



何のための自動運転？ 誰のための自動運転？

筑波大学副学長・理事 稲垣 敏之

1. 自動運転のレベル定義：

SAE J3016 の2014年版と2016年版は似て非なるもの

2. SAE J3016 の2014年版と2016年版の不完全性
3. レベル3の自動運転は実現すべき目標たり得ず
4. ドライバーモニタリングの落とし穴
5. 自動運転における人と機械の協調と共生

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、**操縦操作の自動化**

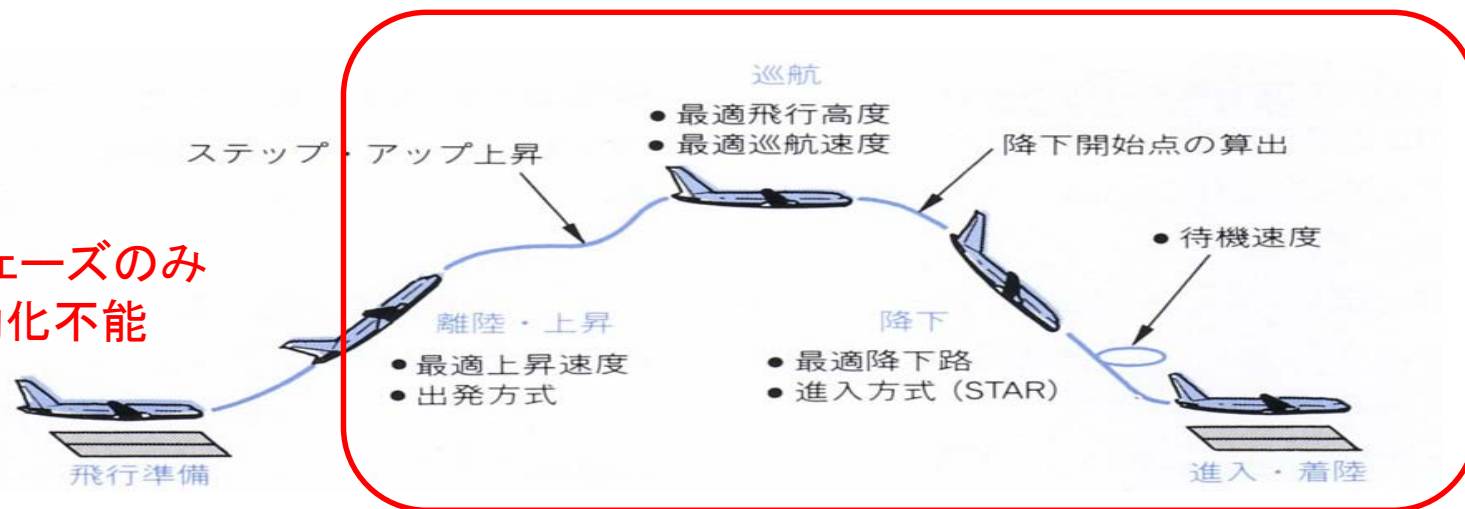


飛行管理も自動化（機体重量や気象条件に合った離陸速度・上昇速度・巡航高度・降下開始点等の決定）

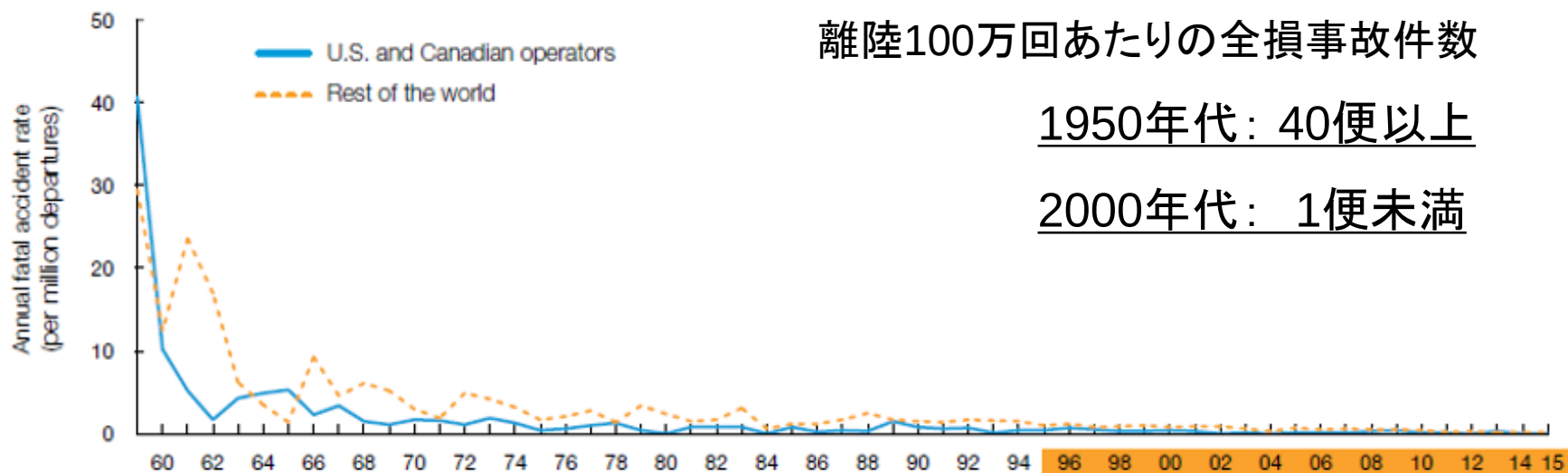
- 年間飛行時間 800-900時間の国際線パイロットの場合、手動操縦は 3時間程度

高い知能と自律性を備えた機械がもたらす光と影(1)

離陸フェーズのみ
自動化不能



自動化



離陸100万回あたりの全損事故件数

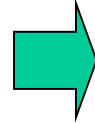
1950年代: 40便以上

2000年代: 1便未満

高い知能と自律性を備えた機械がもたらす光と影(2)

