

高度自動化がもたらすものと求めるもの — 交通分野における人と機械の共生に向けて —

国立大学法人筑波大学 副学長・理事

稲垣 敏之

inagaki.toshiyuki.gb@u.tsukuba.ac.jp
<http://www.css.risk.tsukuba.ac.jp>

自動運転への関心が高まっているが...



Photo: BMV

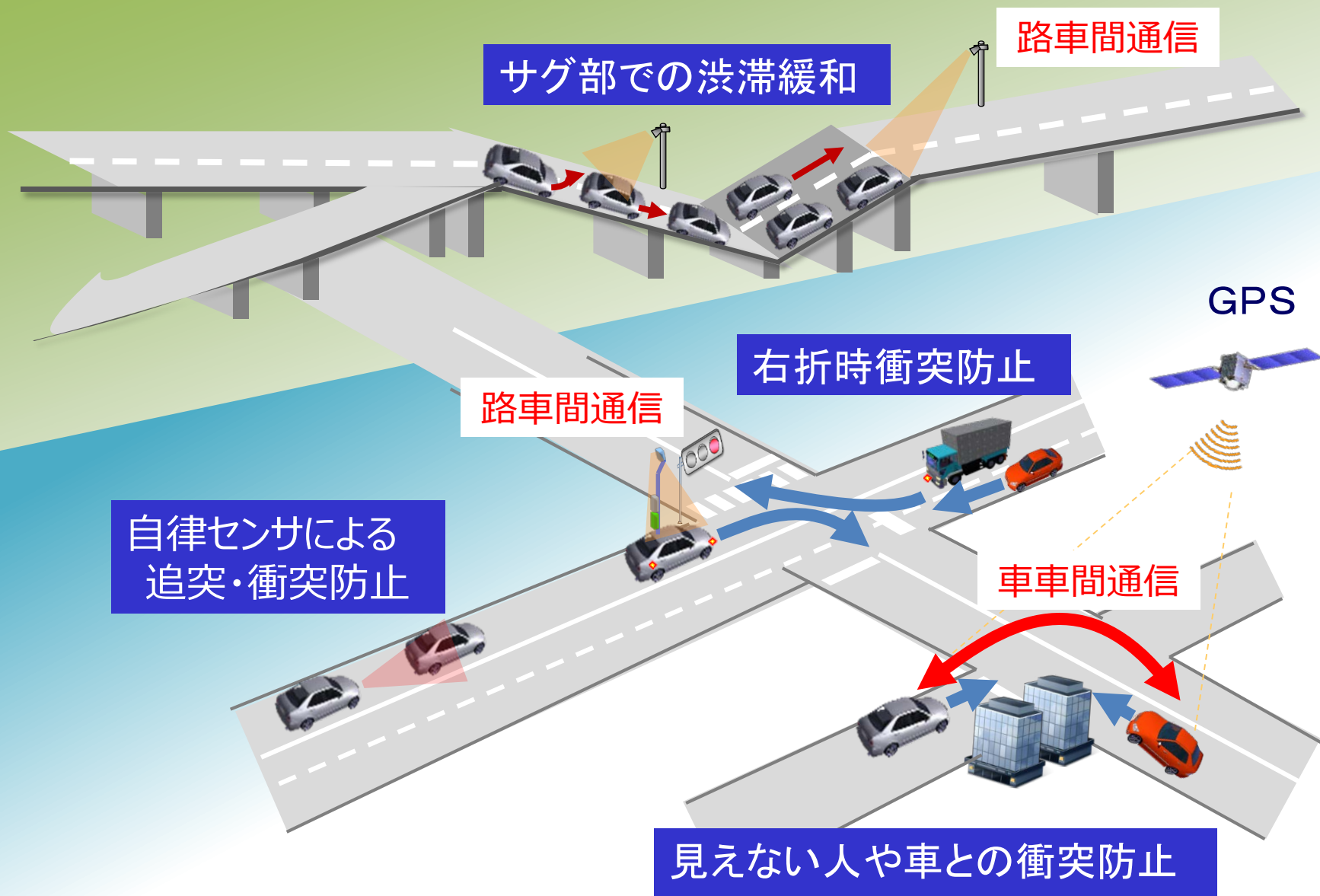


Photo: Volvo



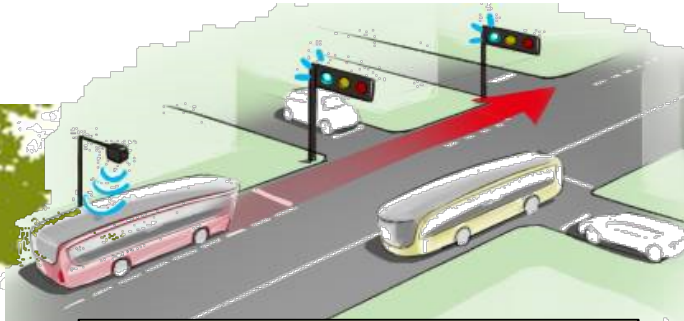
Photo: Zoox

自動運転による交通事故・渋滞の低減



次世代公共交通システム

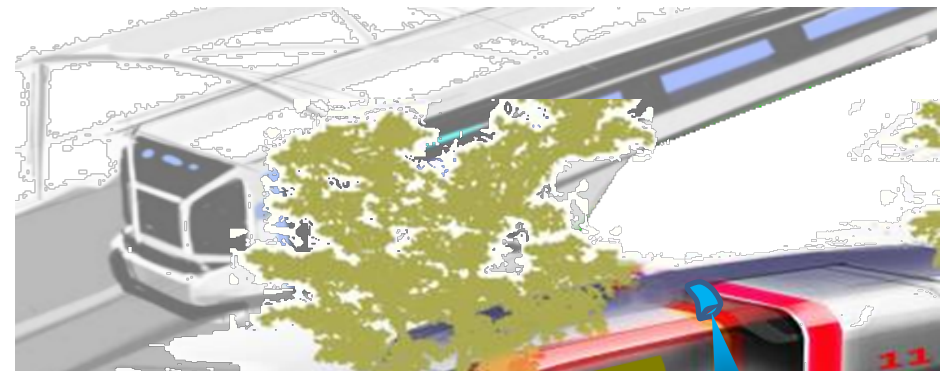
スムーズな加減速、乗客転倒防止



統合的・有機的な運行

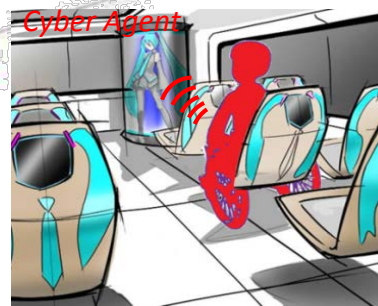


交通流整流、定時運行



事故低減
運転負荷軽減

乗降時間短縮
乗降安全性向上



航空機における自動化の進展

1900年代初頭は、操縦の困難さをパイロットの練度で克服

- パイロットの負担が大
- ヒューマンエラーが入り込む余地

解決策のひとつは、**人が担当している機能の自動化**

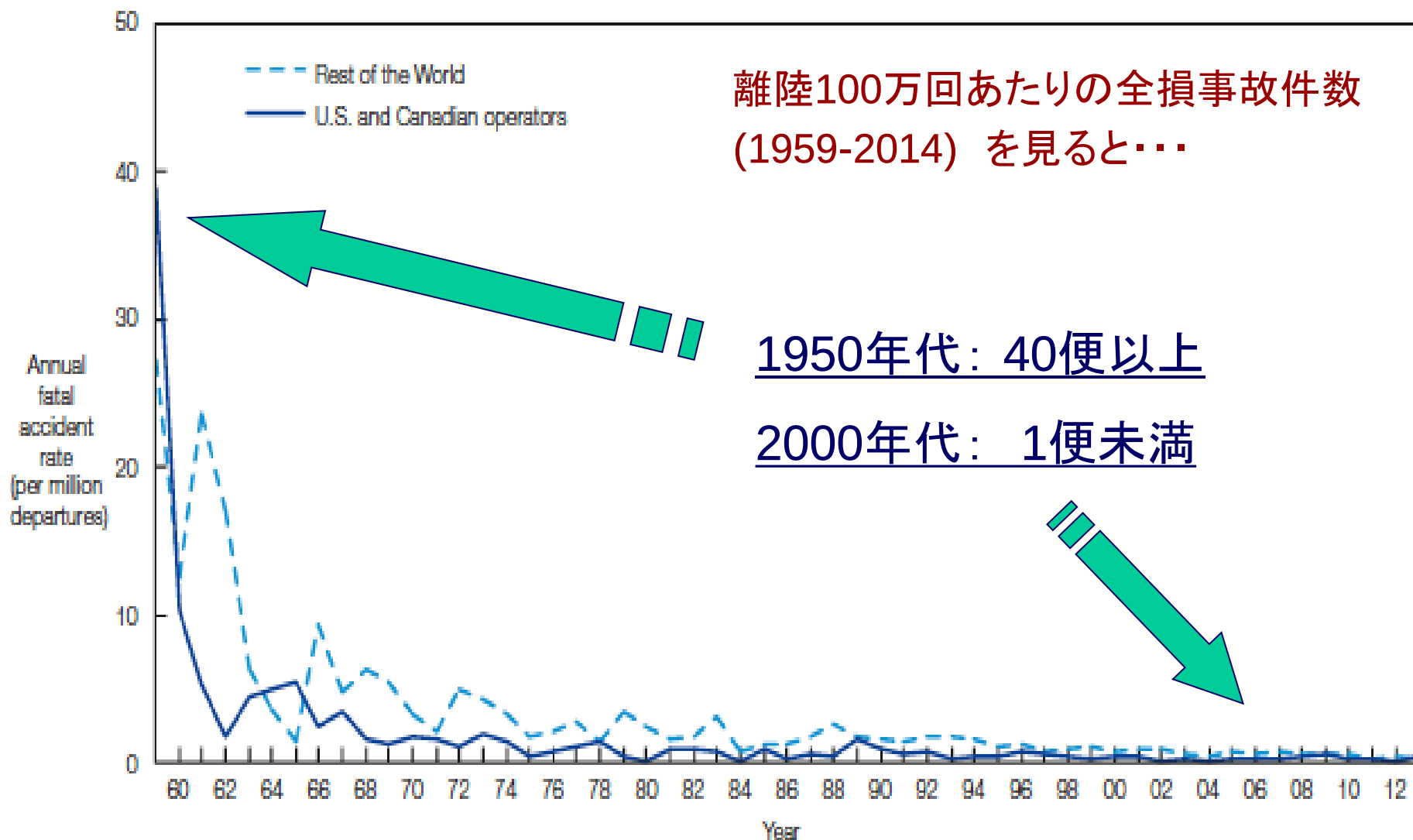


操縦操作の自動化だけでなく、**飛行管理**(機体重量や気象条件に合った離陸速度・上昇速度・巡航高度・降下開始点等の決定)も自動化

- 長距離路線を担当しているパイロットの年間飛行時間が800-900 時間とすると、そのパイロットが自ら操縦を担当しているのは、3時間程度

・・・ **自動化できていないのは離陸フェーズだけ**

自動化の進展は安全性の向上に貢献



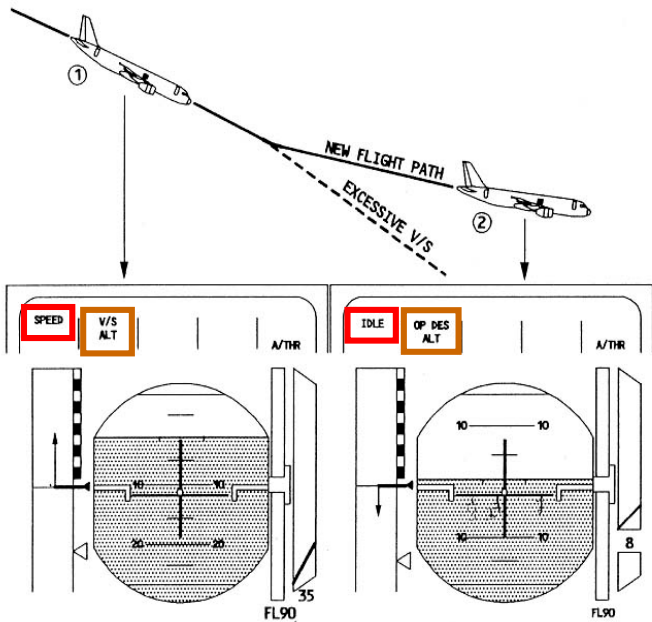
高い知能と自律性を備えた機械がもたらす光と影

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



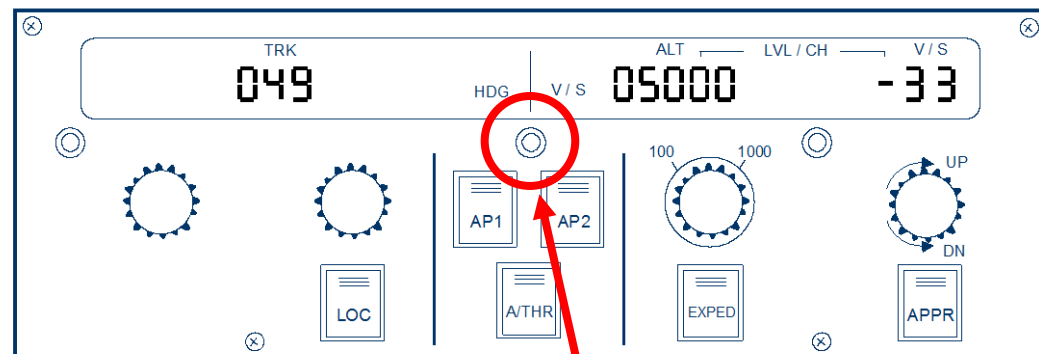
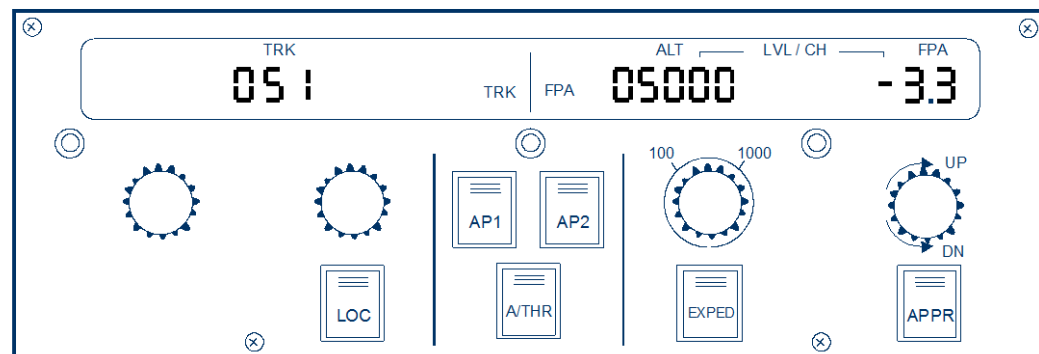
状況認識の3つのレベル

