。ドライバーはその要請に適切に対応すること。
4	High Driving Automation	特定の運行設計領域においてシステムが全ての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なときも、システム自身で適切に対応。
5	Full Driving Automation	運行設計領域に限定されることなく、システムが全ての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なときも、システム自身で適切に対応。

# レベル2の自動運転

システム： 縦方向と横方向の車両運動制御を担当。

ドライバー： 動的運転タスク残余分と監視制御を担当。



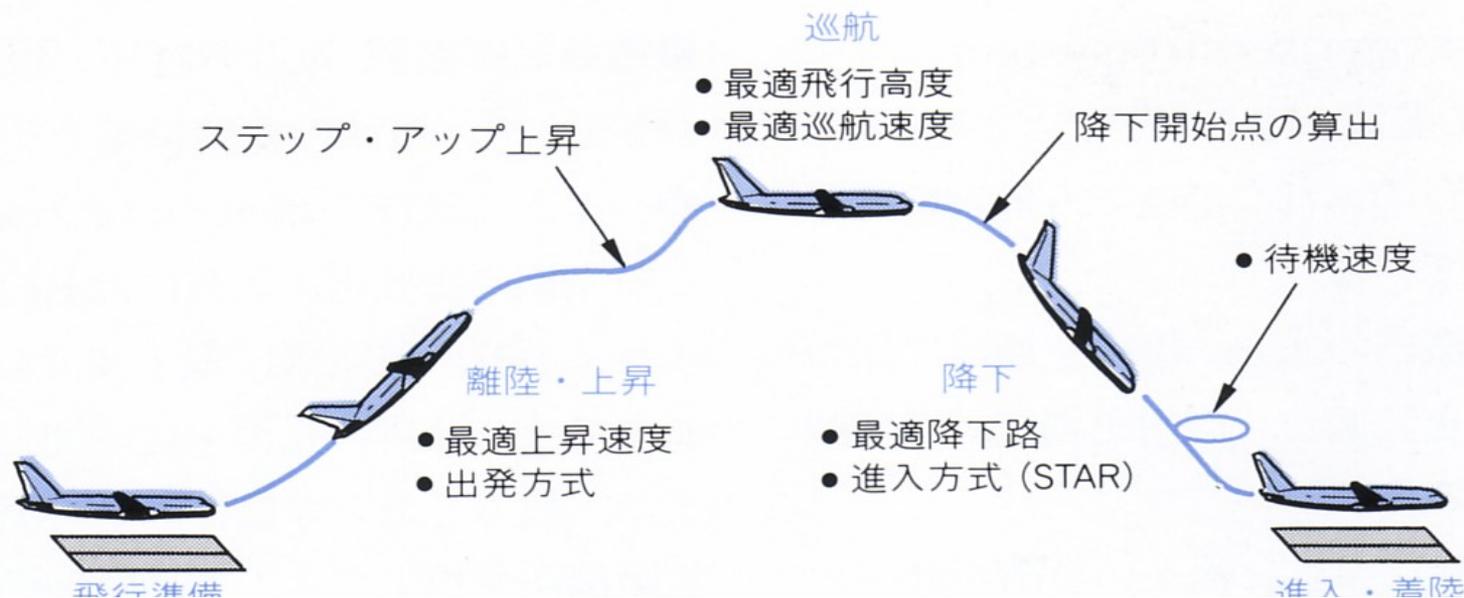
Photo: BMW

## 【監視制御 (supervisory control)】

- 人が何をなすべきかを決め、システムに指示
- システムは、人の指示に沿って制御を実行
- 人は、システムによる制御が適切かどうかを**継続的に監視**。場合に応じて**適時に介入**