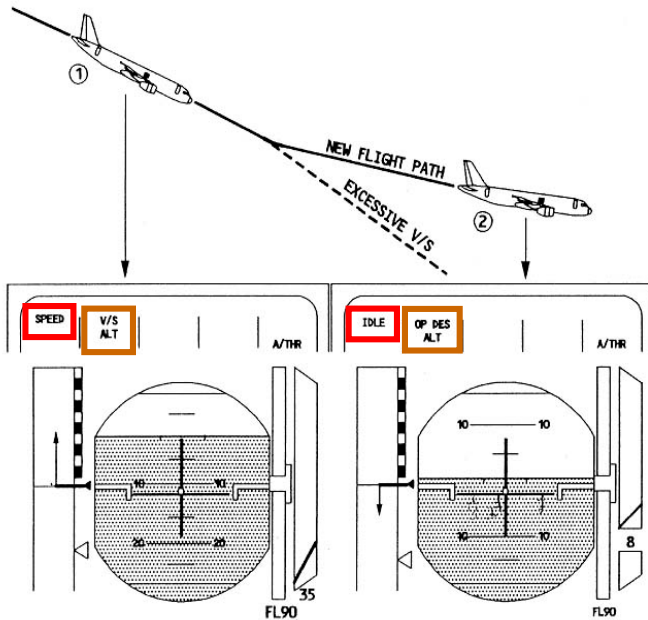
賢い機械

- － 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

(稲垣 2012)



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

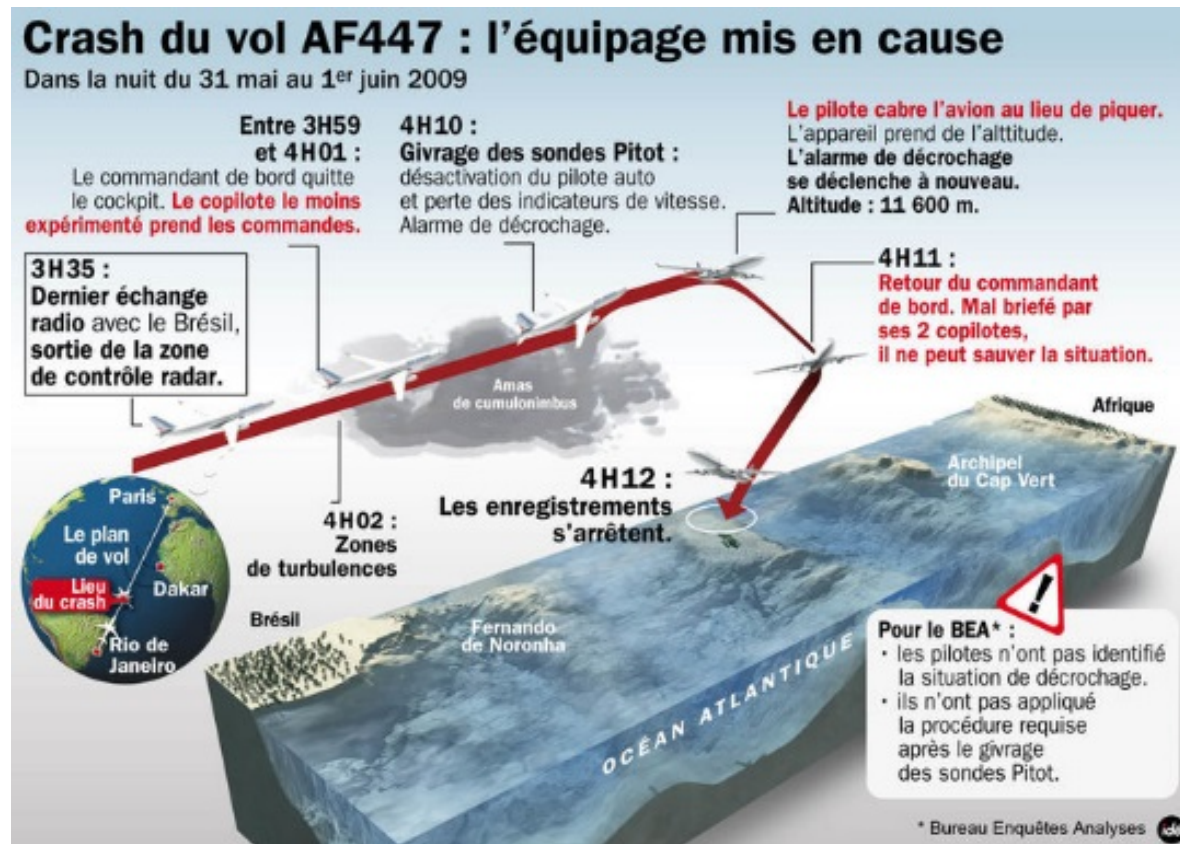
レベル3: これからの事態の**推移が予測**できる

(Endsley 1995)

自動化はパイロットの技量を低下させるか？

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。

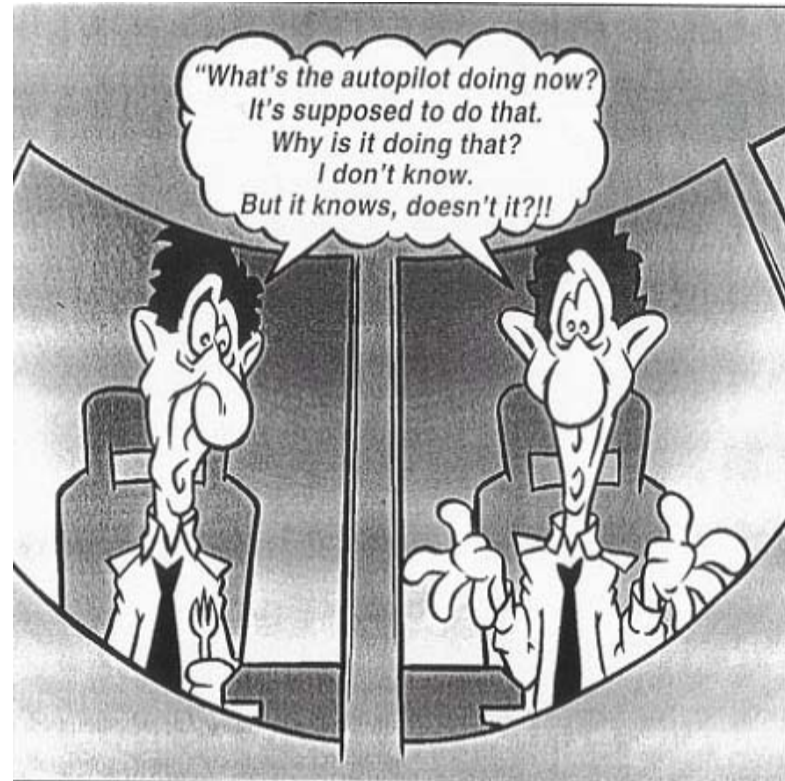


機械への過信はリスクを過小評価させる？

オートパイロットは
なぜこんなことをする？

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
やっているはず。



(FAA 1995)

- 監視制御： システムによる制御が適切かどうか継続的に監視。
必要に応じて適時に介入
- 定期的なシステム機能・原理等の教育と使用法の訓練

ひとくちに「自動運転」といっても、形態は多種多様



Photo: BMW

監視制御



Phot: Volvo

エールフランス447便



Photo: Zoox

タクシーの
乗客

SAE 2014自動運転レベル (Levels of Driving Automation: LoDA)