レベル1: 何かが起こっていることに**気づく**

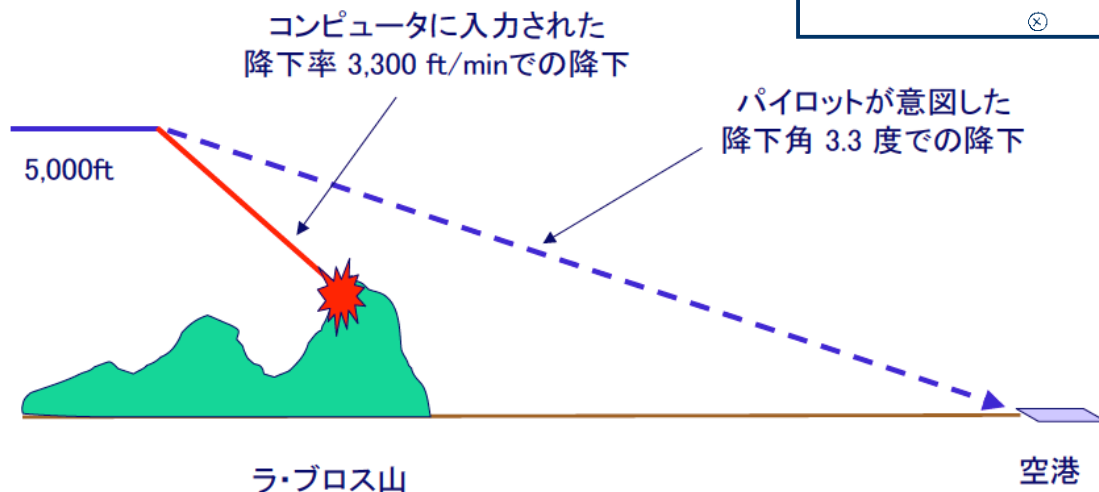
レベル2: その**原因を特定**できる

レベル3: これからの事態の**推移が予測**できる

1. 多機能インターフェースによるエラーの誘発

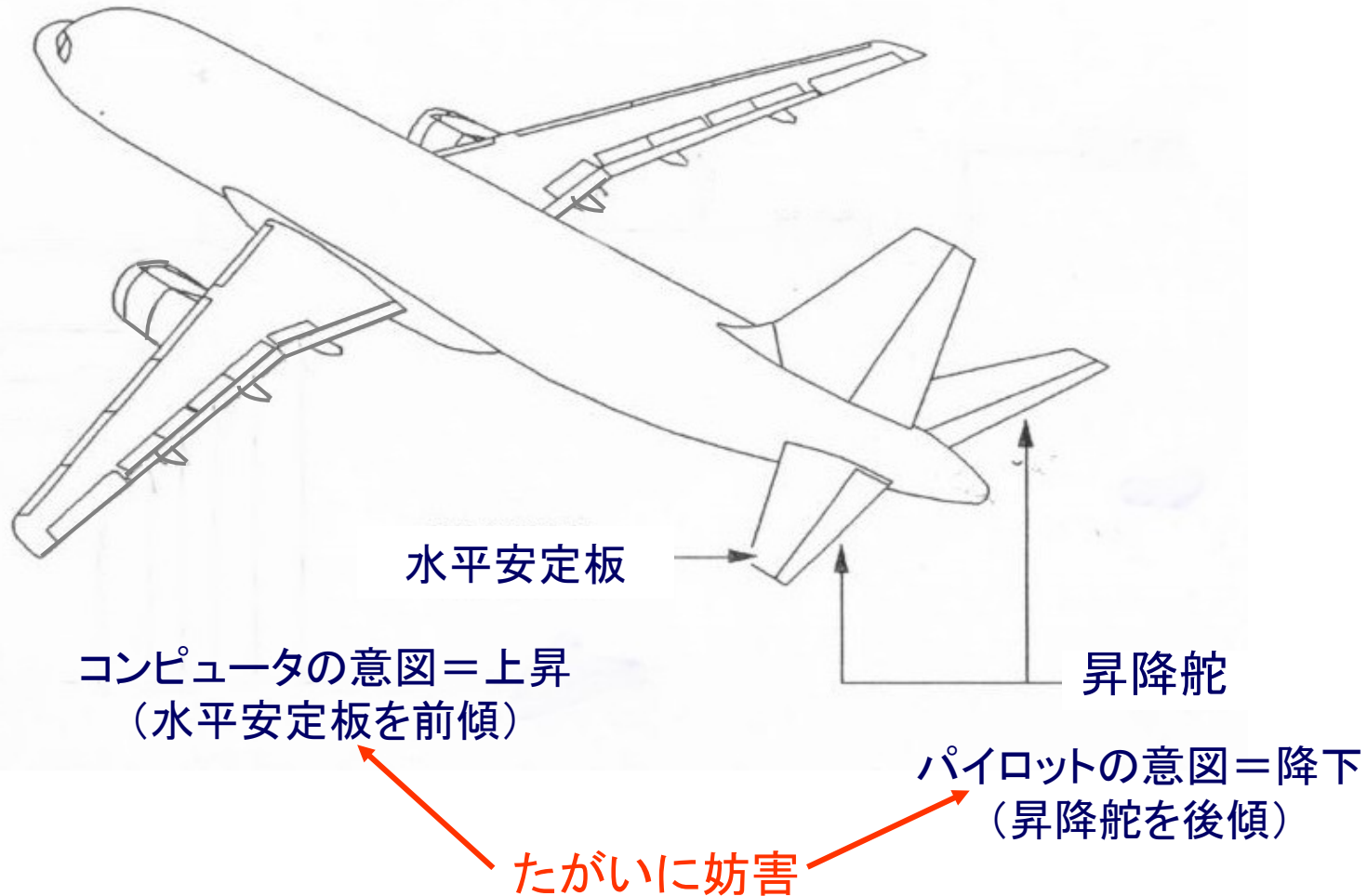


HDG-V/S / TRK-FPA
モード切替
プッシュボタン



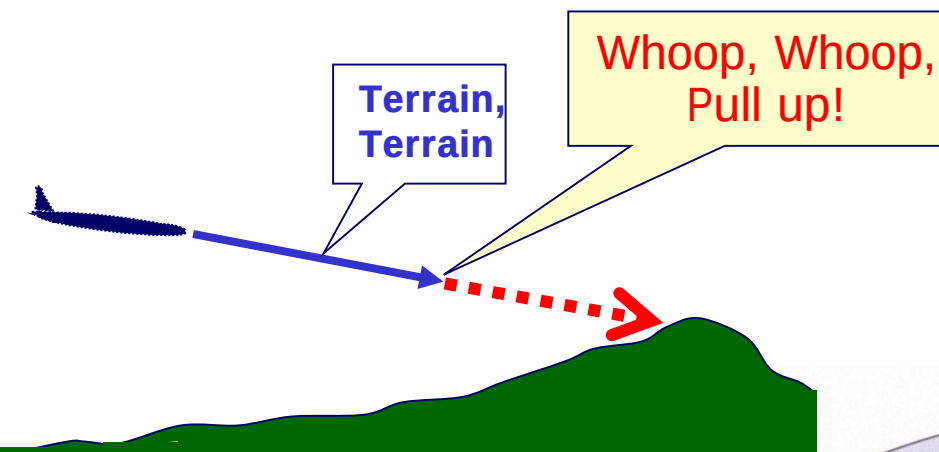
2. 人と機械の「意図の対立」

異なる意図のもとで制御された水平安定板と昇降舵

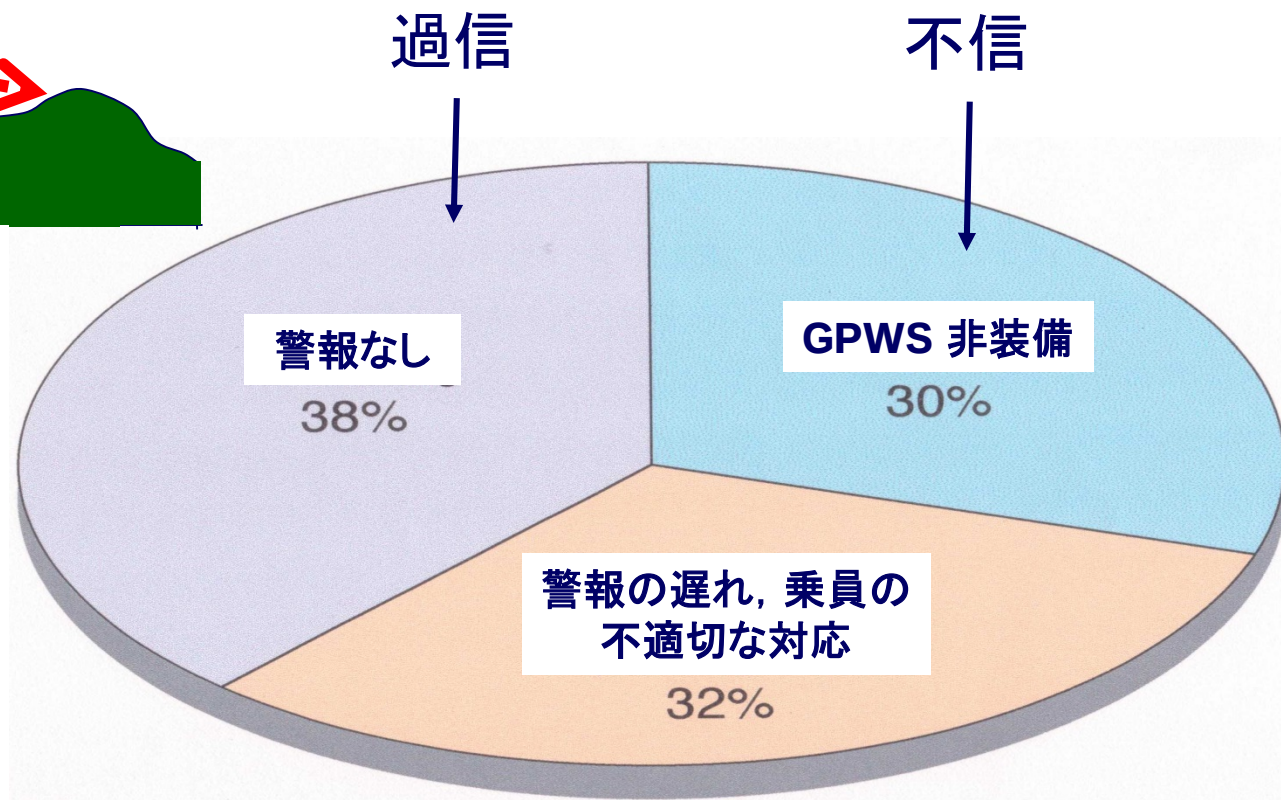


3. 自動化システムへの過信と不信の交錯: GPWS

「いざというときは警報を発して教えてくれる」はずだが...