システムの動作原理、能力限界、サブシステム間の相互干渉等に関する正確な理解が必要

# 航空機の自動化はレベル2の自動運転と同等



年間飛行時間 800-900時間の国際線パイロットの場合、  
手動操縦は 3時間程度

システムの動作原理、能力限界、サブシステム間の相互干渉等に関する正確な理解が必要

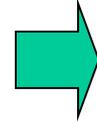


パイロットは、このために  
厳しい教育・訓練を受ける

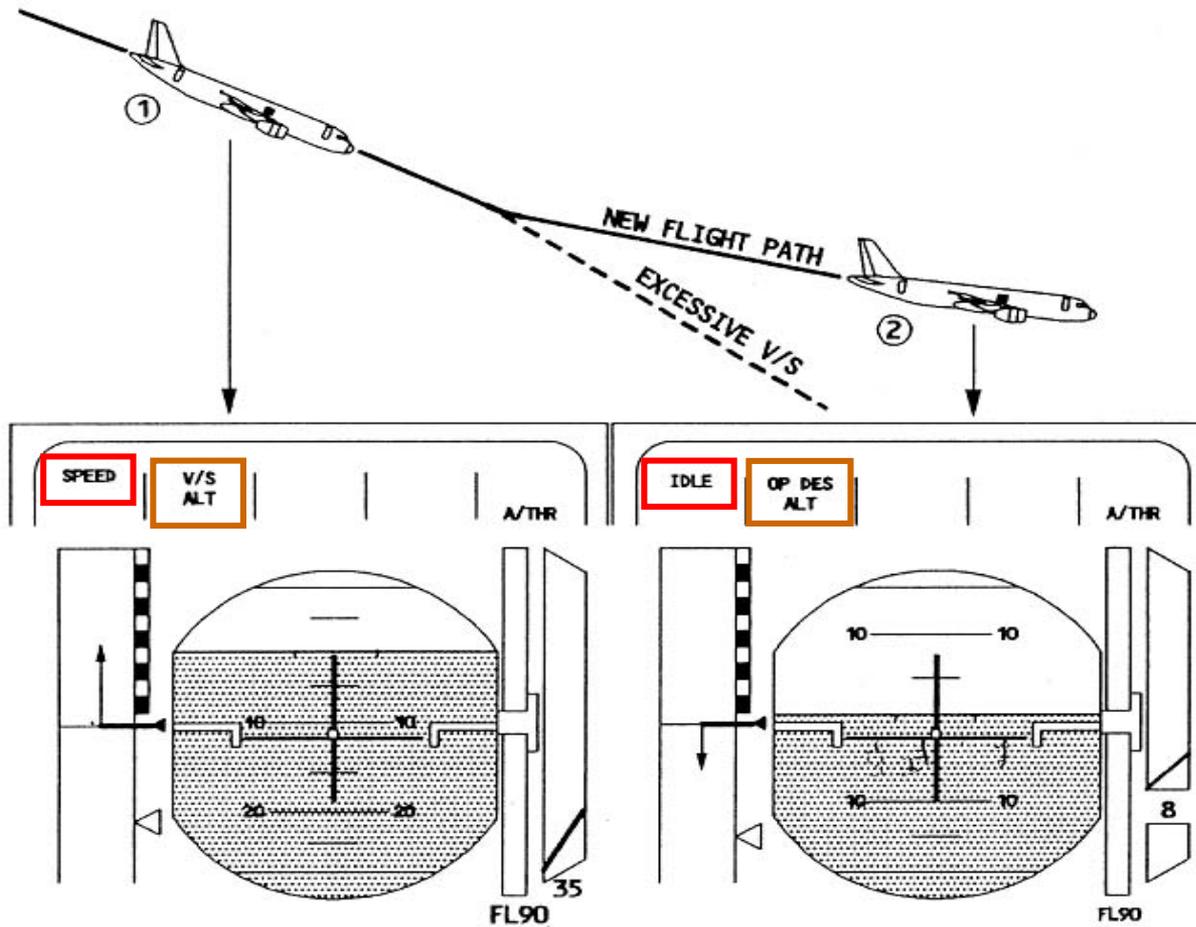
# 航空機における賢い機械がもたらす光と影

## ● 賢い機械

- 状況センシング
- 状況理解
- 何をなすべきかを決定し、実行