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。ドライバーは、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。ドライバーは、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ー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ーに要請。ドライバー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ーの対応がないとき、システムは車両制御を継続。
5	Full Automation	ドライバー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。

SAE 2016自動運転レベル (Levels of Driving Automation: LoDA)

ドライバーは動的運転タスクの一部を担当（走行環境監視はドライバーの役目）

1	Driver Assistance	システムは縦方向制御／横方向制御のいずれか一方を担当。 ドライバーは動的運転タスクの残余分すべてを担当。
2	Partial Driving Automation	システムは縦方向制御と横方向制御の両方を担当。 ドライバーは動的運転タスクの残余分すべてを担当。

システムは動的運転タスクのすべてを担当

3	Conditional Driving Automation	システムは動的運転タスクのすべてを担当。ユーザーに運転交代を求めたいときは、時間余裕をもってユーザーに要請。 ユーザーは、システムの要請に適切に対応すること。
4	High Driving Automation	システムは動的運転タスクのすべてを担当。システム／車両の故障や想定作動環境からの逸脱等が発生しても、システムはユーザーの手助けを求めることなく適切に対応。
5	Full Driving Automation	あらゆる道路条件、走行環境条件下で、システムは動的運転タスクのすべてを担当。

SAE J3016の2014年版と2016年版は似て非なるもの

2014年版

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ー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ーに要請。ドライバー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ーの対応がないとき、システムは車両制御を継続。

2016年版

3	Conditional Driving Automation	システムは動的運転タスクのすべてを担当。ユーザーに運転交代を求めたいときは、時間余裕をもってユーザーに要請。ユーザーは、システムの要請に適切に対応すること。
4	High Driving Automation	システムは動的運転タスクのすべてを担当。システム／車両の故障や想定作動環境からの逸脱等が発生しても、システムはユーザーの手助けを求めることなく適切に対応。

SAE J3016の2014年版と2016年版はいずれも不完全

SAE J 3016 2014年版

LoDA 1	Driver Assistance
LoDA 2	Partial Automation
LoDA 3	Conditional Automation
LoDA 4	High Automation
LoDA 5	Full Automation

SAE J 3016 2016年版

LoDA 1	Driver Assistance
LoDA 2	Partial Driving Automation
LoDA 3	Conditional Driving Automation
LoDA 4	High Driving Automation
LoDA 5	Full Driving Automation

レベル3の自動運転 (Conditional Driving Automation)

システム： 走行環境の監視を含め、すべての動的運転タスクを担当。ユーザーに運転交代を求めたいときは、時間余裕をもってユーザーに要請。

ユーザー： システムの要請に適切に対応すること。



Photo: Volvo

- ユーザーは結果予見、結果回避の義務から解放されているのか？
- 過失責任を問われることもあるのか？
- システムの要請に適切に対応するよう人に求めるのは妥当か？

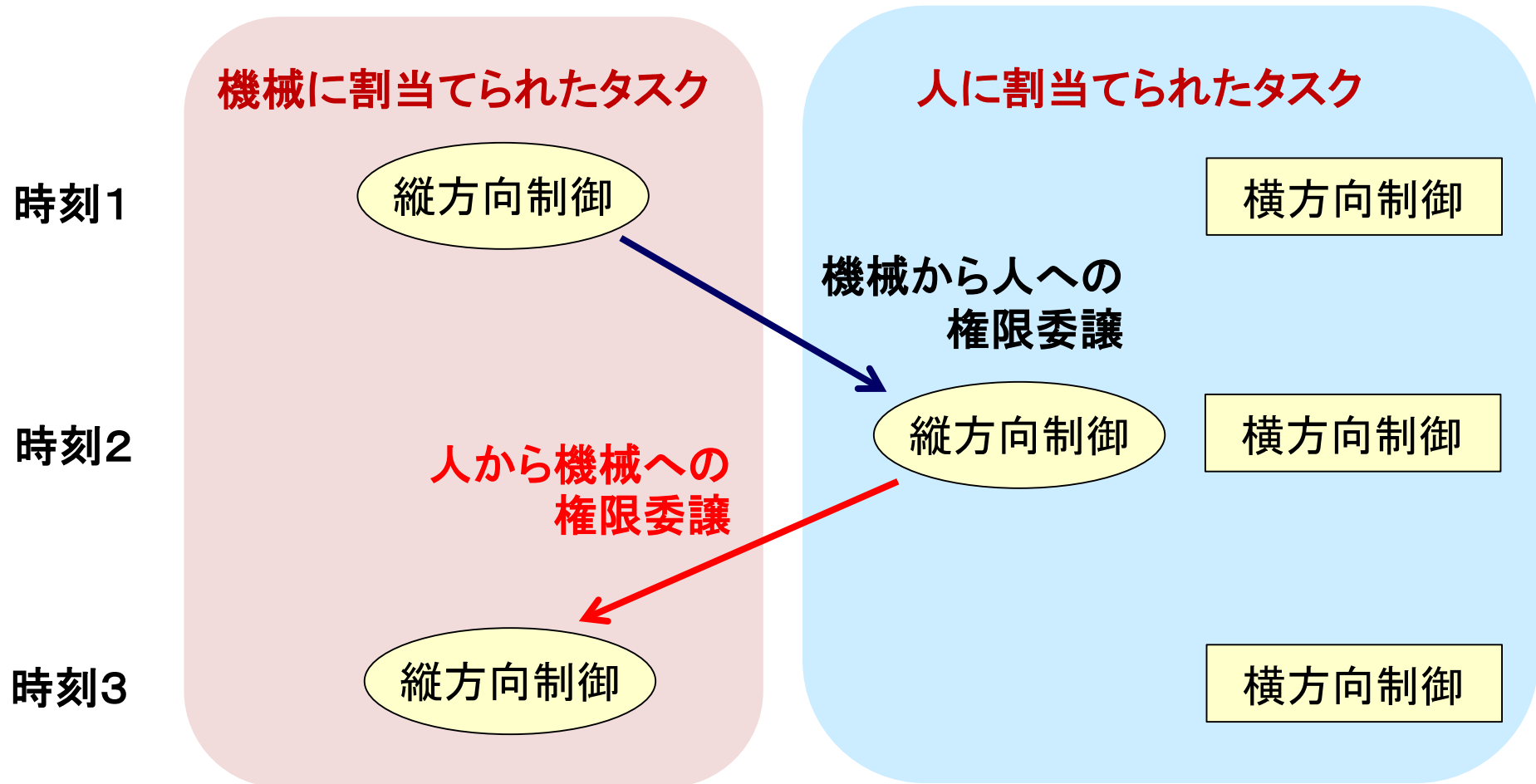
- 「いつ運転交代要請 (RTI: request to intervene) が出されても対応できるようにせよ」と言われて仕事に集中／リラックスできる？