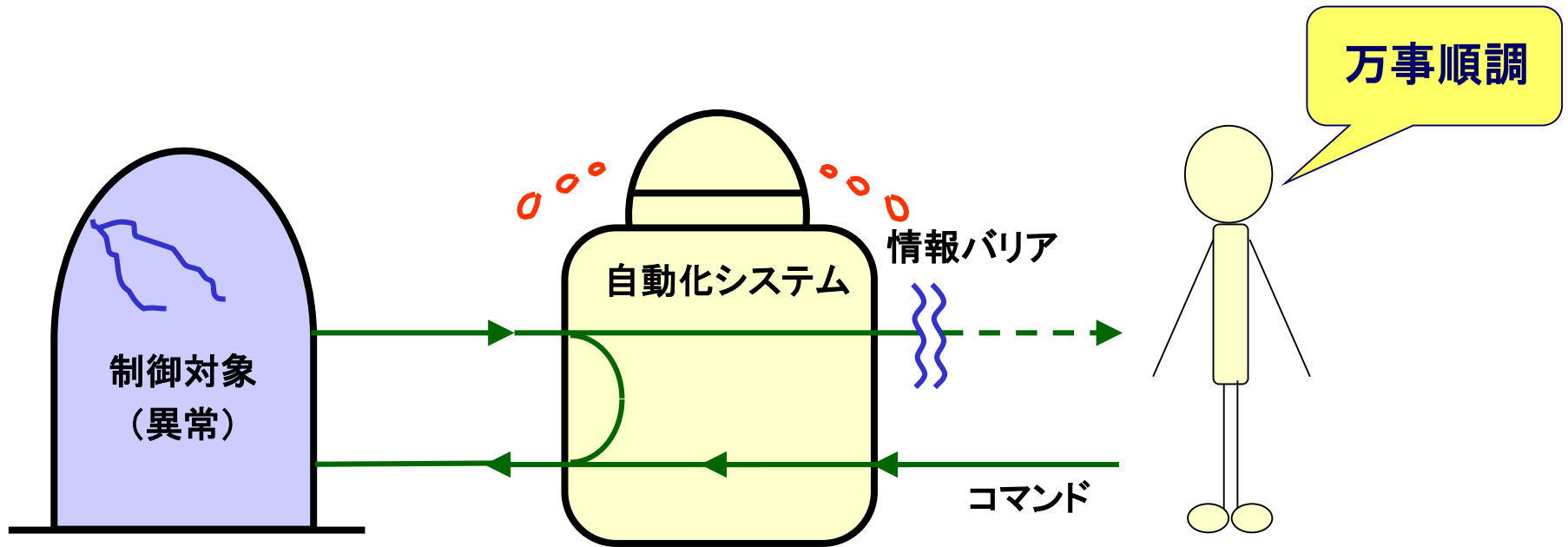


CFIT
(Controlled Flight
Into Terrain)
事故



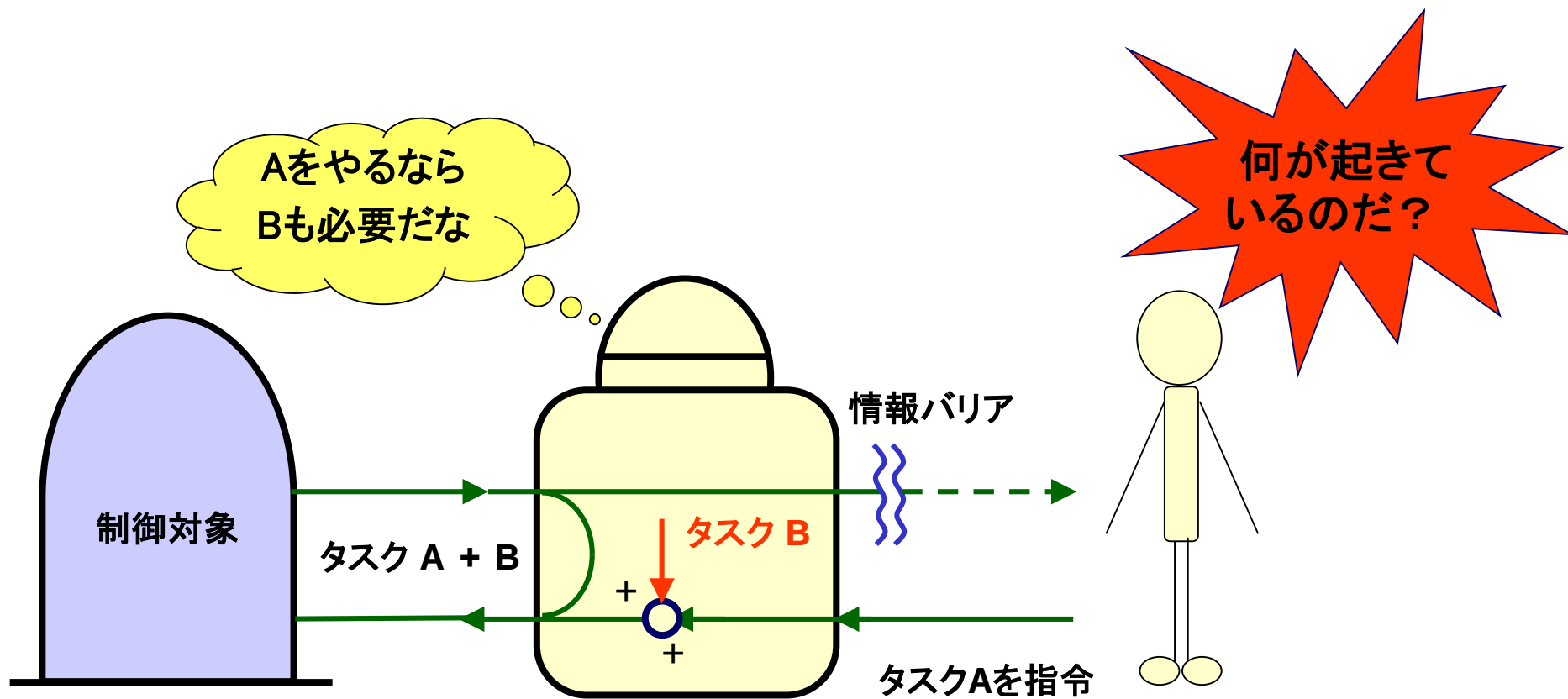
4. 自動化システムによる「異常の隠蔽」

強力な制御能力を持ちながらも寡黙な自動化システム



5. 高機能システムのわかりにくさ

機械のものの見方・考え方 $\neq$ 人のものの見方・考え方

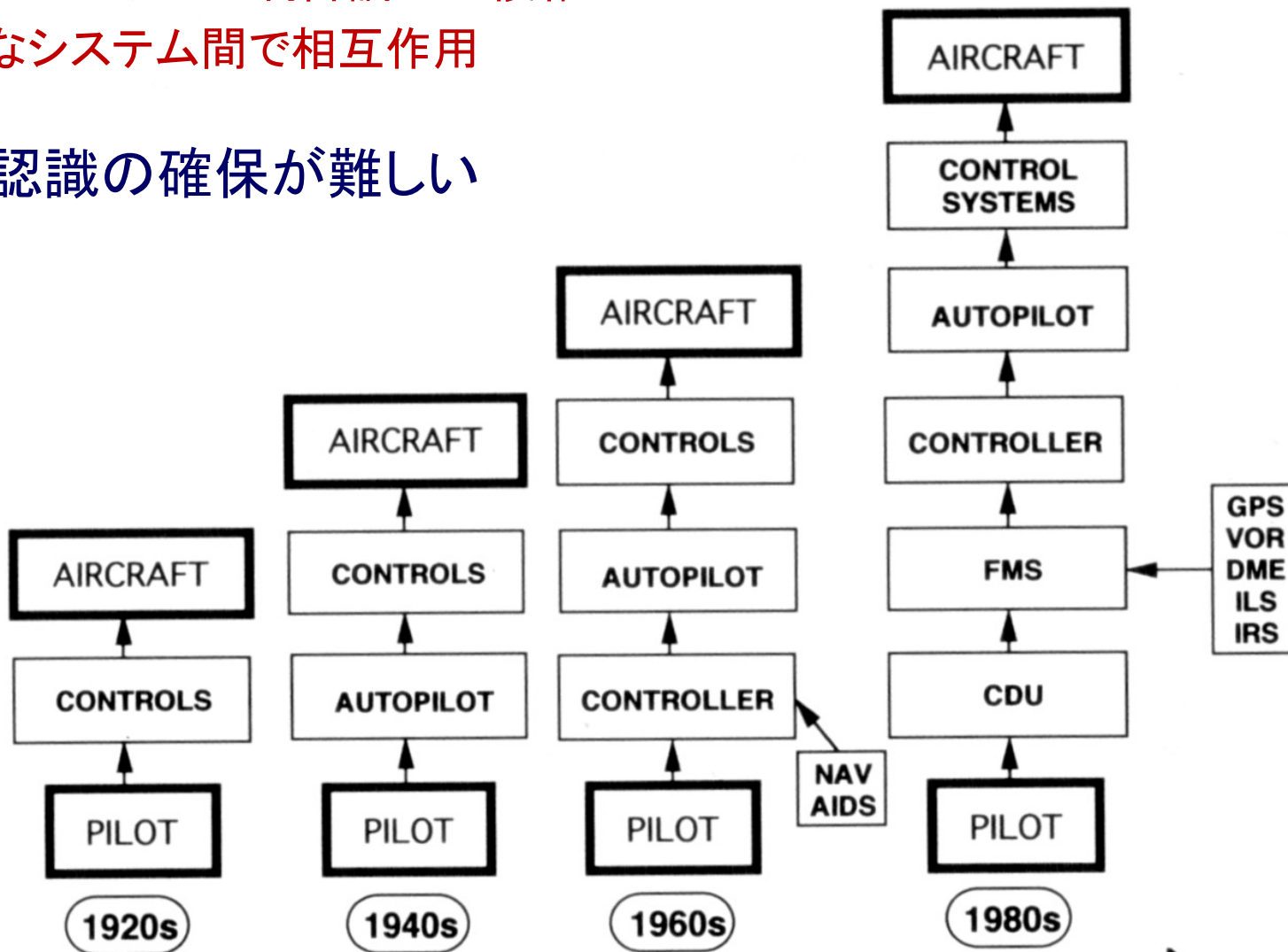


(稲垣 2012)

高度自動化がもたらす「人の周辺化」

- 自動化システムの制御論理が複雑
- 様々なシステム間で相互作用

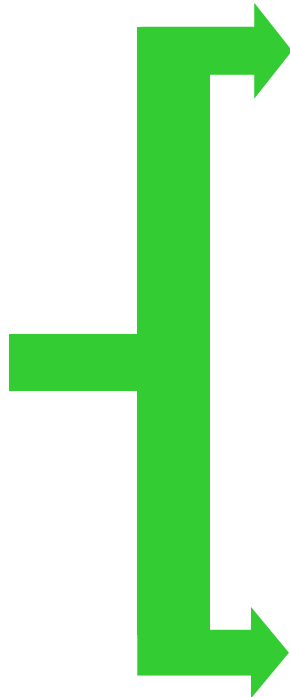
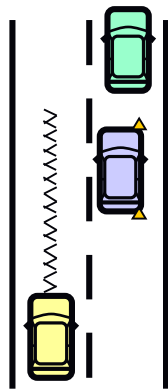
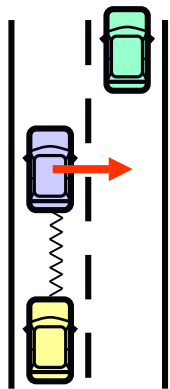
状況認識の確保が難しい



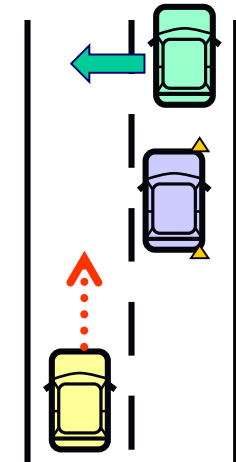
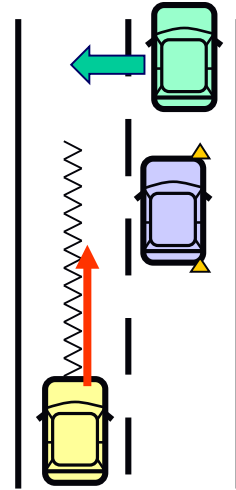
(Billings 1997)

ACCは作動しているものと思っていたが...