状況認識の喪失  
機械への過信と不信の交錯  
オートメーションサプライズ



# 機械の状況判断・意図が分からないまま、機械を信頼

オートパイロットが  
なぜこんなことをするのか  
私にはわからない。

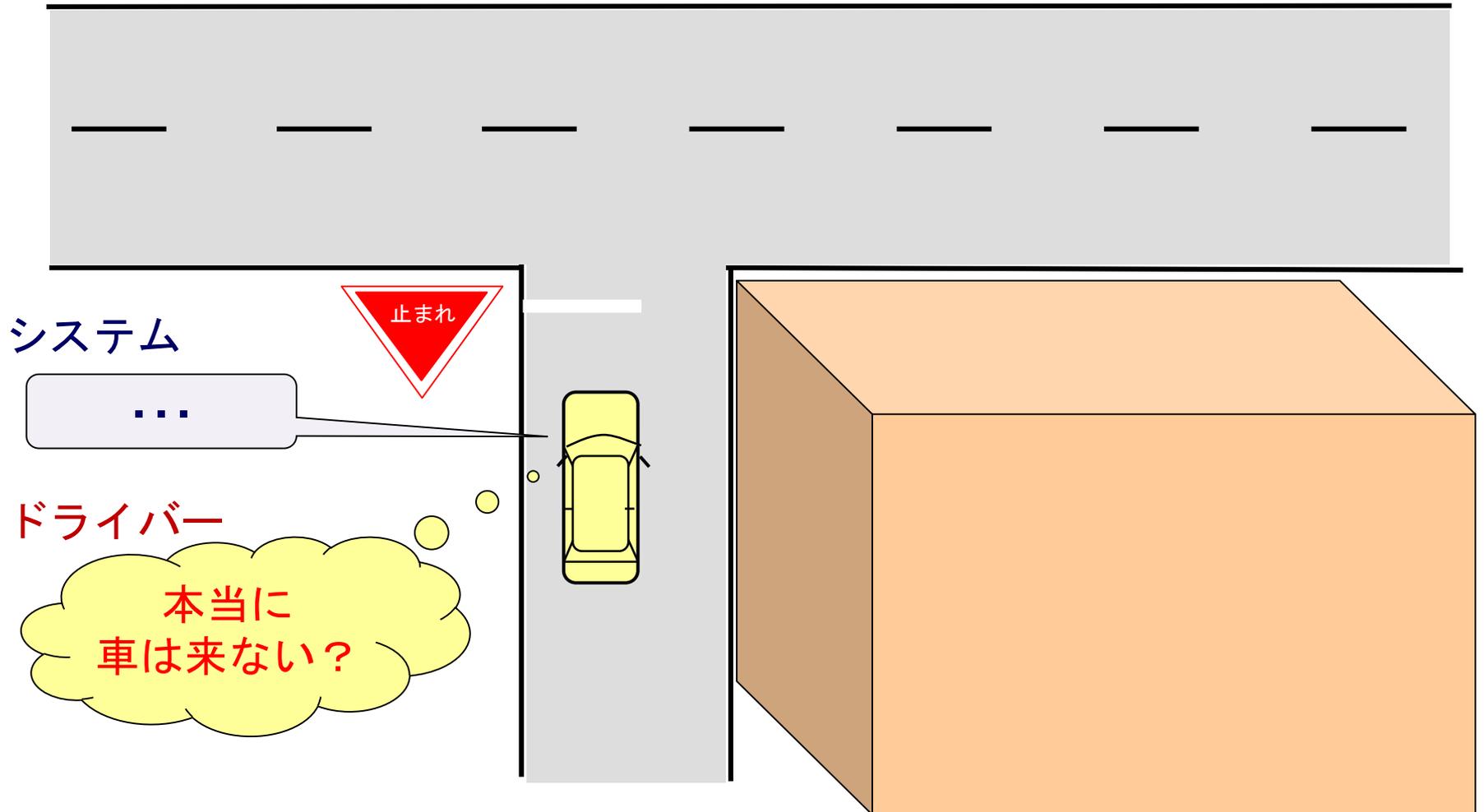
でも、オートパイロットは  
わかったうえで  
やっているのだろう。



(FAA 1995)

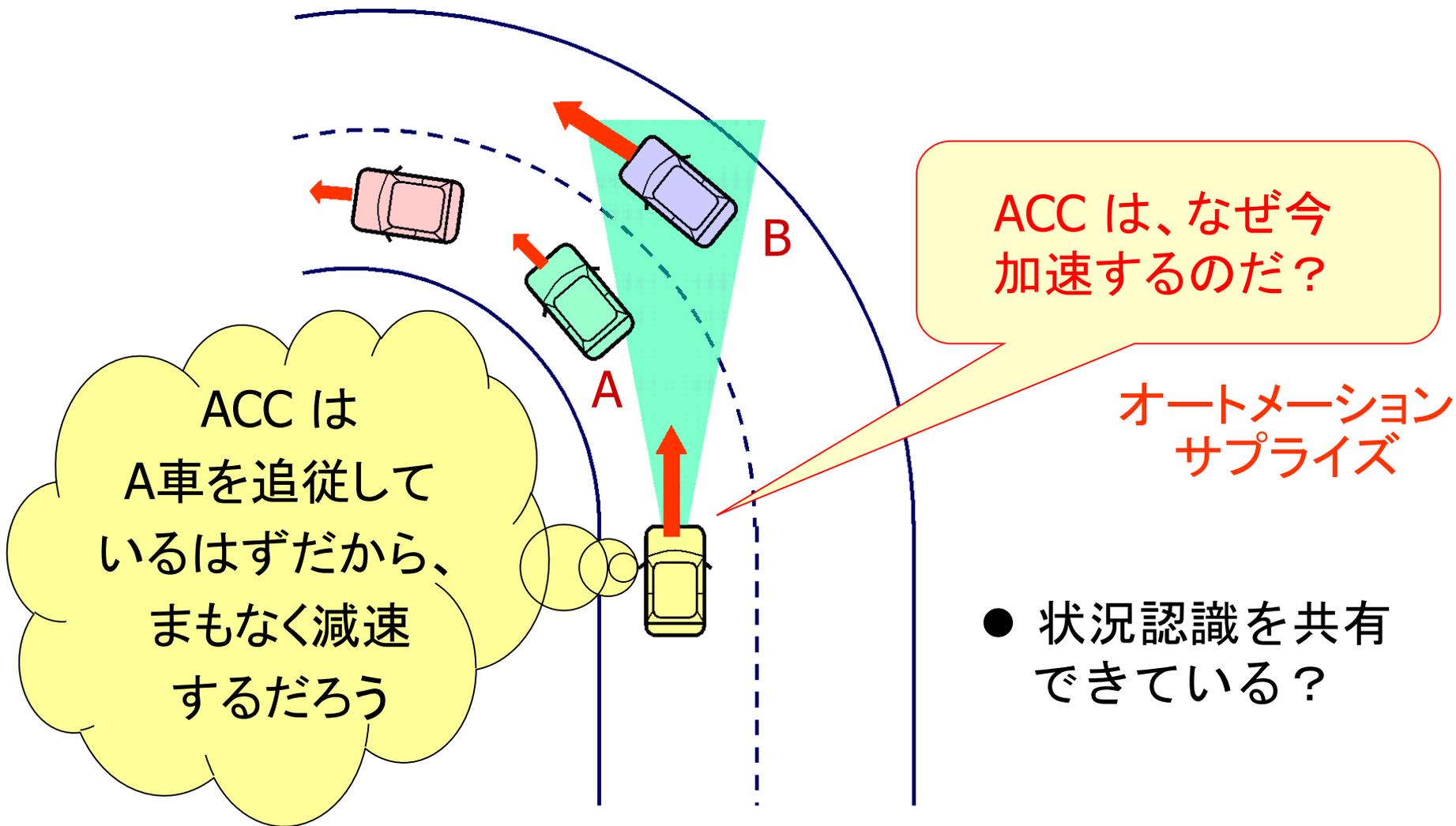
- 定期的なシステム機能・原理等の教育と使用法の訓練を受けるパイロットですら高度自動化システムを持て余す、となると・・・
- 自動運転車の免許制度(教育・訓練)はどのようにすべき？