➡ 何のための自動化？ 誰のための自動化？

運転主体の交代: 権限委譲(trading of authority)

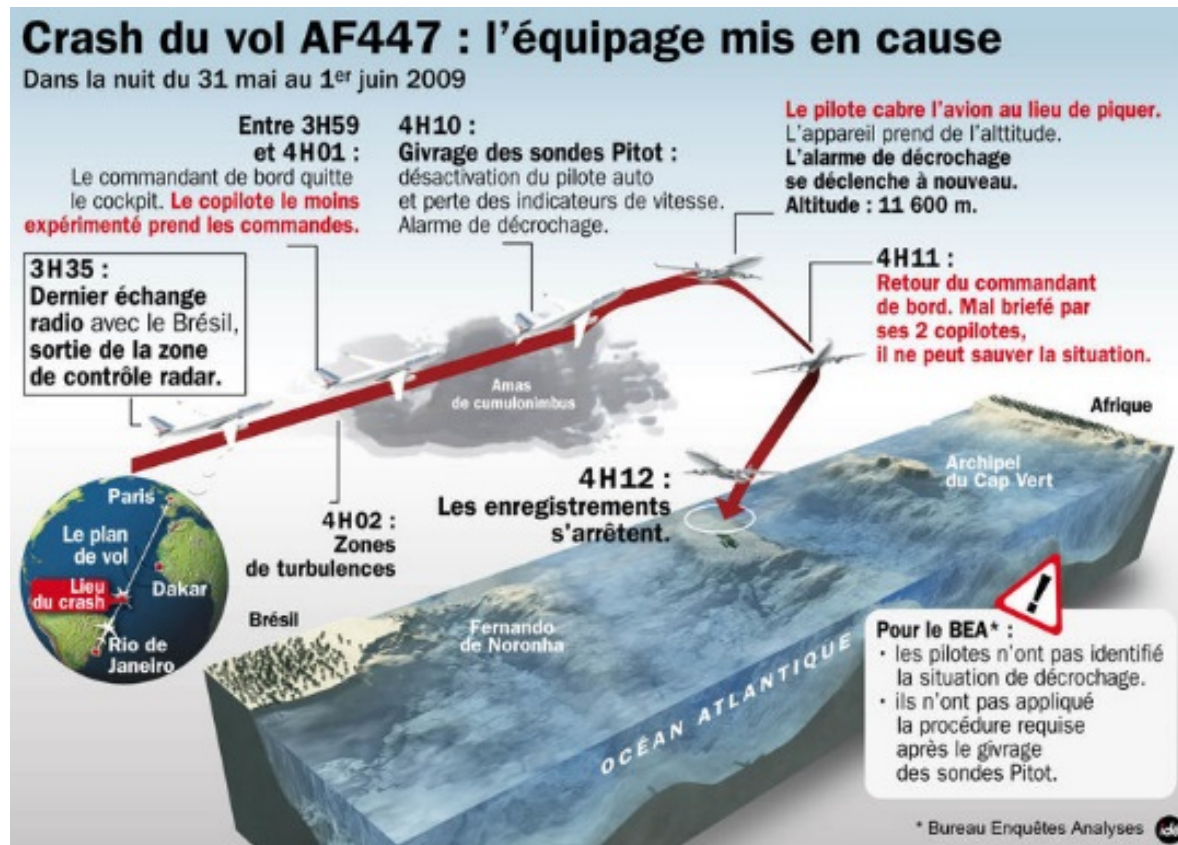
(1) 誰から誰への権限委譲？

(2) 権限委譲の要否と実行タイミングを決定・実行するのは誰？



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。



機械の判断による、機械から人への権限委譲

ユーザー：運転操作は行わず、走行環境の監視もしていない。
システムがユーザーに運転交代を求めたとき、
瞬時に状況を見極め、制御を引継がねばならない。

**10秒後に自動走行モードを
解除します。
運転を交代してください**

10秒間で

120 km/h なら 333 m 走行

60 km/h なら 167 m 走行

システムから人へ
権限を円滑・安全に
移行させたい



RTIは機械の判断に基づいて発出される以上、 ドライバーが対応するとは限らないのでは？

T Inagaki & TB Sheridan (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)

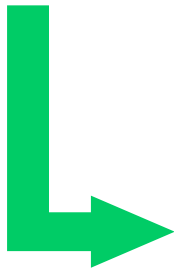


Photo: Volvo

"Intervene and resume
driving within T sec time."



"Intervene
and resume
driving within
T sec time."



What happens if the
driver failed to react to
the RTI?

LoDA 3 – Conditional driving automation

The automated driving system performs the entire DDT with the expectation that the DDT fallback-ready user is receptive to automation-issued RTI and will respond appropriately.

Basic model in J3016

The system disengages an appropriate time after issuing an RTI.

Question:

Is it sensible for the system to disengage an appropriate time after issuing an RTI?

自動化レベル (Levels of Automation: LoA)

レベル	定義	
1	システムの支援なしに、すべてを人が決定・実行。	人に最終決定権
2	システム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	システム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	システム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	システムはひとつの案を人に提示。人が了承すれば、システムが実行。	
6	システム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、システムはその案を実行。	機械に最終決定権
6.5	システムはひとつの案を人に提示すると同時に、その案を実行。	
7	システムがすべてを行い、何を実行したか人に報告。	
8	システムがすべてを決定・実行。人に問われれば、何を実行したかを報告。	
9	システムがすべてを決定・実行。 何を実行したかを人に報告するのは、報告の必要性をシステムが認めたときのみ。	
10	システムがすべてを決定し、実行。	

(Sheridan 1992; Inagaki et al. 1998)