高速域 ACCなら
先行車ロストでも
制御継続

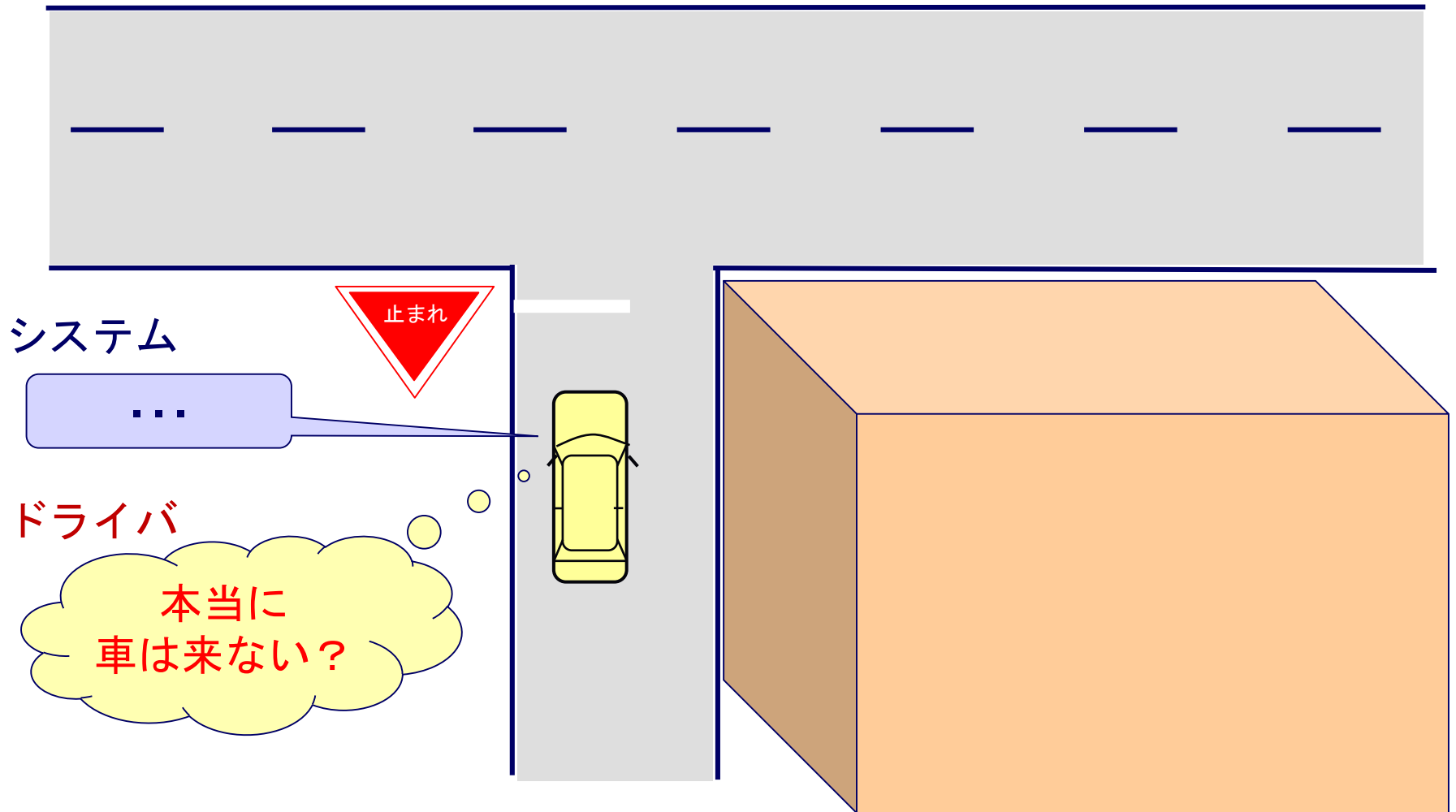


低速域ACCなら
先行車ロスト時に
制御解除



- 作動状態(オン／オフ)を誤解
- 作動モードを誤解(モードコンフュージョン)

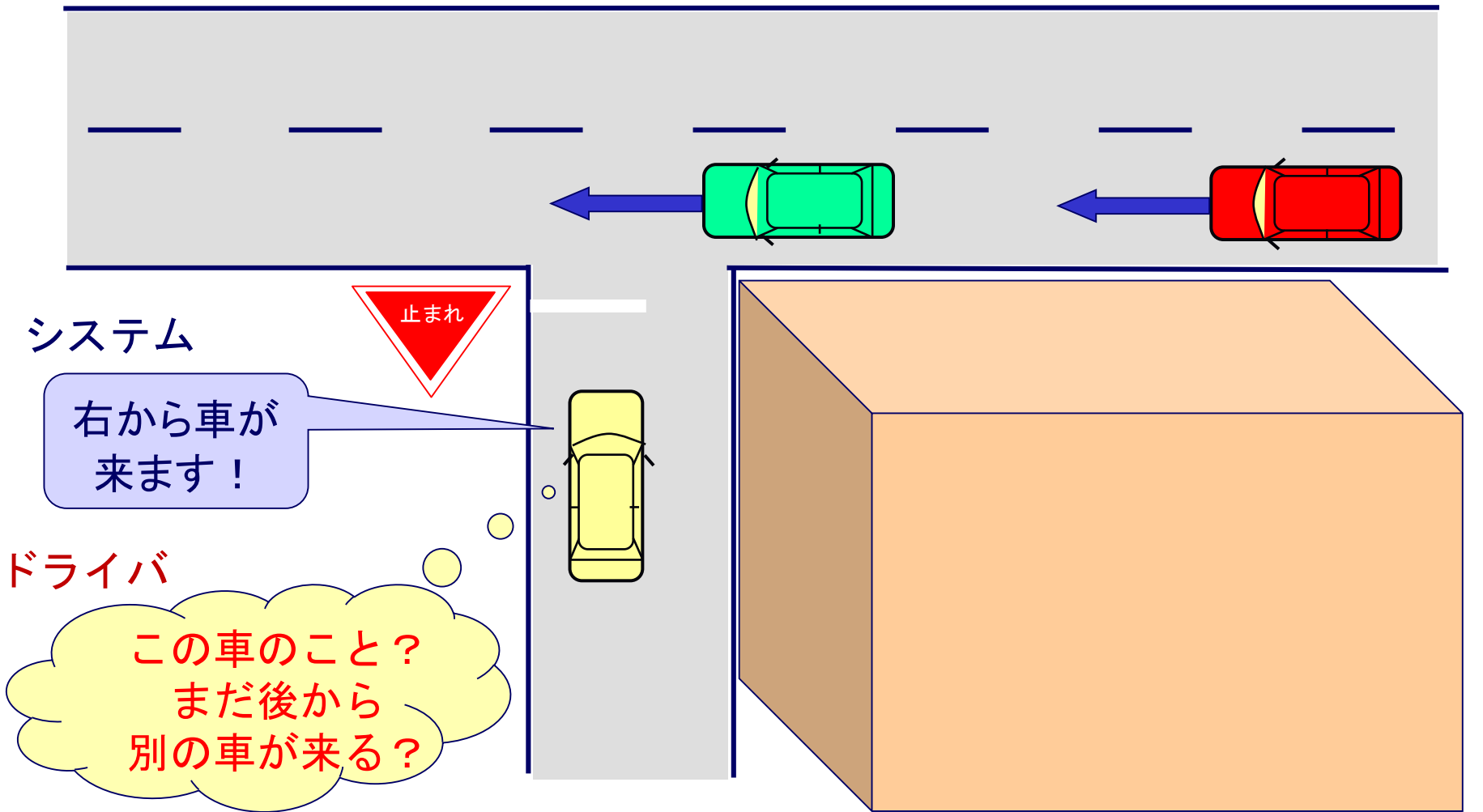
注意喚起も警報も出ていないから大丈夫？



- システムは作動している？
していない？

(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

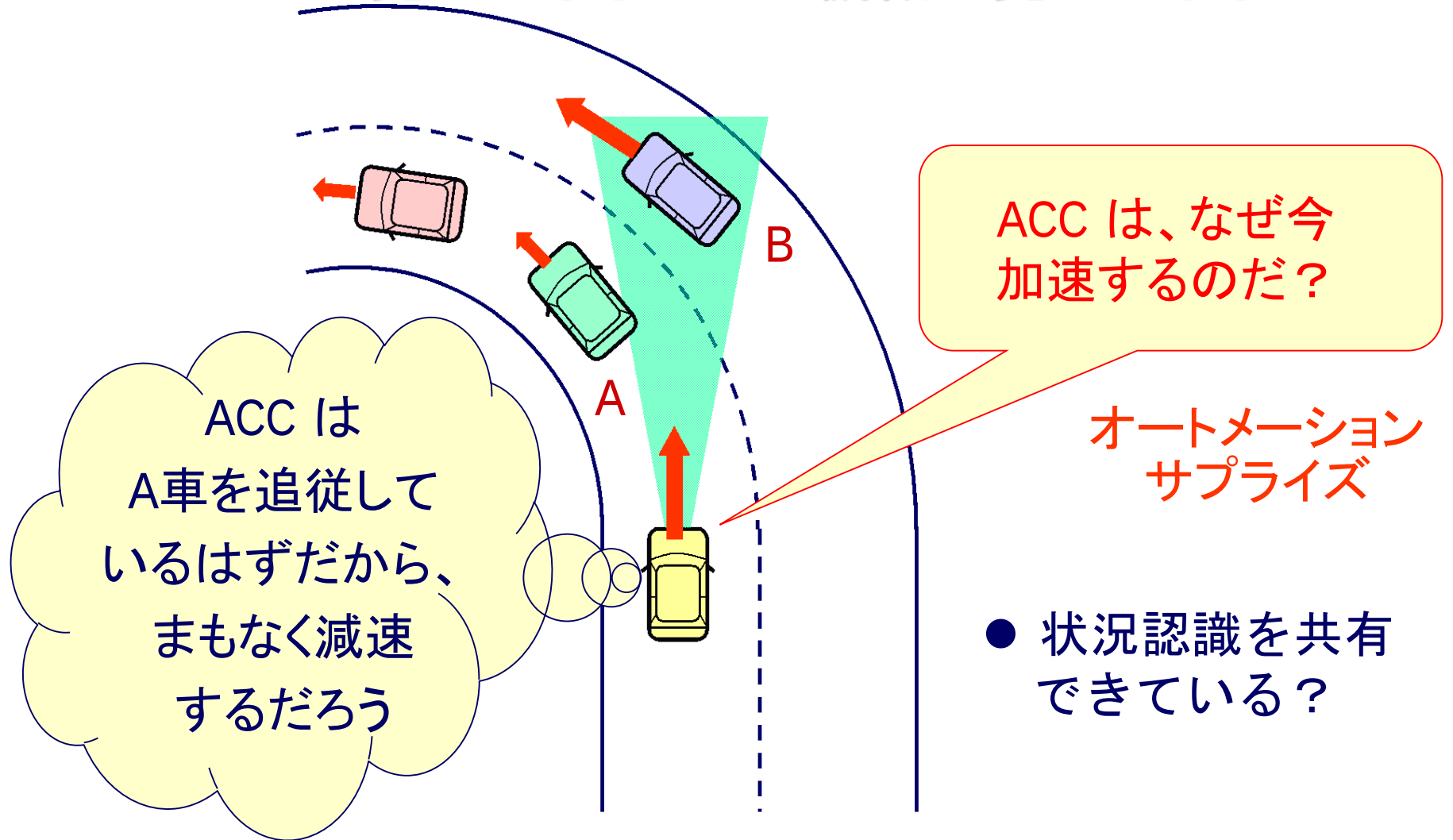
情報が複数とおりに解釈できると...



- システムの判断の根拠は何？

(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

人が見ているもの ≠ 機械が見ているもの



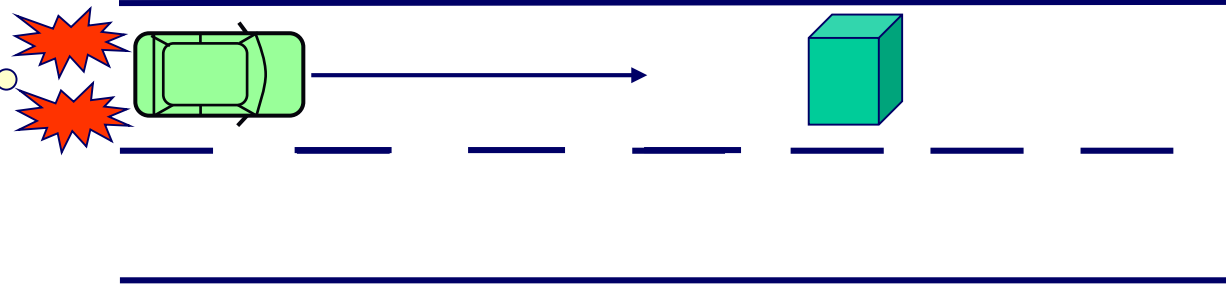
実は、ACC が見ているのは B車

(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

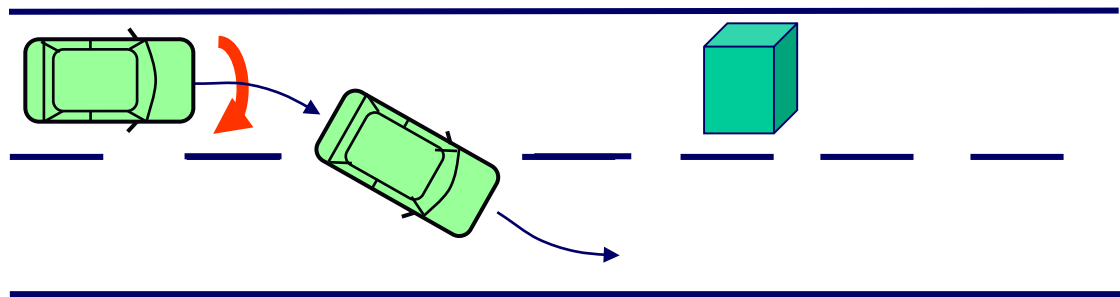
「人が見ているもの = 機械が見ているもの」だが...