# 注意喚起も警報も出ていないから大丈夫？



- システムは作動している？  
していない？

# 人が見ているもの ≠ 機械が見ているもの



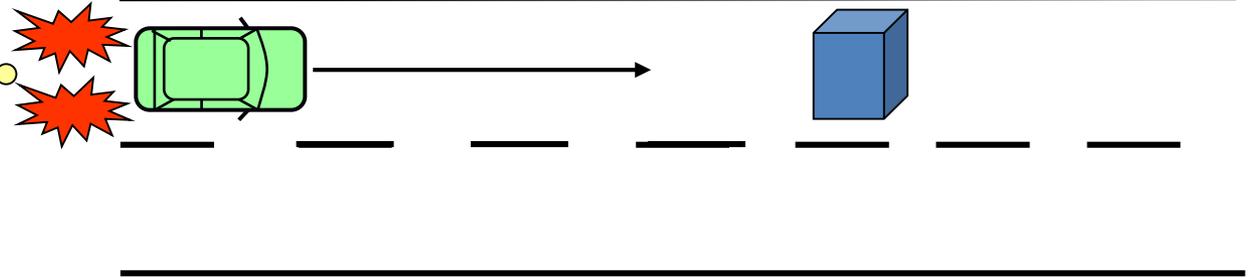
実は、ACCが見ているのはB車

(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

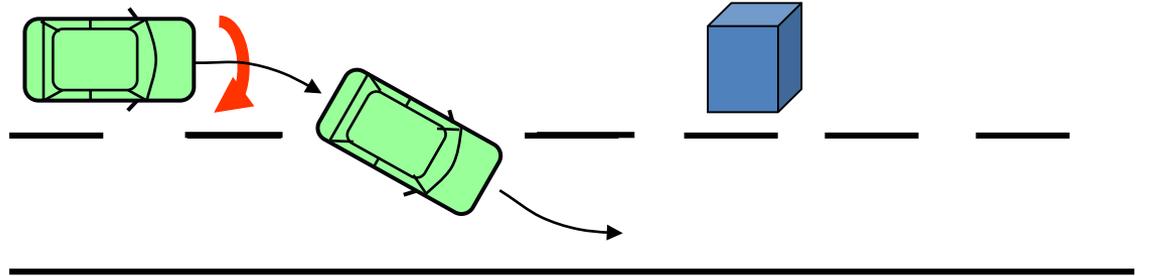
# 「人が見ているもの = 機械が見ているもの」だが...