自動化レベル4: 航空機の空中衝突防止システム

- (4) システムは可能な選択肢のうちからひとつを選び、それを人に提案。それを実行するか否かは、人が決定。

機械は助言をするが、場合によっては、人は助言を無視できる

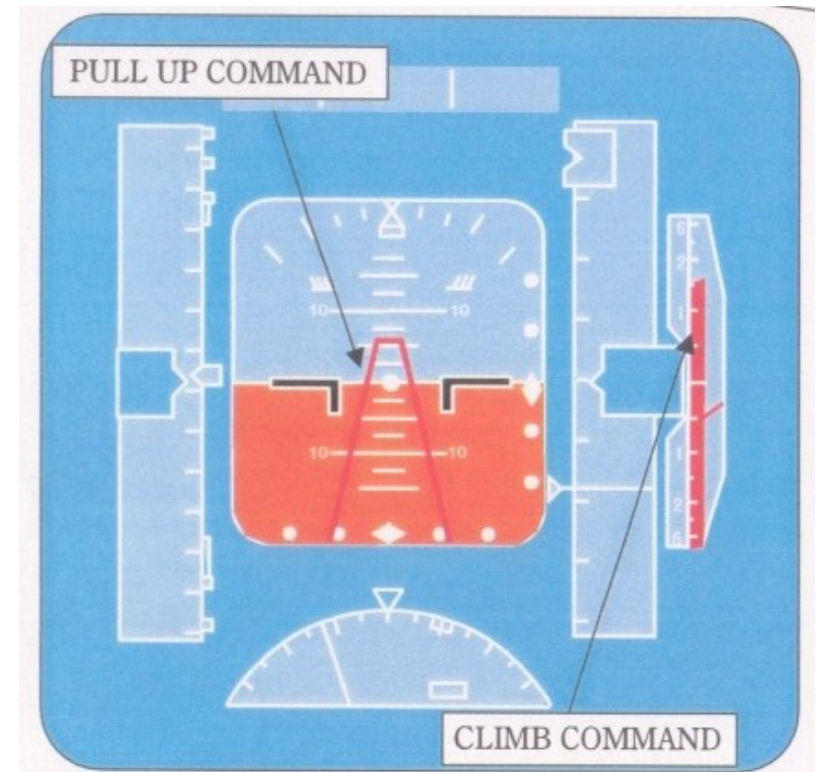
回避アドバイザリ

Climb, Climb

TCAS

TCAS

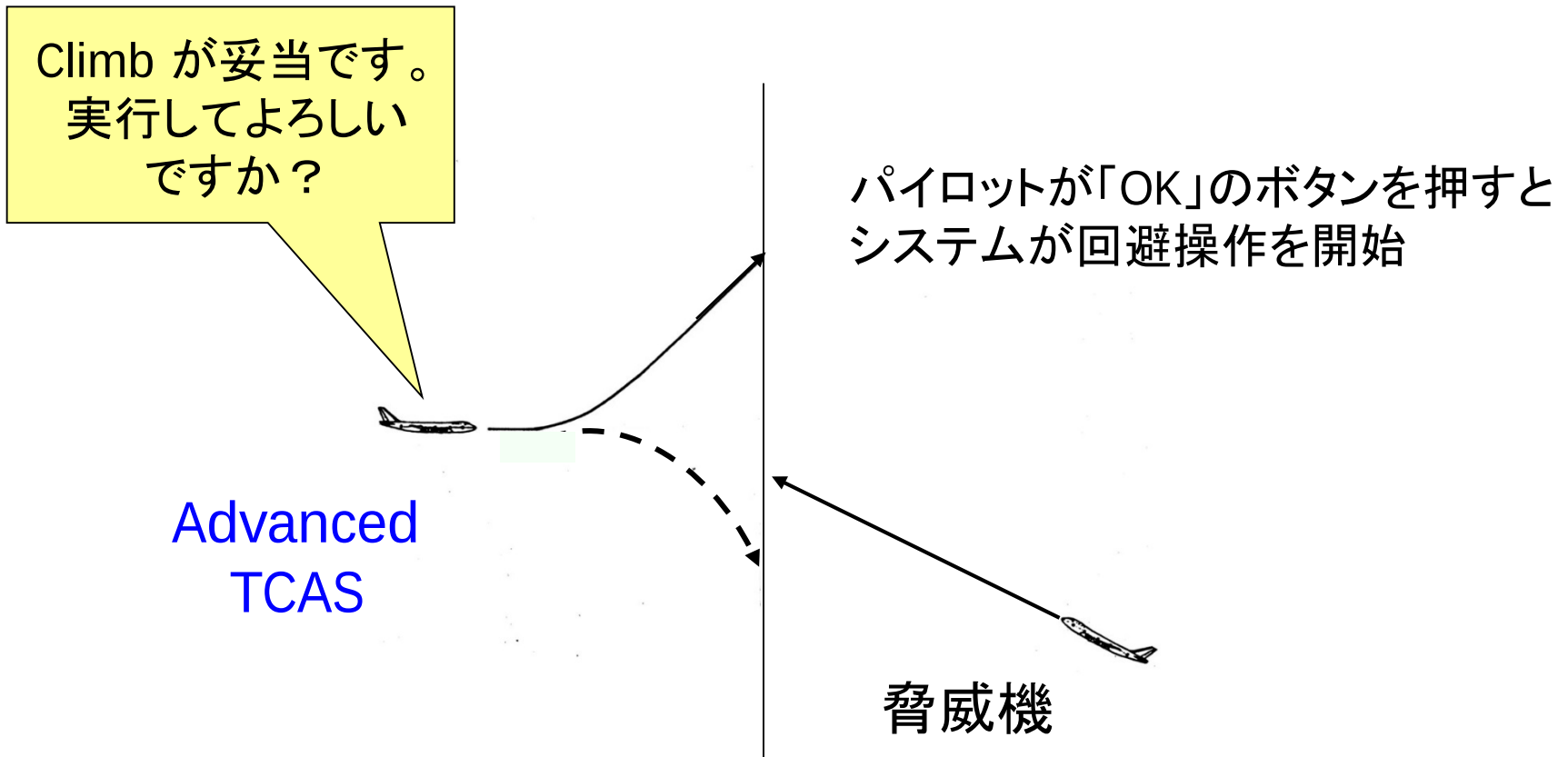
脅威機



自動化レベル5: *Advanced TCAS*

- (5) システムはひとつの案を人に提示。
人が了承すれば、システムが実行。

機械からの提案に賛成ならば、人は、その実行を機械に指示



自動化レベル6: 急減圧検知時の自動降下

- (6) システムはひとつの案を人に提示。
人が一定時間以内に実行中止を指令しない限り、システムはその案を実行。

機械が人に提案を行ったとき、**限られた時間内**に人が明確な拒否を表明しない限り、機械はその提案を実行



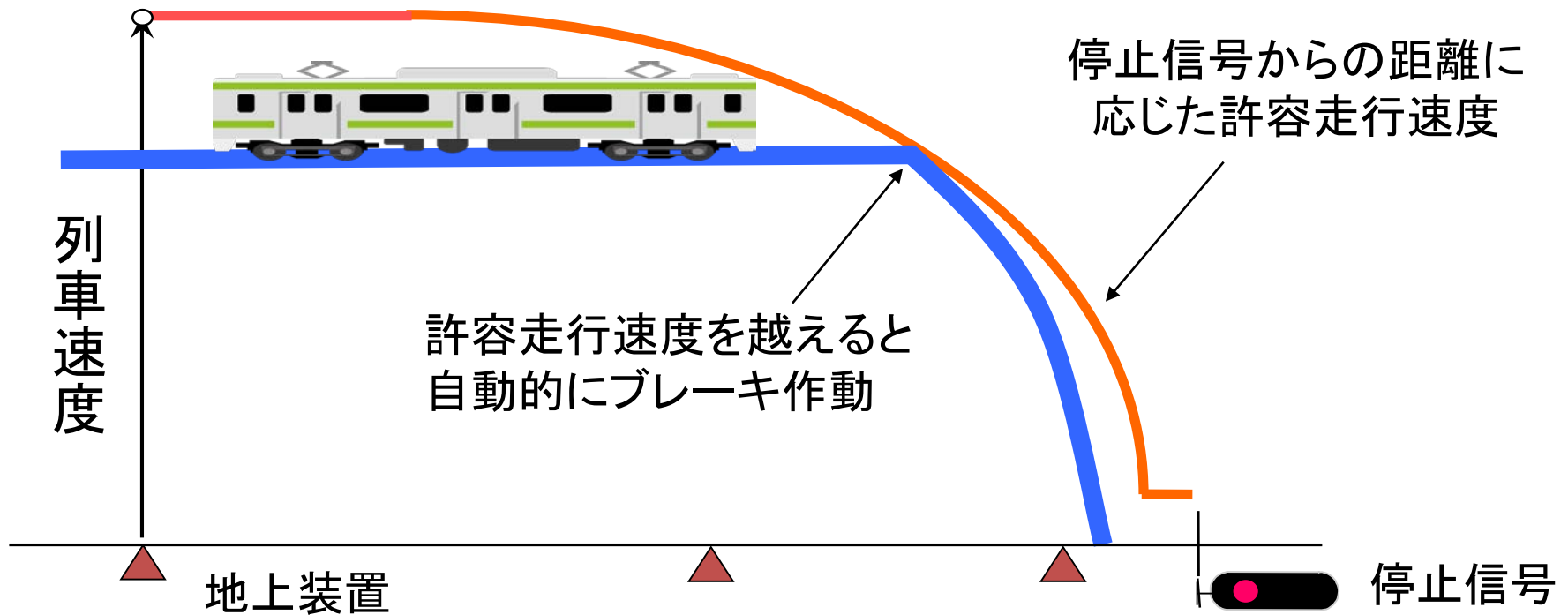