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



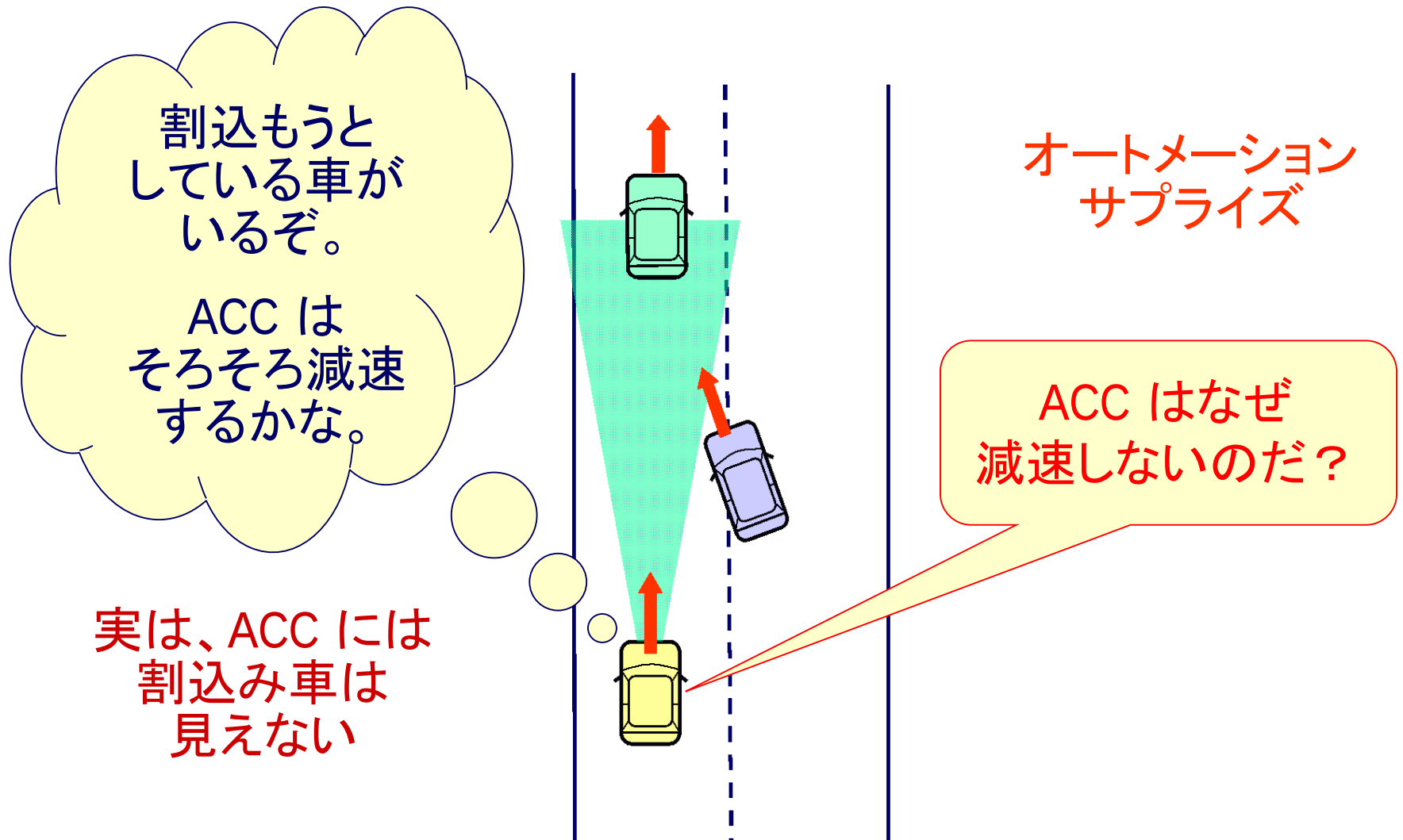
操舵で衝突
回避しよう



- これから何をしようと考えている？
(意図)

(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

機械の能力限界が分からないと...



- 能力限界はどこにある？

(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

人と機械の共生に必要な2種類の HMI

(1) Human Machine Interface

人が機械を知る

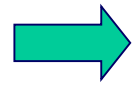
- ➡ 機械が何を考え、何をしようとしているかが分かる
- ➡ 機械への過信・不信の防止

- － 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

人と機械の共生に必要な2種類の HMI

(2) Human-Machine Interaction

機械が人を知る



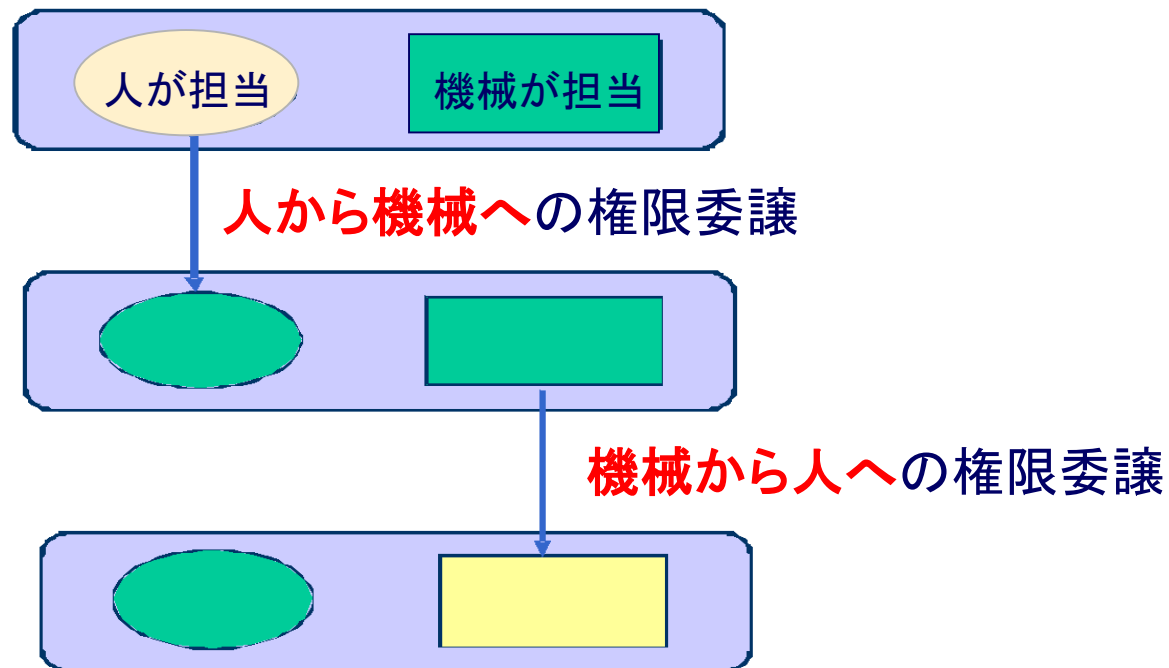
人の心身状態や環境条件に応じて
人への支援形態を変える

(例) 人による制御が適切に行われなければ、
機械が介入して安全を担保する

- 人と機械の役割を固定化せず、動的に変更
- 人と機械が権限と責任をどのように共有し、
どのようなときに権限を一方から他方へ委譲するか
- 機械がその判断をしてもよいか、人でなければならないか

権限委譲

(1) 誰から誰への権限委譲？

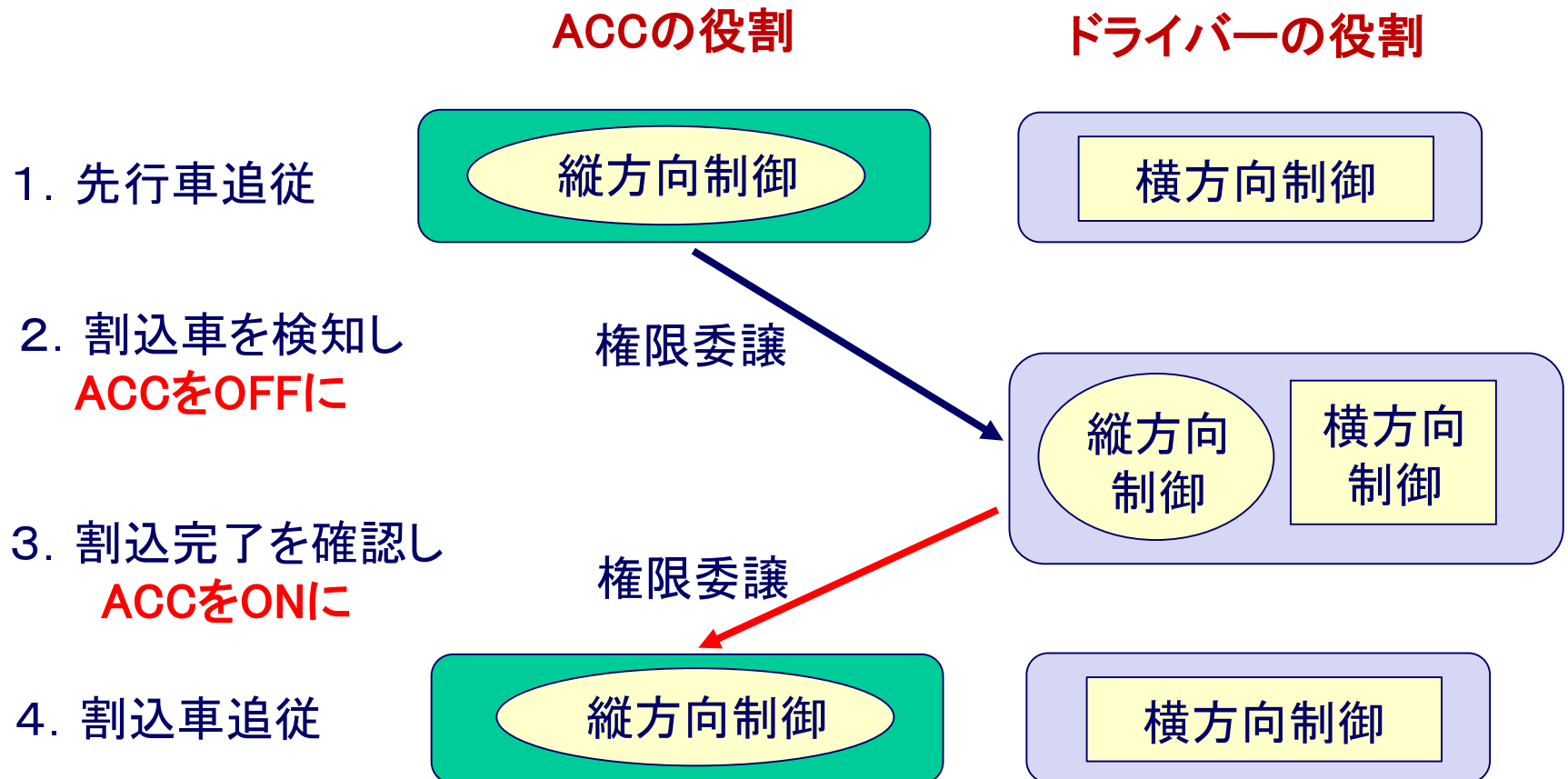


(2) 権限委譲を決定・実行するのは誰？

- 人
- 機械 ← 要注意

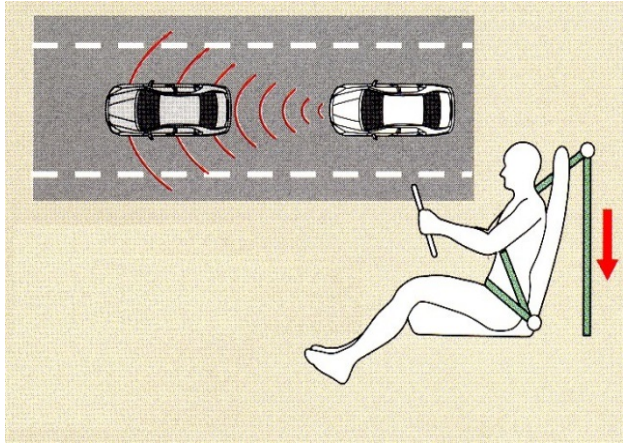
人の判断による権限委譲

ACC を使用して先行車を追従中、隣接車線から割込意図を示す車に気づき、ACC を解除。その車の割込みを許して車間間隔を調整した後、再び ACC をエンゲージ。



機械の判断に基づく権限委譲

鉄道: ATS-P

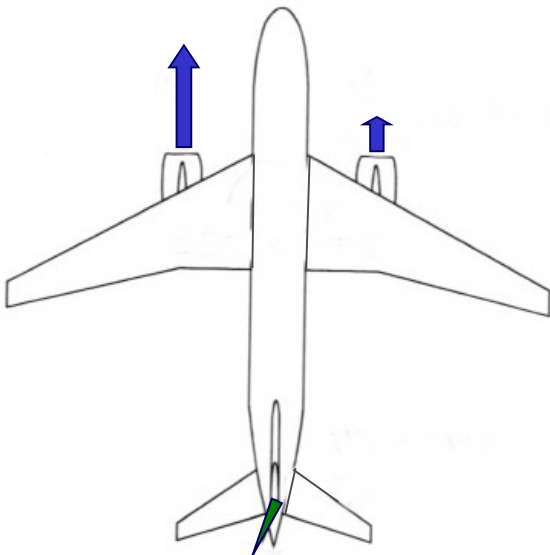


自動車: Advanced Emergency Braking System (AEBS)