両者で「ものの考え方」が違くと、オートメーション・サプライズ

制動で衝突  
回避しよう

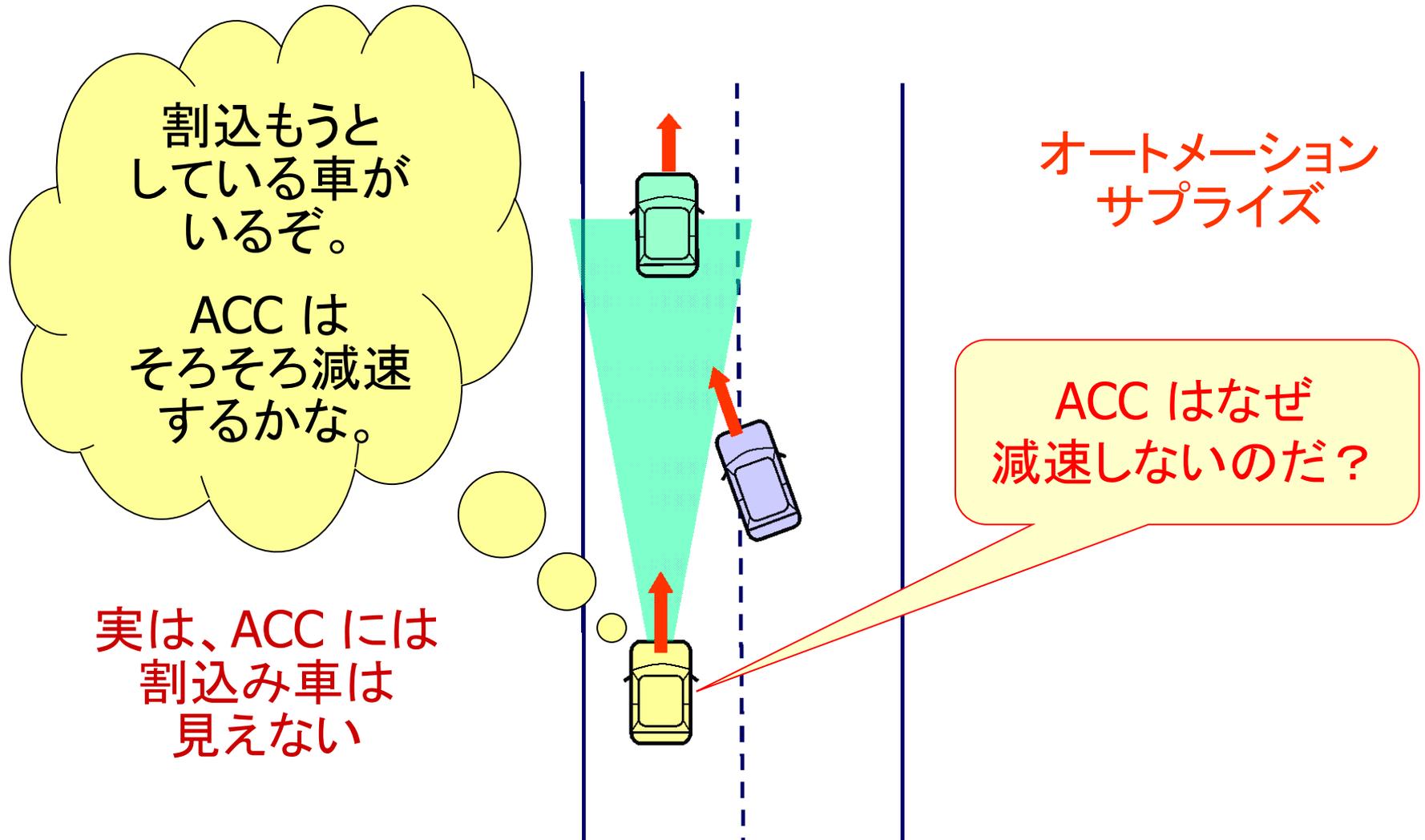


操舵で衝突  
回避しよう



- これから何をしようと考えている？  
(意図)

# 機械の能力限界が分からないと...



- 能力限界はどこにある？

# レベル2の自動運転

システム： 縦方向と横方向の車両運動制御を担当。

ドライバー： 動的運転タスク残余分と監視制御を担当。



Photo: BMW

## 【監視制御 (supervisory control)】

- 人が何をなすべきかを決め、システムに指示
- システムは、人の指示に沿って制御を実行
- 人は、システムによる制御が適切かどうかを**継続的に監視**。場合に応じて**適時に介入**

システムの動作原理、能力限界、サブシステム間の相互干渉等に関する正確な理解が必要



高齢者を含めた一般ドライバーにも厳しい教育・訓練を課す？

# レベル3の自動運転

システム： 走行環境の監視を含め、全ての動的運転タスクを担当。  
作動継続が困難なとき、十分な時間余裕をもって  
ドライバーに運転交代を要請。

ドライバー： システムの要請に適切に対応すること。



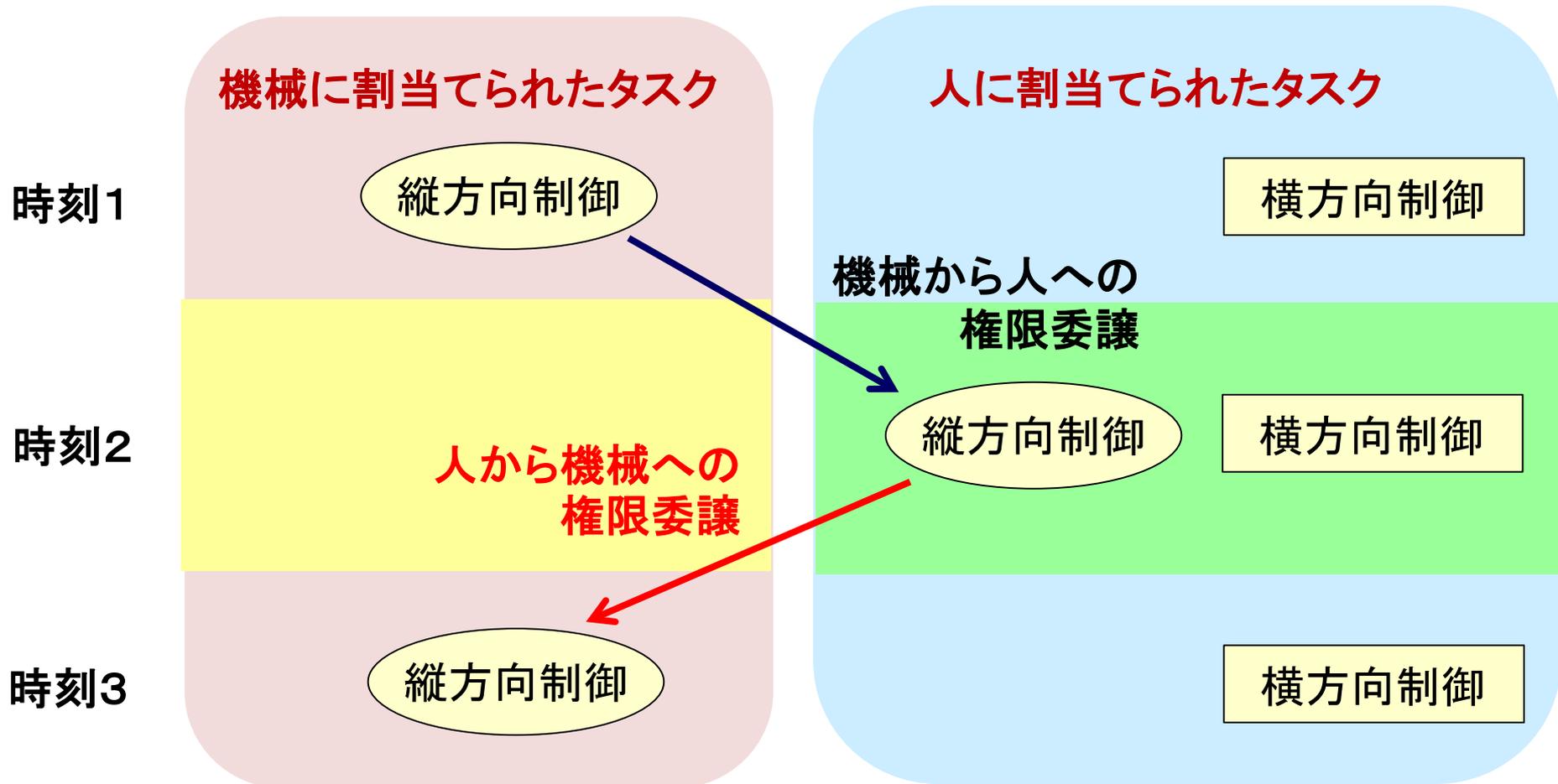
Photo: Volvo

- 「十分な時間余裕」とは、どれくらい？
- 運転交代を要請してから一定時間が経過すれば、システムは機能を停止させてよい？
- レベル3の自動運転の狙いは、移動時間を有効に使えるようにすることはなかったのか？