- ① システムが客室急減圧を検知
- ② システムは乗員に告知し、同時に緊急降下のカウントダウン開始
- ③ カウントダウン終了までに乗員が拒否権を発動しなければ、システムは緊急降下を実行

(Flight International, 18-24 Aug 2009)

自動化レベル 6.5: ATS-P

(6.5) システムはひとつの案を人に提示すると同時に、その案を実行。

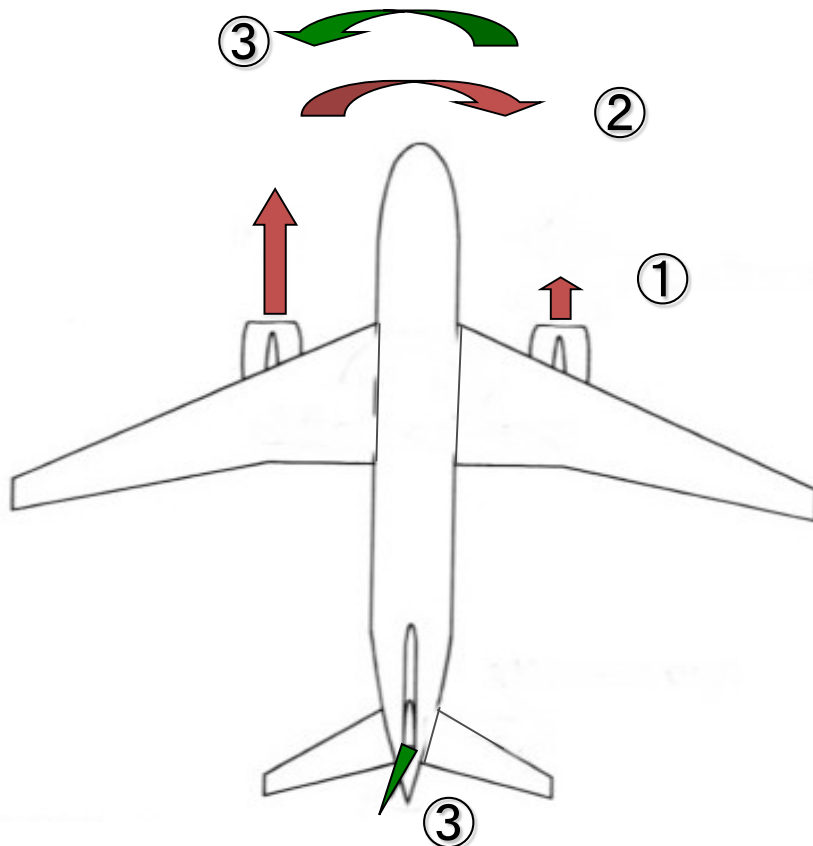
機械は、自分の意図を人に伝えると同時に、それを実行



自動化レベル7： エンジン推力不均衡の補償

(7) システムがすべてを行い、何を実行したか人に報告。

機械がよいと思ったことは、即時実行。人へは事後報告のみ



- ① 第2エンジン(右主翼側)故障
- ② 左右エンジンの推力不均衡により機首が右に振れようとする
- ③ TACが方向舵を制御して機首を左に向ける力を作り出して②の力を打消し、機首の振れを抑制

TAC
(thrust asymmetry compensation)