先行車への衝突が切迫しているにも関わらず
ドライバーがブレーキ操作を行わないとき、
シートベルトを巻上げて自動的にブレーキ

航空機: Thrust Asymmetry Compensation (TAC)

エンジン推力のアンバランスから生じる
ロール／ヨーのつり合いを監視しており、
不釣り合いが生じたときにラダーを制御



自動運転のレベル (SAE: 2014)

走行環境を監視するのはドライバ

1	Driver Assistance	システムが縦方向制御あるいは横方向制御の一方を担当。ドライバは、システムが担当しない運転操作を担当。
2	Partial Automation	システムが縦方向制御と横方向制御のいずれも担当。ドライバは、システムが担当しない運転操作を担当。

走行環境を監視するのはシステム

3	Conditional Automation	システムが車両制御のすべてを担当。システムがドライバに制御の交代を求めたいときは、十分な時間余裕をもってドライバに要請。ドライバはその要請に適切に対応。
4	High Automation	システムが車両制御のすべてを担当。システムからの制御の交代を要請に対するドライバの対応がないとき、システムは車両制御を継続。
5	Full Automation	ドライバが対応可能なすべての道路条件、走行環境条件のもとで、システムがすべての車両制御を担当。

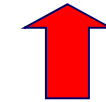
レベル1の自動運転 (Driver Assistance)

システムが縦方向制御あるいは横方向制御の一方を担当。
ドライバは、走行環境を監視しながら、システムが担当しない
運転操作を担当。



ACC : 縦方向制御

ドライバ: LKA を利用しながら
横方向制御。
必要に応じてシステムの
制御に介入



システムの動作原理や能力限界
に関する正確な理解が必要

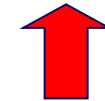
レベル2の自動運転 (Partial Automation)

システムが縦方向制御と横方向制御のいずれも担当。
ドライバは、走行環境を監視しながら、システムが担当しない
運転操作を担当。



システム： ACC、LCS、AEBS、ESC 等を
駆使しながら車両を制御

ドライバ： システムを監視。
必要に応じて制御に介入



- システムの動作原理や能力限界に関する正確な理解が必要
- サブシステム間の相互干渉にも留意が必要

手放し運転中であっても、
いつでも介入できる姿勢

(今の免許制度で大丈夫?)

レベル2の自動運転において、ドライバは・・・



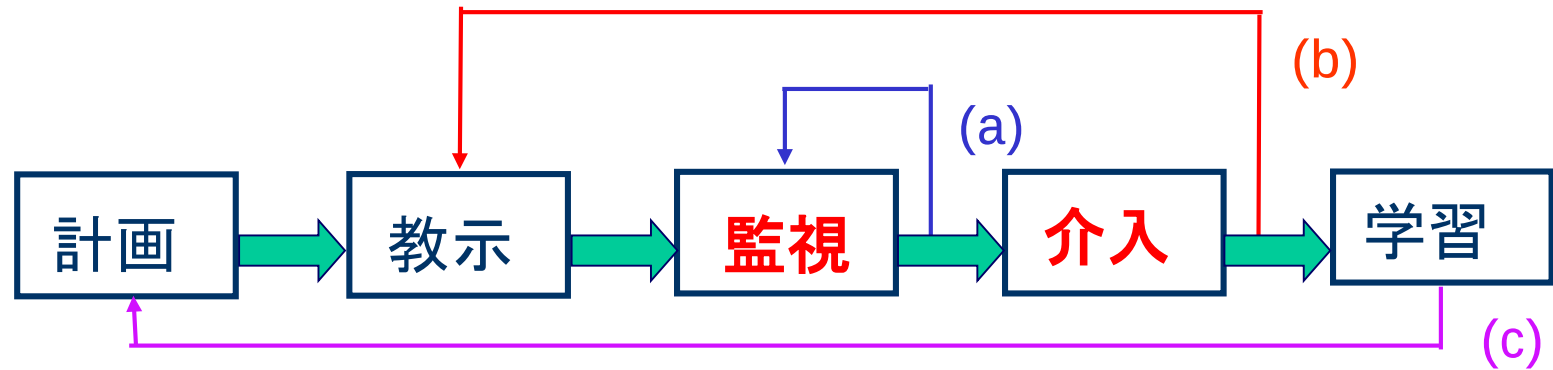
ITFVHA, Helmer, October 2012

Photo: BMW

監視制御(supervisory control)

- 人が何をなすべきかを決めてそれをシステムに指示。
- システムはそ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なものかどうかを監視。

監視制御： 身体には楽だが、精神的には辛い



「監視」のむずかしさ

- 高信頼のシステムゆえ、トラブル発生は稀
- 万一の事象の発生に備えての「監視」は単調で退屈

「介入」のむずかしさ

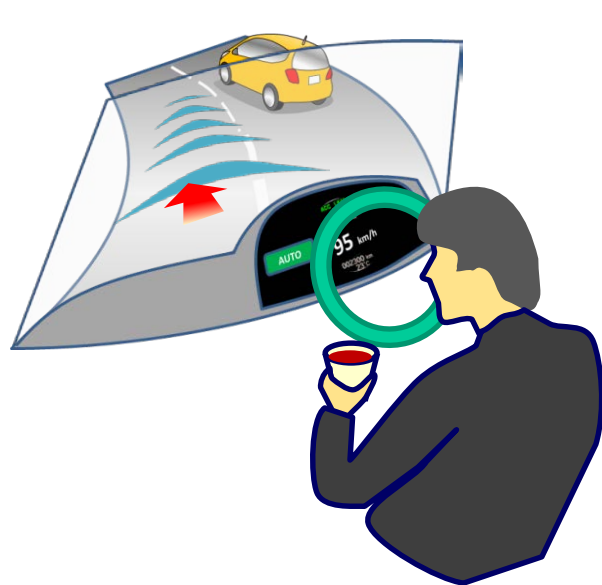
- 異常発生時には、不十分な時間と情報のもとでも、適時の「介入」が必要
- 「想定外事象」に対する手順書はない

レベル2の自動運転に必要なものは 監視制御を楽しいものに変える HMI

- つぎのような手がかりを与える HMI が欲しい
 - 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
- 
- **ドライブを続ける中で、機械のことが自然に分かるようになる**
 - 不適切な信頼（不信／過信）の低減
 - 不適切な依存（過度の依存）の低減
 - モード認識喪失やオートメーションザプライズの低減

レベル3の自動運転 (Conditional Automation)

システムは、走行環境を監視しながら車両制御のすべてを担当。システムがドライバに制御の交代を求めたいときは、十分な時間余裕をもってドライバに要請。ドライバは、その要請に適切に対応。



運転していないが、
監視はしている



運転しておらず、
監視もしていない

レベル3の自動運転において、ドライバは・・・



「移動時間を有効に
活用できますよ」

Photo: Volvo

- **結果予見、結果回避**の義務からも解放される？
- 事故が起こっても**過失責任**を問われることはないのか？
- いつでもシステムからの運転交代要請に対応できるようにしている状況で、仕事に集中／リラックスできる？

レベル3の自動運転における制御の引継ぎ

システムは、走行環境を監視しながら車両制御のすべてを担当。
システムがドライバに制御の交代を求めたいときは、十分な時間
余裕をもってドライバに要請。ドライバは、その要請に適切に対応。

10秒後に自動モードを
解除します。
制御を引継いでください



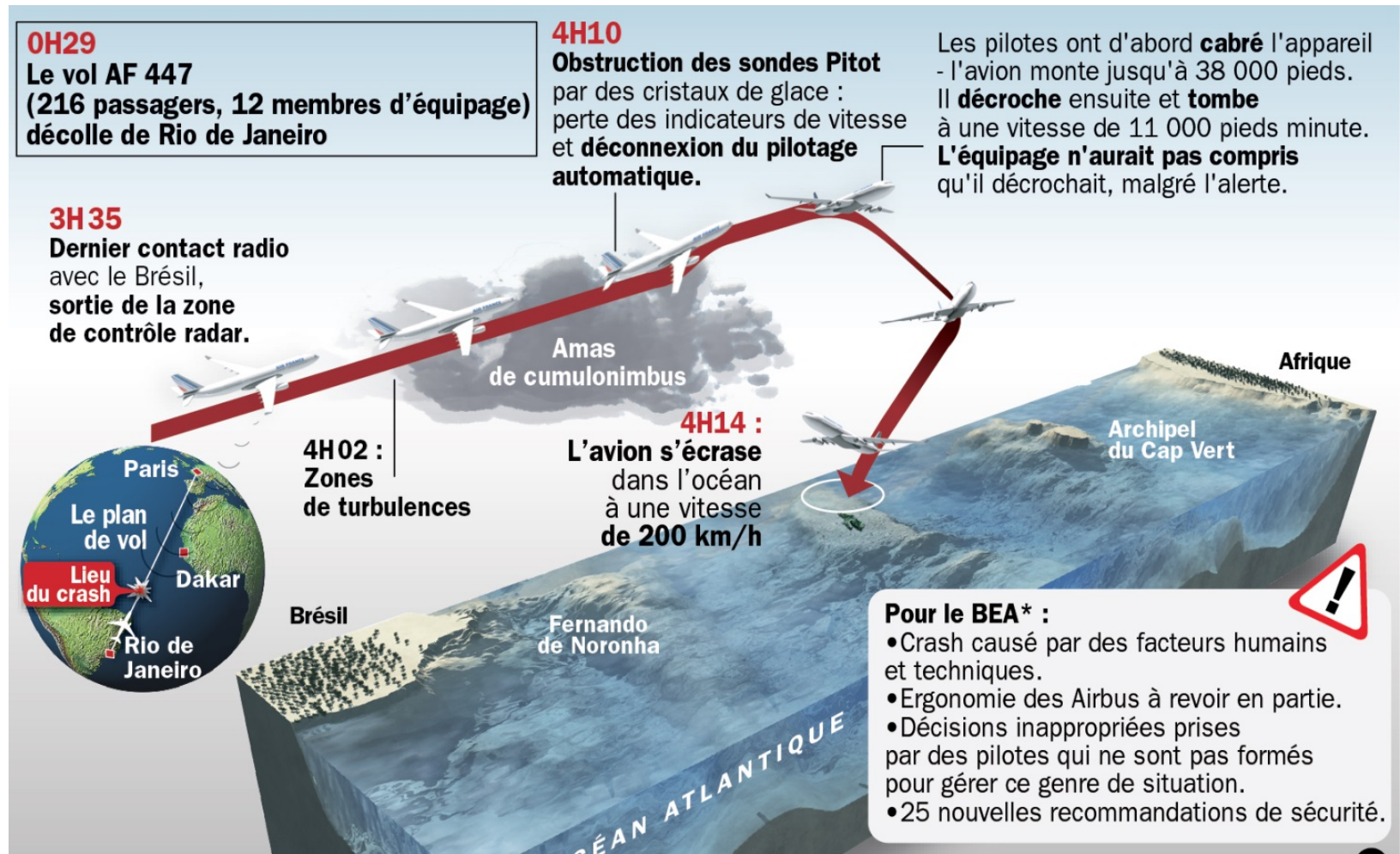
制御権を
システムから人へ
円滑・安全に移したい

機械から人への制御の引継ぎは失敗することがある

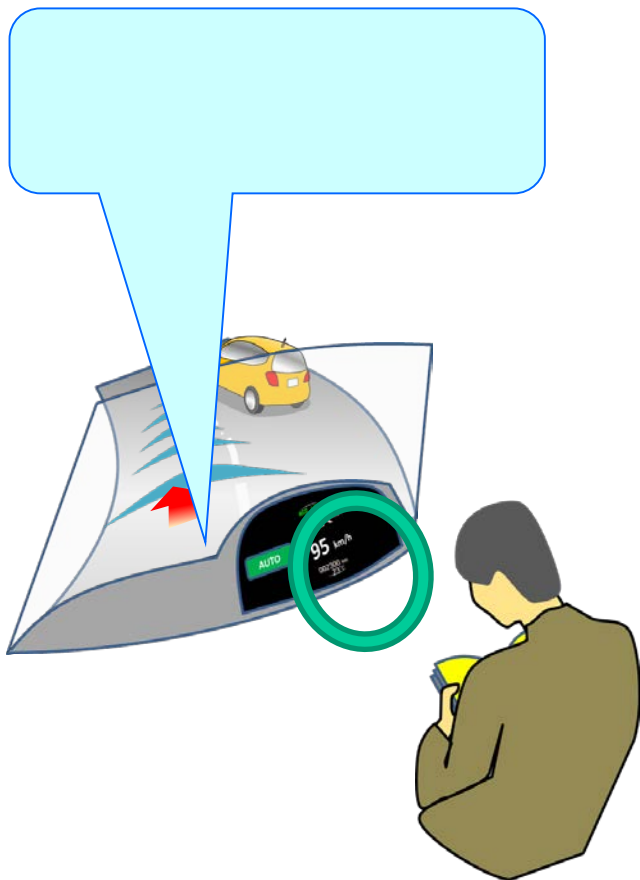
エールフランス447便 (A330-200) 墜落 (2009.06)