# 運転主体の交代: 権限委譲 (trading of authority)

(1) 誰から誰への権限委譲?

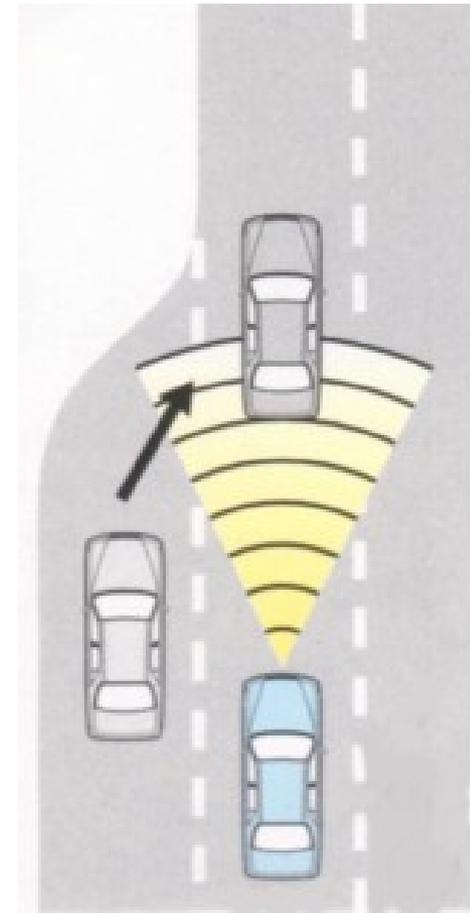
(2) 権限委譲の要否と実行タイミングを決定するのは誰?



# 人の判断による権限委譲

(例) 離陸時は人間が操縦。  
機体が安定すると、コンピュータに操縦を委任。  
必要に応じてオートパイロットを解除して、  
人が操縦。

(例) ACC で走行中、割り込みの気配を示す車に  
気づく。いったん ACC を解除し、割り込み車  
との間隔を適切にした後、再び ACC を  
エンゲージ。



# 機械の判断による、機械から人への権限委譲は 成功するとは限らない！

高高度を飛行中に対気速度に矛盾が生じ、オートパイロット解除。  
その後のパイロットの操作が不適切であったため異常姿勢に陥り、墜落。



# 運転交代要請(RTI)を発して機械から人へ権限委譲

ドライバー：運転操作は行わず、走行環境の監視もしていない。  
システムから運転交代を求められたとき、  
瞬時に状況を見極め、適切に車両を制御できる？



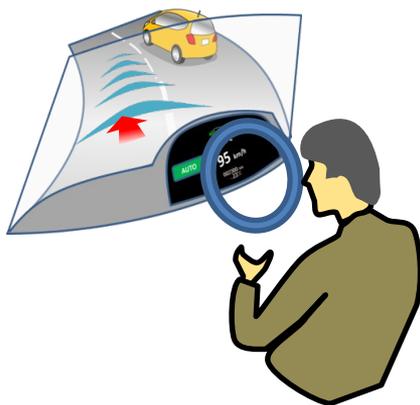
Photo: Volvo

運転を交代  
してください

RTI  
(request to intervene)



RTI に対して適切に  
対応してくれれば  
よいのだが・・・



RTI を発しても  
ドライバーが対応して  
くれなかったら・・・

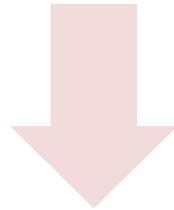
# 運転交代要請 (RTI) メッセージのデザイン

SAE J3016 「運転を交代してください」

所定の時間が経過した時点で、システムは自動走行モードを解除

## 事故発生リスクを最小にする RTI

運転を交代してください。運転が引継がれたことが確認でき次第、自動走行モードを解除します



所定時間の経過後も、運転者が運転を引継いだことが確認できないなら・・・

システムは「権限委譲は不可能」と判断し、自身の機能範囲内で車両停止へ向けて制御を実行

# J3016 におけるレベル3 の定義は妥当ではない

## 【定義改訂案】

特定の運行設計領域においてシステムがすべての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なとき、システムは十分な時間余裕を持ってドライバーに運転交代を要請。

ドライバーがシステムの要請に対応しないときは、システムが車両を最少リスク状態に誘導

ミニマム・リスク・マヌーバ

## 【現在の定義】(SAE J3016)

特定の運行設計領域においてシステムがすべての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なとき、システムは十分な時間余裕を持ってドライバーに運転交代を要請。

ドライバーはその要請に適切に対応すること。

「自動運転車の安全技術ガイドライン」(国交省自動車局 2018.09)