機械から人へ権限委譲を行いたいときのメッセージは？

基本形 「T 秒以内に運転を交代してください」  SAE J3016

LoA 5 「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」

LoA 6 「T 秒以内に運転を交代してください。交代できない／交代したくない場合は拒否権を発動してください」

LoA 6.5 「直ちに運転を交代してください。今、まさに自動走行モードを解除しようとしているところです」

システムからの運転交代要請が無視／拒否されると・・・

基本形

「T 秒以内に運転を交代してください」

T 秒後にシステム解除。その後の車両は無制御状態

LoA 5

「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」

T 秒経過後もドライバーによる運転行動が確認できないため、システムが最小リスク状態へ向けて制御継続

LoA 6

「T 秒以内に運転を交代してください。交代できない／交代したくない場合は拒否権を発動してください」

無視： T 秒後にシステム解除。その後の車両は無制御状態

拒否： システムが最小リスク状態へ向けて制御継続

LoA 6.5

「直ちに運転を交代してください。今、まさに自動走行モードを解除しようとしているところです」

RTI 発出直後にシステム解除。その後の車両は無制御状態

効用関数を用いた RTI デザインの比較 : Part 1

$$U(\text{Baseline}) = a P(\text{RD}|\text{Baseline}) - c P(\text{NR}|\text{Baseline})$$

$$U(\text{LoA } 5) = a P(\text{RD}|\text{LoA } 5) + b P(\text{NR}|\text{LoA } 5)$$

$$U(\text{LoA } 6) = a P(\text{RD}|\text{LoA } 6) + b P(\text{VT}|\text{LoA } 6) - c P(\text{NR}|\text{LoA } 6)$$

$$U(\text{LoA } 6.5) = \underline{a} P(\text{RD}|\text{LoA } 6.5) - c P(\text{NR}|\text{LoA } 6.5)$$

where

RD: driver resumes driving NR: no response was given to the RTI

VT: driver vetoes the RTI

a : benefit of successful fallback by the driver

b : benefit of successful fallback by the automation

c : cost arising out of the state in which the vehicle is controlled neither by the automation or the driver

(Inagaki & Sheridan 2018)

レベル3の自動運転は実現すべき目標たり得ず

$$U(\text{LoA } 6.5) < U(\text{Baseline}) < U(\text{LoA } 6) < U(\text{LoA } 5)$$

- LoDA 3 with Baseline RTI は非合理的
- LoDA 3 with LoA 5 RTI が最適だが、もはや LoDA 3ではない
- LoDA 3 with LoA 5 RTI は、LoDA 4 にも一致しない
- 前2項は、SAE J3016 (2016年版)の不完全性を示唆
- LoDA 3 with LoA 5 RTI は、2014年版 High Automation
- LoDA 3 を 2014年版 High Automation を包含するよう再定義、又は LoDA 3 と LoDA 4 の間にHigh Automation 挿入が必要

(Inagaki & Sheridan 2018)

効用関数を用いた RTI デザインの比較 : Part 2

Consider the case in which the automation applies *automatic safety control* (SC) (such as, partial braking) when it issues an RTI.

$$U(\text{Baseline}, \text{SC}) = a P(\text{RD}|\text{Baseline}, \text{SC}) - c P(\text{NR}|\text{Baseline}, \text{SC})$$

$$U(\text{LoA } 5, \text{SC}) = a P(\text{RD}|\text{LoA } 5, \text{SC}) + b P(\text{NR}|\text{LoA } 5, \text{SC})$$

$$\begin{aligned} U(\text{LoA } 6, \text{SC}) &= a P(\text{RD}|\text{LoA } 6, \text{SC}) + b P(\text{VT}|\text{LoA } 6, \text{SC}) \\ &\quad - c P(\text{NR}|\text{LoA } 6, \text{SC}) \end{aligned}$$

$$U(\text{LoA } 6.5, \text{SC}) = \underline{a} P(\text{RD}|\text{LoA } 6.5, \text{SC}) - c P(\text{NR}|\text{LoA } 6.5, \text{SC})$$

安全制御(*safety control*)の即時適用は有用か？

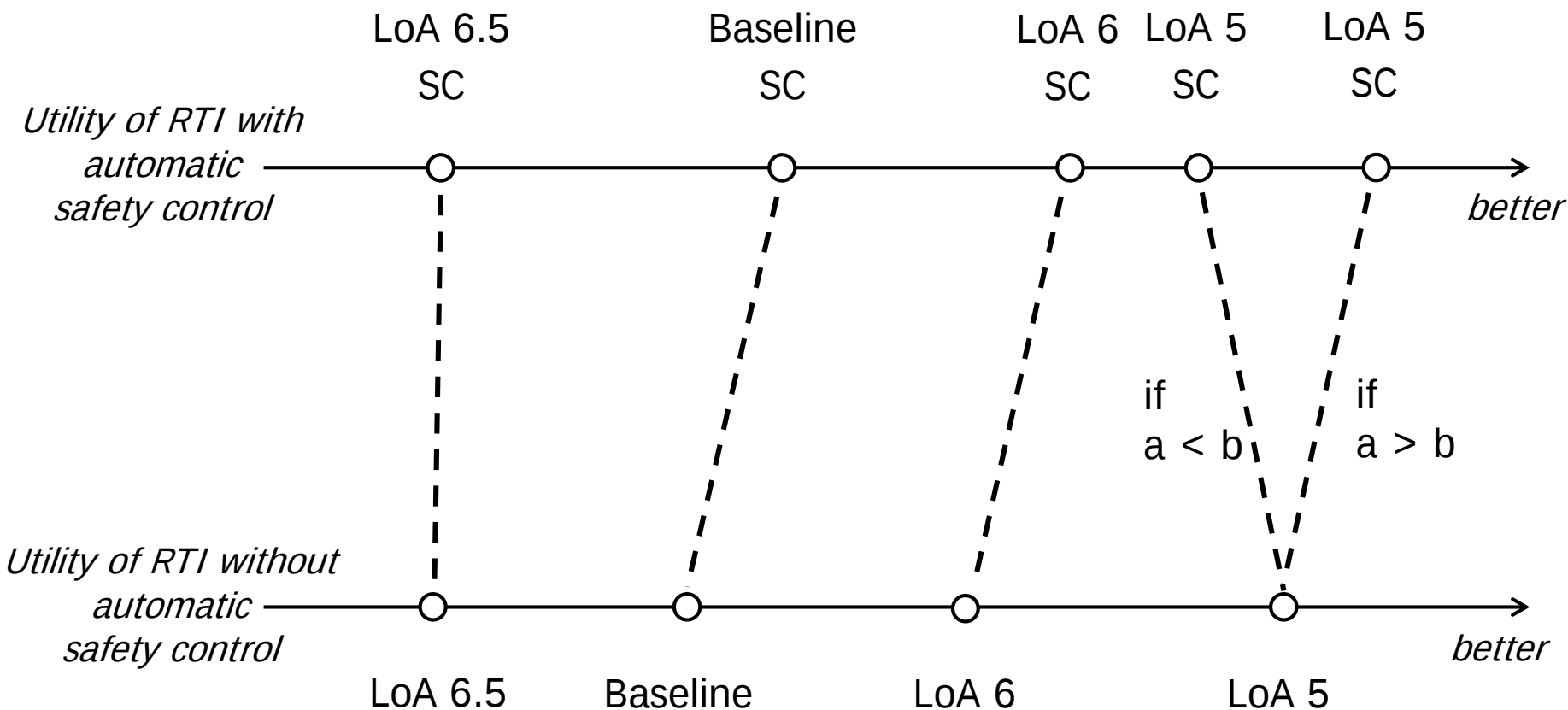
$$\begin{aligned} &U(\text{Baseline}, \text{SC}) - U(\text{Baseline}) \\ &= (a + c) \{P(\text{RD}|\text{Baseline}, \text{SC}) - P(\text{RD}|\text{Baseline})\} > 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &U(\text{LoA 6}, \text{SC}) - U(\text{LoA 6}) \\ &= (a + c) \{P(\text{RD}|\text{LoA 6}, \text{SC}) - P(\text{RD}|\text{LoA 6})\} \\ &+ (b + c) \{P(\text{VT}|\text{LoA 6}, \text{SC}) - P(\text{VT}|\text{LoA 6})\} > 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &U(\text{LoA 6.5}, \text{SC}) - U(\text{LoA 6.5}) \\ &= (\underline{a} + c) \{P(\text{RD}|\text{LoA 6.5}, \text{SC}) - P(\text{RD}|\text{LoA 6.5})\} \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &U(\text{LoA 5}, \text{SC}) - U(\text{LoA 5}) \\ &= (a - b) \{P(\text{RD}|\text{LoA 5}, \text{SC}) - P(\text{RD}|\text{LoA 5})\} \end{aligned}$$