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。



システムはどのようにドライバへ制御の引継ぎを要請？



運転から解放された
ドライバは
監視もしていない
かもしれない

1. 「10秒後にシステム機能限界の発生が予測されます」と注意喚起
2. 「10秒後にシステム機能限界の発生が予測されます。今、自動モードを解除してよろしいですか？」と提案
3. 「10秒後にシステム機能限界の発生が予測されます。その時点で自動モードを解除します」と宣言
4. 「自動モードを解除しました」と事後報告
5. 自動モードを解除しても何も知らせない

自動化レベル (LOA)

人に最終決定権あり

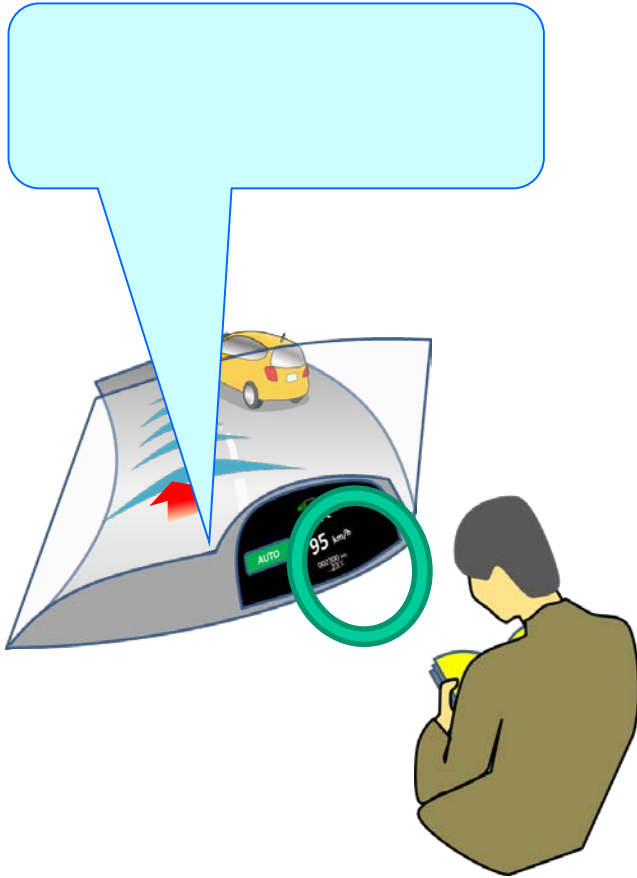
- (1) コンピュータの支援なしに、すべてを人が決定・実行。
- (2) コンピュータはすべての選択肢を提示し、人はそのうちのひとつを選択して実行。
- (3) コンピュータは可能な選択肢をすべて人に提示するとともに、
ひとつを選んで提案。それを実行するか否かは、人が決定。
- (4) コンピュータは可能な選択肢の中からひとつを選び、それを人に提案。
それを実行するか否かは、人が決定。
- (5) コンピュータはひとつの案を人に提示。人が了承すれば、コンピュータが実行。

機械に最終決定権あり

- (6) コンピュータはひとつの案を人に提示。
人が一定時間内に実行中止を指令しない限り、コンピュータはその案を実行。
- (6.5) コンピュータはひとつの案を人に提示すると同時に、その案を実行。
- (7) コンピュータがすべてを行い、何を実行したか人に報告。
- (8) コンピュータがすべてを決定・実行。人に問われれば、何を実行したかを報告。
- (9) コンピュータがすべてを決定・実行。何を実行したかを人に報告するのは、
報告の必要性をコンピュータが認めたときのみ。
- (10) コンピュータがすべてを決定し、実行。

(Sheridan 1992; Inagaki et al. 1998)

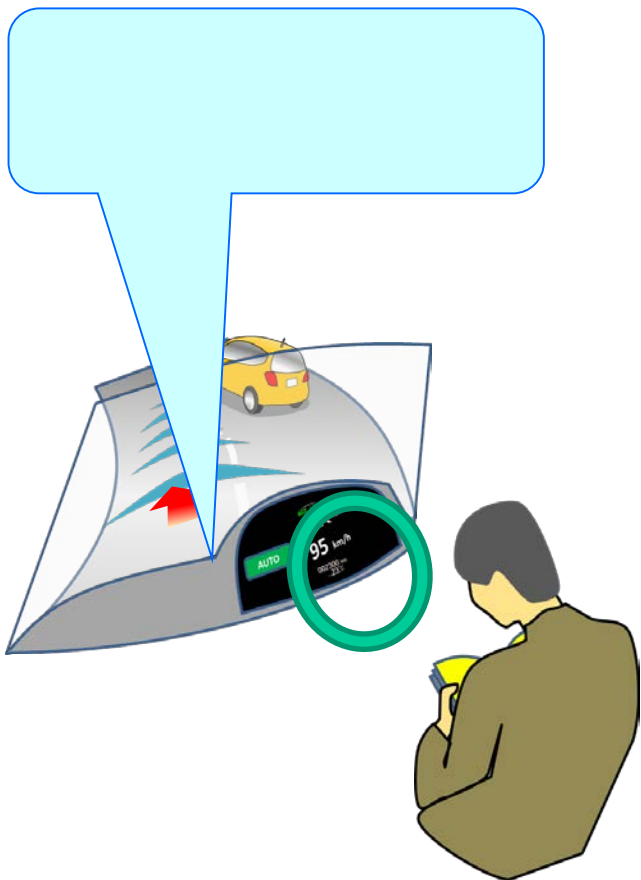
システムはどのようにドライバへ制御の引継ぎを要請？



運転していないし
監視もしていない

1. 「10秒後にシステム機能限界の発生が予測されます」と注意喚起 (LOA=4)
2. 「10秒後にシステム機能限界の発生が予測されます。今、自動モードを解除してよろしいですか？」と提案 (LOA=5)
3. 「10秒後にシステム機能限界の発生が予測されます。その時点で自動モードを解除します」と宣言 (LOA=6)
4. 「自動モードを解除しました」と事後報告 (LOA=7)
5. 自動モードを解除しても何も知らせない (LOA=9)

システムからの制御交代要請にドライバが応えないとき



2. 「10秒後にシステム機能限界の発生が予測されます。今、自動モードを解除してよろしいですか？」と提案(LOA=5)

ドライバから「了解」が得られないとき、権限委譲は不可能と判断し、システムはその機能の範囲内で車両制御を継続



運転していないし
監視もしていない

レベル4の自動運転
(High Automation)

レベル5の自動運転 (Full Automation)

ドライバーが対応可能なすべての道路条件、走行環境のもとでシステムがすべての車両制御を担当。



有人運転ではあるが、
「ドライバー」が乗らない車
(ロボットタクシー)

ウィーン条約(ジュネーブ条約)
との関係をどのように整理？

車両の運転者は、正当な注意義務を
適正に行使でき、いかなる操作で
あっても必要なものはいつでも実行
できるよう、車両を常に制御できて
いなければならない

ドライバの権限と責任

【ドライバ主権】

運転はあくまでもドライバが主体となって行うもの

道路交通に関するウィーン条約

第8条(運転者)

- 1 あらゆる走行中の車両か連結車両には、運転者がいなければならない。
- 5 運転者は、**いついかなるときも、車両を制御できなければならない。**

第13条(速度と車両間の距離)

- 1 車両の運転者は、**正当な注意義務を適正に行使でき、いかなる操作であっても、必要なものはいつでも実行できるよう、つねに車両を制御できていなければならない。**

上のような考え方で、本当にドライバを救えるのか？

自動運転における「ドライバ」の位置づけは・・・



Photo: Google

- 「タクシーの乗客」のように、何をしてもよいのか？
- システムを監視する責任を負っているのか？
- いざというときには自動運転への介入が求められるのか？
- 特別な講習・訓練・運転免許が求められるのか？
- 従来の運転免許でよいのか？

鉄道：「運転士は列車に乗っていないといけないか？」

人間中心の自動化： 航空分野

人間は運航安全に最終責任を負う。

したがって： 人間は指揮権を持たねばならない。

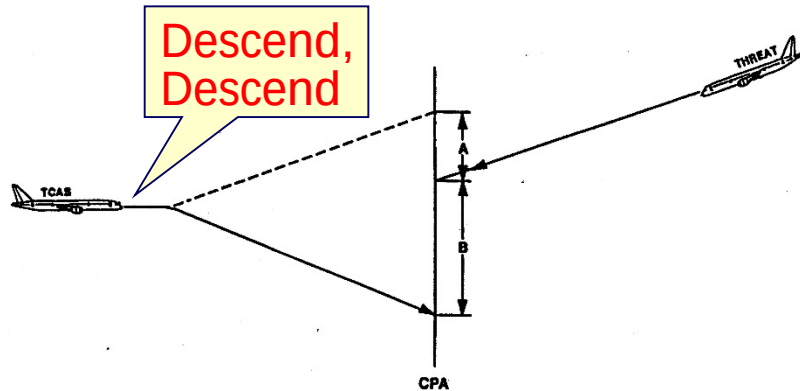
そのためには：

- (1) 人間は決定に直接関与していなければならない。
- (2) 人間には情報が適正に提供されなければならない。
- (3) 自動化システムの様子を人間がモニタできるようになっていなければならない。
- (4) 自動化システムも人間をモニタできるようになっていなければならない。
- (5) 自動化システムの行動は人間にとって予測可能なものでなければならない。
- (6) 人間と自動化システムはたがいに相手の意図を知ることができなければならない。

(Billings 1997)

人と機械の共生をデザインする上での視点:

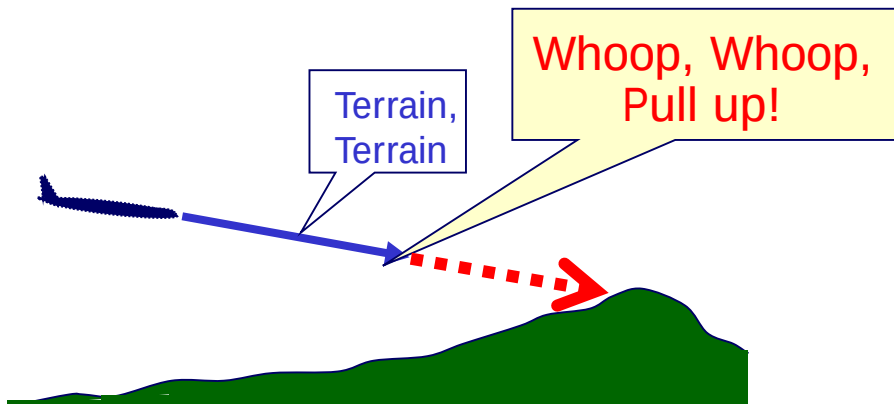
(1) 時間余裕



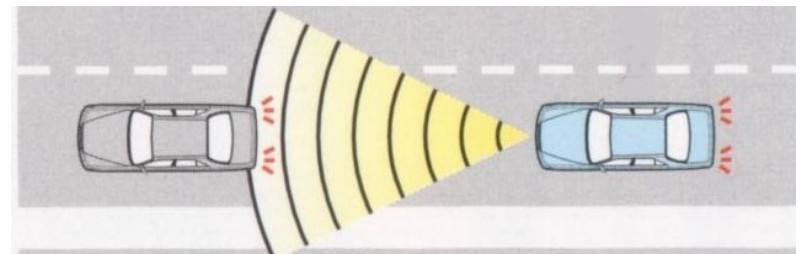
15~35 秒

警報が発せられてから回避
操作実行までの時間余裕

20~30 秒



1~2 秒



人と機械の共生をデザインする上での視点:

(2) 運転者の知識・技量の質

- 交通移動体の運転者
 - 職業運転者 (例) パイロット、電車の運転士、バス／トラックのドライバなど
 - 非職業運転者 (例) 一般乗用車のドライバなど
- 非職業運転者に対して仮定できないもの
 - 自動化システムに関する詳細な知識
 - 高度な運転技量
 - 定期的・継続的な教育・訓練