# レベル3の自動運転

システム： 走行環境の監視を含め、全ての動的運転タスクを担当。  
作動継続が困難なとき、十分な時間余裕をもって  
ドライバーに運転交代を要請。

ドライバー： システムの要請に適切に対応すること。



Photo: Volvo

Photo: Volvo

- 「システムの手に残るときは、人に対応させよう」という設計思想は妥当ではない

# レベル4の自動運転

システム： 全ての動的運転タスクを担当。  
作動継続が困難なときも、システム自身で適切に対応。



Photo: Volvo

- 「システムだけで対応できる」とは、「人に関与を求めなくてもよい」こと
- 「何が起きているか」、「システムがどのように対応しようとしているか」を人に知らせなくてもよいのではない

## 【移動サービスへの応用可能性】

- 道路交通に関する条約(ジュネーブ条約)との整合性を図ったうえで、限定的な地域において無人自動運転移動サービスを実現させれば、高齢者のモビリティ向上へ繋がる

# レベル4の自動運転による移動サービス

## ラストマイル自動運転

①【市街地モデル】石川県輪島市  
(小型カート利用) 2017.12~



②【過疎地モデル】福井県永平寺町  
(小型カート利用)



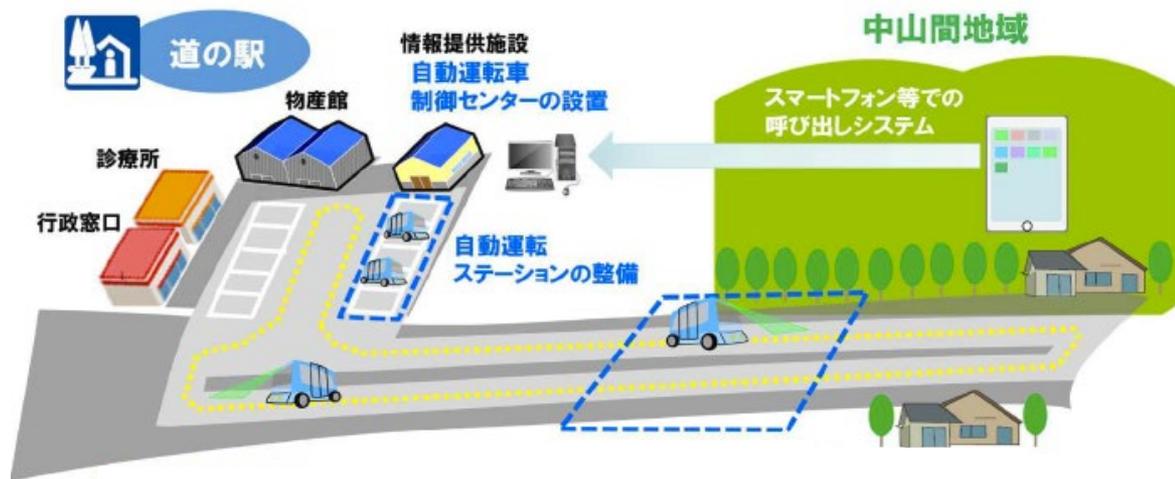
③【観光地モデル】沖縄県北谷町<sup>ちやたん</sup>  
(小型カート利用)



④【コミュニティバス】茨城県日立市  
(小型バス利用)



中山間地域における  
道の駅を拠点とした  
自動運転サービス



写真・図の出典： 国交省

- 運行設計領域 (ODD: operational design domain) の適切な設定に基づく個別具体的議論が肝要

# 限定地域における無人自動運転移動サービス

- 過疎地域等での公共交通の路線廃止の動き
  - ⇒ 高齢者等の移動困難者の移動手段の確保は喫緊の課題
- 有効な策のひとつが、**限定地域における無人自動運転移動サービス**
  - 「無人」とは、「車内にはドライバーがいないこと」。ただし、車両外にドライバーの役割を果たす者（遠隔監視・操作者）がいる。
  - 車両外に遠隔監視・操作者がいる自動運転システムを「**遠隔型自動運転システム**」とよぶ。
  - 遠隔型自動運転システムを活用した移動サービスを「**無人自動運転移動サービス**」とよぶ。
  - 「無人自動運転移動サービス」では、車内にドライバーがいないことから、「**レベル4の自動運転**」とみなす流儀がある。
  - サービスの対象となるエリア（例）
    - ・ 比較的交通量が少なく見通しの良いエリア
    - ・ 市街地でも、歩行者・二輪車等の飛出しが発生しにくいエリア
    - ・ 比較的走行環境が単純なエリア

# 限定地域における無人自動運転移動サービス(続き)

- 現時点における無人自動運転移動サービスの姿
  - 低速(10~30 km/h)。予め定められた特定ルートのみで運行
  - 搭乗可能な乗客は少人数。特定の場所で乗降
  - 運行は天候条件のよい日中に限定
  - 運行状況は、遠隔監視・操作者が監視。
    - 運行中の車両の走行環境が「運行設計領域(ODD)」を超える／超えそうな場合、車両は速やかに運行を中止。
    - その後、遠隔監視・操作者が限定的な運行を行う／サービス提供業者が対応(車両に駆けつける、等)
- 遠隔型自動運転システムの課題
  - 1人の遠隔監視・操作者は2台以上の自動運転車を監視できるか？
  - 遠隔監視・操作者に届く映像には「通信遅延」があり、監視・操作者が送信した制御コマンドが車両に届くまでにも「通信遅延」がある
  - 遠隔監視・操作者の知識・技量は、これに対応するに十分か？
  - 遠隔監視・操作者に提供される画像は、正確な状況理解を助けるか？