安全制御の即時適用を組合せた RTI デザインの比較



SAE J3016の2014年版と2016年版はいずれも不完全

SAE J 3016 2014年版

LoDA 1	Driver Assistance
LoDA 2	Partial Automation
LoDA 3	Conditional Automation
LoDA 4	High Automation
High Driving Automation (2016)	
LoDA 5	Full Automation

SAE J 3016 2016年版

LoDA 1	Driver Assistance
LoDA 2	Partial Driving Automation
LoDA 3	Conditional Driving Automation
High Automation (2014)	
LoDA 4	High Driving Automation
LoDA 5	Full Driving Automation

レベル2の自動運転 (Partial Driving Automation)

システム： 縦方向制御と横方向制御の両方を担当。

ドライバー： 走行環境監視を含め、動的運転タスク残余分を担当。



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**

まじめに監視制御を行っているか？



「ドライバーモニタリングが必要」

ドライバーモニタリングの落とし穴

「ドライバーの状態を監視し、不適切な状態になっている場合は注意喚起／警告する」ということであるが...



LoDA 2



LoDA 3

➤ 視線

- ✓ **監視制御**を行っているか否かを知る上で重要
- ✓ 意識の脇見は？

➤ 視線

- ✓ 視線を前方に向けていることは求められていないのでは？
- ✓ **何のための LoDA 3 ?**

注意喚起／警告で事態が改善しないときはどうする？



LoDA 2



LoDA 3

- 注意喚起／警告を続ける？
- 一定時間が経過した時点で自動走行機能を停止させる？
 - ✓ 機械の判断による
機械から人への権限委譲
 - ✓ それを判断し実行する権限を機械に与えてよいのか？
 - ✓ 車両無制御状態の可能性

- 注意喚起／警告は意味を持つ？
 - ✓ LoDA 3 ではドライバーに
周辺監視義務はないはず
- 一定時間が経過した時点で自動走行機能を停止させる？
 - ✓ 機械の判断による
機械から人への権限委譲
 - ✓ 車両無制御状態の可能性

RTI を出したいときにドライバーの状態が適切であると思えないときはどうする？



LoDA 3
Photo: Volvo

- 「対応しないのはドライバーの責任」と考えてRTI を発する？
 - ✓ ドライバーが対応しない可能性
- RTI を発出するのをあきらめて、システムが対応する？
 - ✓ J3016 (2016) LoDA 4 に相当
- RTI を発出し、ドライバーが対応しなければシステムが対応？
 - ✓ J3016 (2014) High Automation に相当

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かり
- 機械の判断の根拠が分かる手がかかり
- 機械の意図が分かる手がかかり
- 機械の能力限界を知る手がかかり
- 機械の作動状態が分かる手がかかり



(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

基盤研究(S)ウェブサイトの充実: 今後の予定

<http://css.risk.tsukuba.ac.jp/project/kakenhiS.html>

【基礎編】

- 1-1 監視制御とは
- 1-2 監視制御における人の役割
- 1-3 監視制御は楽ではない
- 2-1 航空機の自動化の光と影(1)負担軽減と安全性・利便性・快適性の向上
- 2-2 航空機の自動化の光と影(2)人と高度技術システムのミスマッチ
- 3-0 状況認識とは何か — 身近な例で説明すると
- 3-1 気づき(レベル1の状況認識)の失敗
- 3-2 原因特定(レベル2の状況認識)の失敗
- 3-3 予測(レベル3の状況認識)の失敗
- 4-0 人の情報処理過程とヒューマンエラー
- 4-1 知覚の失敗
- 4-2 状況理解の失敗
- 4-3 行為選択の失敗
- 4-4 行為実行の失敗
- 4-5 状況認識の失敗とヒューマンエラー
- 5-1 知覚・状況理解・行為選択・行為実行の支援: 自動車の場合
- 5-2 知覚・状況理解・行為選択・行為実行の自動化: 航空機の場合
- 6-0 人間中心の自動化
- 7-0 信頼・不信・過信
- 7-1 信頼
- 7-2 不信
- 7-3 過信
- 7-4 ヒューマンマシンインタフェースのデザインで配慮すべきこと
- 8-1 機能配分 (1)静的機能配分
- 8-2 機能配分 (2)動的機能配分
- 8-3 権限共有と権限委譲 (1)権限共有
- 8-4 権限共有と権限委譲 (2)権限委譲
- 9-1 自動化レベル
- 9-2 アダプティブオートメーション
- 9-3 アダプティブオートメーションのための権限委譲
- 9-4 権限委譲をデザインする (1)平常時における権限委譲
- 9-5 権限委譲をデザインする (2)緊急時における権限委譲
- 9-6 権限委譲をデザインする (3)最適な自動化レベルの選択
- 10-1 機械はヒューマンエラーを防止できるか (1)補完の権限
- 10-2 機械はヒューマンエラーを防止できるか (2)抑止の権限

さらに、【自動運転編】(本編とコラムによって構成)、【講演スライド集】を準備中

T. Inagaki & T.B. Sheridan (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

Open Access: Freely accessible to any user.

<http://link.springer.com/article/10.1007/s10111-018-0471-5>