(1)、(2): 航空機を対象とした「人間中心の自動化」と、自動車を対象とした「人間中心の自動化」は、同一ではない

鉄道運転士にとって状況認識の確保はむずかしい

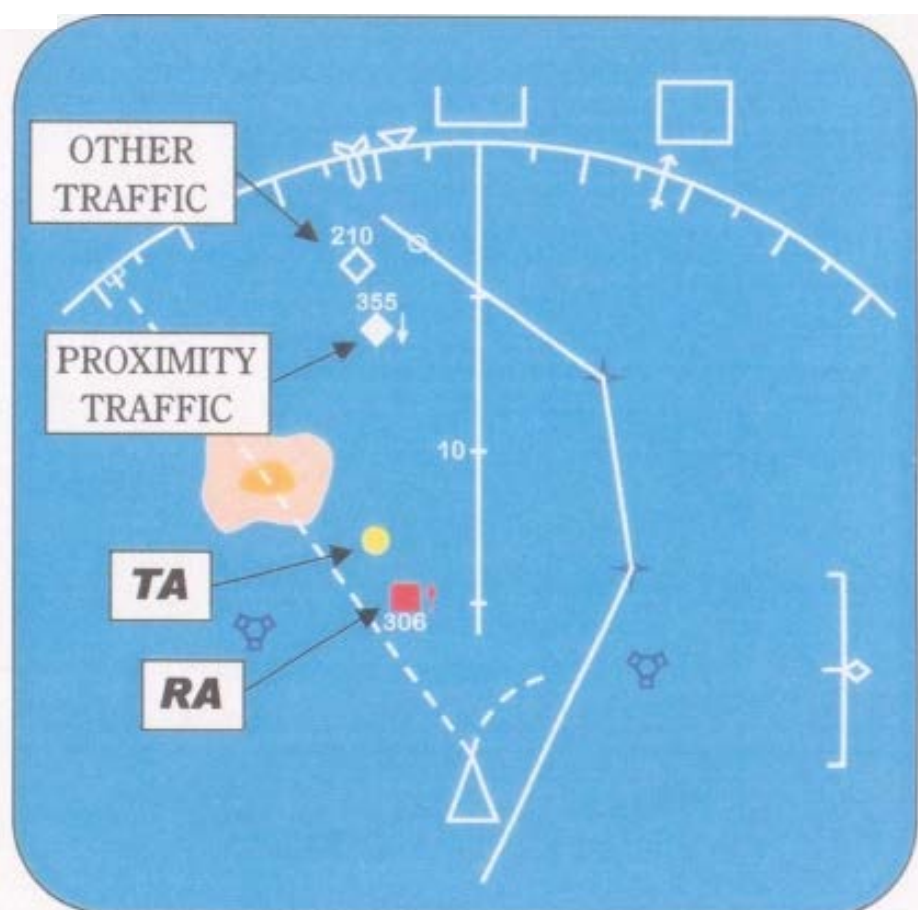
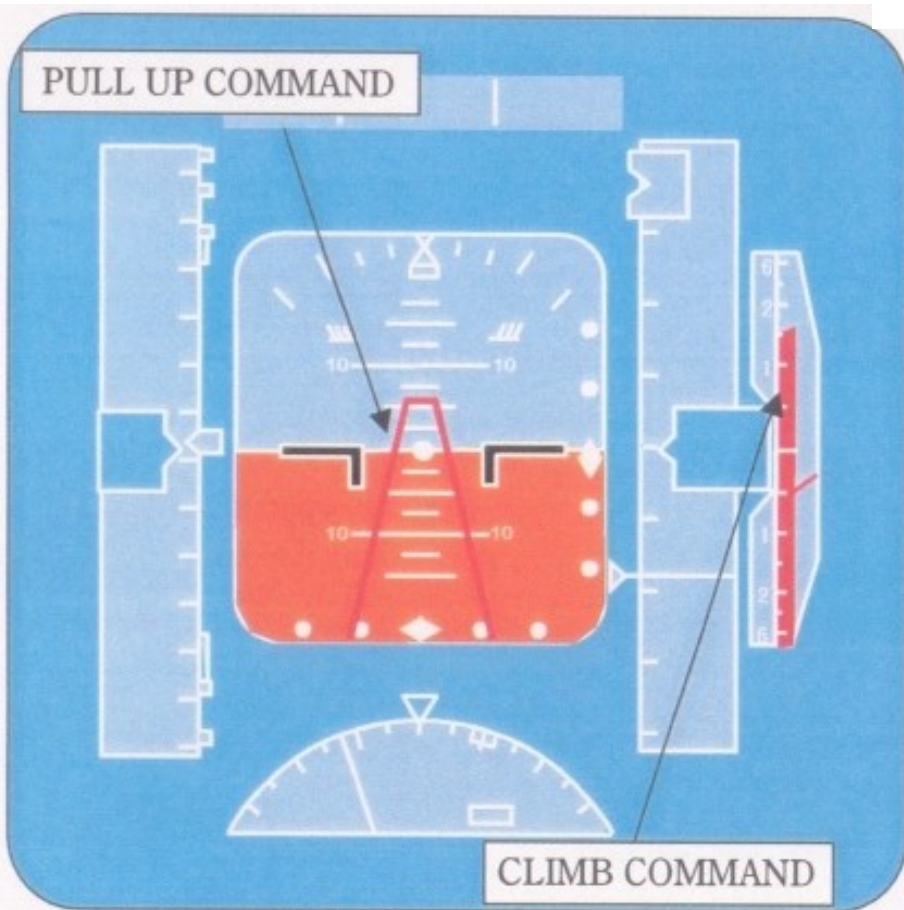
前方に注意していても、遠くまで見通せるわけではない

- 線路上の障害物に気づく頃には衝突が不可避という場合も・・・
- 衝突回避の手段は制動のみ（「操舵による回避」は不可能）
- それだけに、走行環境に関する十分な情報が必要

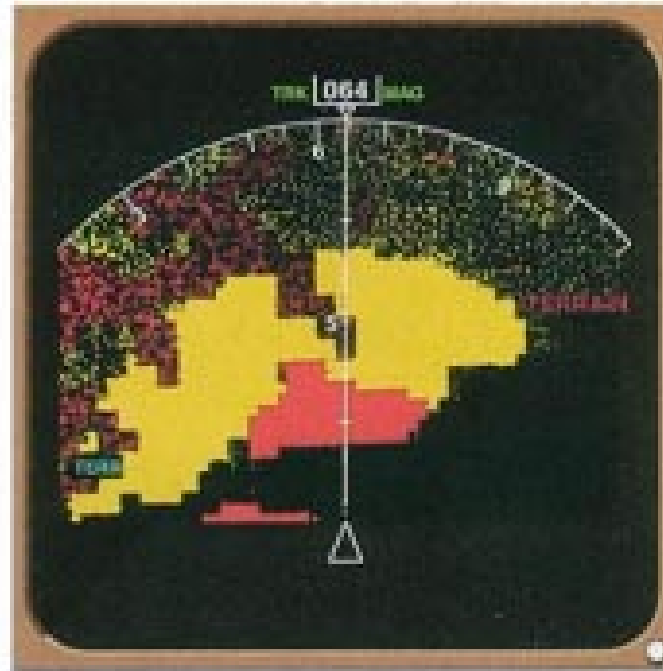
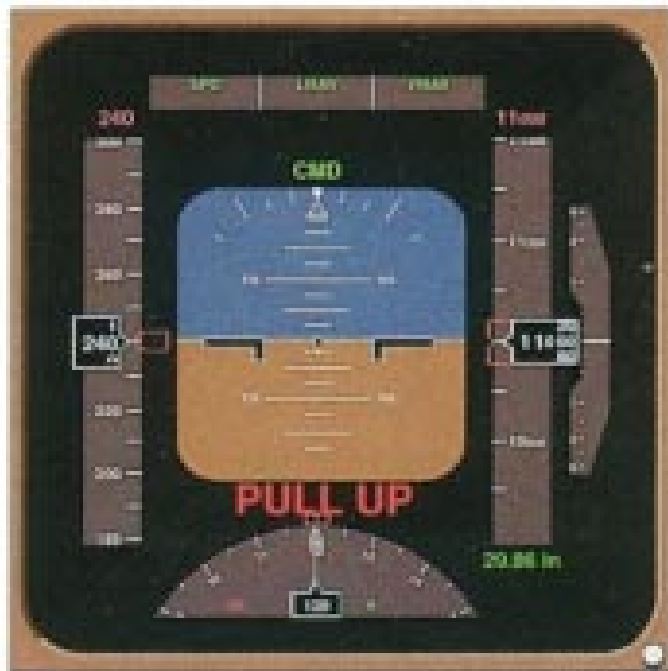
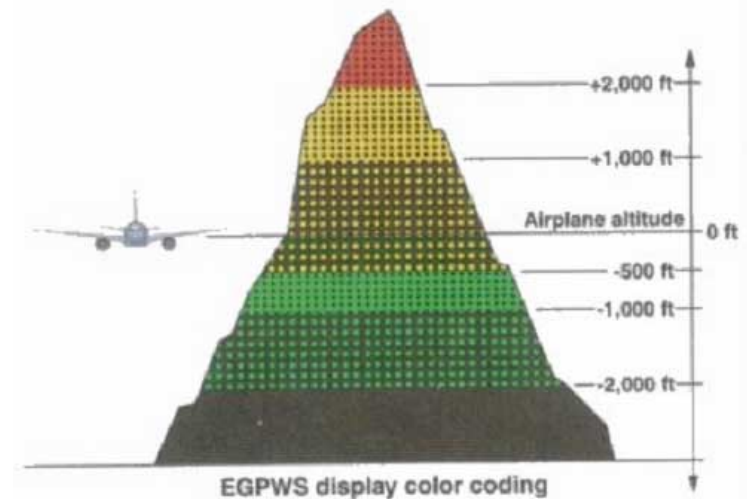
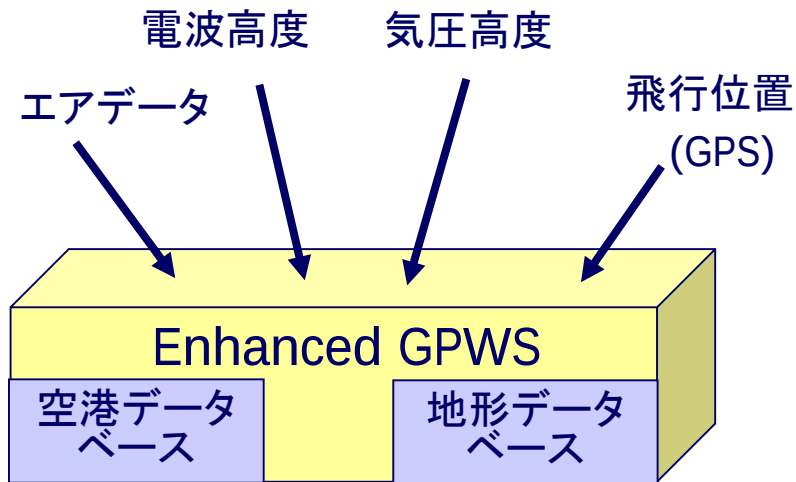
運転士には十分な情報は提供されている？

- 航空機に対する前方障害物は、他の航空機、脅威となる地形
 - TCAS 他の航空機的位置・動静、衝突回避操作などを提示
 - EGPWS 脅威となる地形の位置、衝突回避操作などを提示
- 今の鉄道の運転席では、車両や機器の状態の表示が主体
 - ・ 走行環境や他の列車に関する情報はほとんどない

航空機衝突防止システム (TCAS)



機能強化型対地接近警報システム (Enhanced GPWS)



(Bresley & Egilsrud 1997)

航空、自動車、鉄道の比較: (1) 自動運転の形態

- 自動車: 以下の形態は、状況に応じて使い分けられる
 - レベル1 (Driver Assistance)
 - レベル2 (Partial Automation)
 - レベル3 (Conditional Automation)
 - レベル4 (High Automation)
 - レベル5 (Full Automation)
- 航空機: 自動操縦にはさまざまなモードがあるが、それらは状況に応じて使い分けられる
- 鉄道: 以下の形態のうちのひとつが選択され、固定化される
 - 半自動列車運転 (Semi-automated Train Operation)
 - 添乗員付き自動列車運転 (Driverless Train Operation)
 - 自動列車運転 (Unattended Train Operation)

鉄道における自動運転の形態の選択は、重い課題

航空、自動車、鉄道の比較:

(2) 自動運転システムと直接的に対峙するのは？

- 自動車: 自分自身での移動目的を持っている人
 - 高齢等の理由により運転したくない人
 - 移動に制約や支障を抱えている人
 - 移動中の時間を運転以外のことに使いたい人
 - 運転は嫌いではないが、疲労等で運転したくない時がある人
- 航空機: 移動目的を持っている人の目的を達成させる人
 - パイロット
- 鉄道: 移動目的を持っている人の目的を達成させる人
 - 列車に乗務している運輸係員

航空機、鉄道では、移動体の利用者(乗客)は、
自動運転システムの効用や問題点を実感できない

航空、自動車、鉄道の比較: (3) 移動目的を持つ人は移動体が自動運転されることに納得できる?

- 自動車: 移動目的を持っているのはドライバ自身
 - 自動化の効用(負担軽減、安全性向上、経費節減等)とコスト(システムを利用するための教習・訓練の受講等)のトレードオフの評価・判断に依存
- 航空機: 移動目的を持っているのは乗客
 - 自動化の効用(定時性、安全性、快適性)とコスト(自動化起因の危険性)のトレードオフの評価・判断に依存
- 鉄道: 移動目的を持っているのは乗客
 - 第1項目は航空機に同じ
 - 危険な乗客の排除や非常事態への対応体制に満足するか
 - 非常時に乗客は運行者への協力が求められるか等に依存

鉄道: 第2項目について航空機と同程度の信頼獲得が必要。
第3項目は「乗客」の定義を変えるものゆえ、検討は慎重に。