# 電子牽引による後続無人隊列走行システム



最高速度は 80 km/h。被牽引車は 2 台まで。車間は 10m。隊列の全長は最長で 56m。

- 運送業における運転者不足 ⇒ 1人の運転者で複数台のトラックを運行し、運行の高効率化を実現したい
- 有人の牽引車の後方に1台または複数台の無人の被牽引車を電子的に連結(車両間を通信等により接続)して走行
- 高速道路上で運用。複数車両が通常運転で隊列形成エリア(サービスエリア等)まで走行し、牽引車の運転者の操作により電子的に結合
- 被牽引車は牽引車と適切な車間、横方向位置を保ちながら走行するが、「被牽引車は自動運転車ではない」(将来的には、レベル4の自動運転)

# 電子牽引による後続無人隊列走行システムの機能

1. 走行時の安全性を担保するために、システムを構成する主要要素(隊列システムコンピュータ、情報通信装置、操舵アクチュエータ、主制動装置等)は2重系以上の多重系とするなど冗長性を有すること。
2. 車車間通信システムによる堅ろうで運行に十分耐える電子連結を前提に、被牽引車は牽引車に対して適切な車間距離と横方向の距離(牽引車の軌跡に対する被牽引車の横方向の誤差は± 50cm 以内)を保持し走行。  
車間距離センサとしては、ミリ波レーダ、3Dライダ、高精度GPS等。  
白線・先行車認識は、カメラ、3Dライダ、高精度GPS等を活用。
3. 電子牽引による後続無人隊列では、2台目以降は「牽引車両」の概念で扱うため、運転の責任は先頭車の運転者にある。
4. 牽引車は、被牽引車から送られた側方・後方映像を運転者に表示する画像表示装置を装着すること(後側方視界の確保)。
5. 牽引車及び被牽引車は、車線変更時において周辺車両、障害物等を検知するため、レーダやカメラ等のセンサを有すること。

# 電子牽引による後続無人隊列走行システムの機能(続き)

6. 牽引車及び被牽引車は、他車両の割込みを検知する機能を有すること。  
(ただし、これは万一の場合への配慮であり、電子牽引による後続無人隊列は「牽引車両」の概念で扱うため、割込みされない車間距離での走行が基本)
7. 牽引車は、割込みが発生した場合、自動的に車速を一定速度以下に制限する等の縮退運転の機能を有していること。
8. 牽引車及び被牽引車は、割込み車両の安全な離脱を促す機能を有していること(MRMによって被牽引車を即時停止させることは、交通流の円滑さや安全の確保の観点から好ましいとは限らない)。割込み車両の離脱後は通常運転に復帰。
9. 被牽引車は、システムが作動限界を超えた場合又は故障により隊列の維持が困難になった場合に作動するMRMを有していること。
10. 牽引車は、システム作動限界や故障の発生時に自動的に車速を一定速度以下に制限する等の縮退運転の機能を有することが望ましい。
11. 被牽引車は、隊列維持が困難になるような故障(全通信手段の遮断等)又は異常(タイヤのパンク等)の発生時に作動するMRMを有していること。

# 自動運転における人と機械の協調と共生(1)



Photo: BMW



Photo: Volvo



Photo: Zoox

- 自動運転レベルが高いものが「レベルが高い」のではない
- 自動運転レベルではなく、モードと呼ぶべきではなかったか
- 監視制御は、楽な仕事ではない
- 高機能なシステムの動作原理や能力限界を知らないと、システムを正しく監視することはできない
- 権限の的確な引継ぎには、瞬時の状況判断力が不可欠
- ドライバーの役割と責任を社会やドライバーが認識すべし

# 自動運転における人と機械の協調と共生(2)

HMI が提供すべきものは・・・

- 機械と状況認識を共有できる手がかり
- 機械の判断の根拠が分かる手がかり
- 機械の意図が分かる手がかり
- 機械の能力限界を知る手がかり
- 機械の作動状態が分かる手がかり



(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

- 不適切な信頼(不信／過信)の低減
- 過信に基づく依存(過度の依存)の低減
- モード認識喪失やオートメーションサプライズの低減

さらに踏み込んでいうならば・・・

自然な形でドライバーモニタリングの役割を担う HMI と制御系の構築

# 参考文献

稲垣 (2012). 人と機械の共生のデザイン, 森北出版.

Inagaki, T. (2003). Adaptive automation: Sharing and trading of control. In E. Hollnagel (Ed.), Handbook of Cognitive Task Design, Chapter 8 (pp. 147-169), Lawrence Erlbaum Associates.

Inagaki, T. (2010). Traffic systems as joint cognitive systems: Issues to be solved for realizing human-technology coagency, Cogn. Tech. & Work, 12(2), 153-162.

Inagaki, T. & Sheridan, T. (2012). Authority and responsibility in human-machine systems: Probability theoretic validation of machine-initiated trading of authority. Cognition, Technology & Work, 14(1), 29-37.

Inagaki, T. & Sheridan, T. (2018). A critique of the SAE conditional driving automation definition, and an analyses of options for improvement. Cognition, Technology & Work. DOI: 10.1007/s10111-018-0471-5.

国土交通省自動車局 (2018). 自動運転車の安全技術ガイドライン.

SAE (2018). Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. Surface Vehicle Recommended Practice, J3016.