

運転支援とセンシング:

進化がもたらす新たな課題

Driver support systems and sensing technology

稲垣 敏之

Toshiyuki Inagaki

1. はじめに

自動車運転行動は認知、判断、操作の繰り返しとされるが、最も基本となるのが認知である。すなわち、認知が正しくなければ、それに引き続く判断や操作は正しくありやうがない。しかし、人の認知はいつも正しいとは限らない。認知の対象は、「走行環境」(道路形状、路面状態、車の混み具合、自車に影響を及ぼし得る車両の動静、歩行者の存在等)、「自車」(ハードウェアや運転支援システムの動作状況等)、「ドライバ」(運転中の自らの心身状態)等の多岐に渡るが、これらすべてに同時に注意を向けることは不可能であり、しかも人の注意には持続性がない。また、人の特性として、認知が不得手のものもある。人の認知に誤りや欠損があり得る以上、それを補う各種センシング技術が必要となる。実際、それらを駆使して、自動車運転中に遭遇する様々な状況のなかでドライバを支援するシステムが構築されてきた。

そこで提供されてきたドライバへの支援レベルは、「情報提供」、「注意喚起」、「警報」、「制御」の4種に大別して議論されることが多い。「情報提供」は、人の認知機能を補助するにとどめた支援であり、システムとしての判断は加えられない。「注意喚起」でも、ドライバが留意すべきことを知らせるものの、ドライバに具体的な操作を指定したり、それを促したりすることはない。「警報」レベルになると、危険回避に必要な具体的行動がドライバに指示される。「制御」レベルでは、平時においては、ドライバの負担軽減あるいはドライバには本来不可能な車両制御

(4輪のブレーキ力を独立に制御すること等)を行うことによってドライバが意図する車両制御の手助けをするものとなる。緊急時には、ドライバには対応できないと支援システムが判断すると、危険回避に必要な操作を自律的に実行する形態をとる。

国土交通省の先進安全自動車(ASV)推進計画等を通じて開発されてきた支援システムの多くは、基本的に上記の支援レベルのいずれかに対応している。しかし、中には複数の支援レベルに対応するものもあり、今後はさらに、走行中の時間の流れと状況の変化を意識した運転支援システムへと進化していくものと思われる。すなわち、「状況が正しく把握できれば、何を為すべきかは容易に定まる」⁽¹⁾といわれることから、ドライバの状況認識を強化する「情報提供」が基本にあり、ドライバに見えない場所に障害物等がある場合は早期に「注意喚起」を行い、ドライバの危険回避行動がタイムリーでなければ「警報」を発して具体的な回避操作の実行を指示し、ドライバの操作が間に合わない場合には機械による自律的な「制御」で危険を回避するといったシステムである。これは、走行環境の状態と環境の中でのドライバの状態あるいは行動に応じて支援形態を動的に変えることができる支援システムである。

本稿では、より知的で自然な人間機械協調あるいは人間機械共生を可能にする運転支援システムの実現に必要な設計の視点とセンシングの果たす役割、さらに今後の課題について考察する。

2. 人を支援するための機能

運転行動は認知、判断、操作の反復として表現されるが、人を支援する機械システムを論じるときは、情報獲得、情報解析、意思決定、行為実行の4つの側面に分けて考えるのがわかりやすい。

後に自動車の運転支援と対比することになるが、航空機衝突防止システム（TCAS：Traffic alert and Collision Avoidance System）を例にとろう。TCASの機能はつぎのとおりである⁽²⁾。

- (1) 情報獲得：毎秒1回質問信号を送信し、相手機からの応答電波の方位、高度情報、信号の往復所要時間から、相手機の方位、相対高度、距離、相手機の接近率、最接近点とそこまでの到達時間を知る。
- (2) 情報解析：距離テストと高度テストを行い、相手機が自機にとって脅威機であるか否かを判定する。
- (3) 意思決定：相手機が脅威機である場合、最適な回避方法（上昇、降下のいずれか一方）を決定する。
- (4) 行為実行：音声等でパイロットに回避操作の実行を指示する。ただし、TCAS自身は回避操作は行わない。

衝突被害軽減ブレーキでは、前方障害物検知センサによる「情報獲得」、障害物が検知された場合に衝突物か否かを判定する「情報解析」、ブレーキ操作の実行をドライバに指示する「意思決定」についてはTCASと同様である。しかし、場合によってはシステムが自律的な制動をかける点で、「行為実行」に関してはTCASと大きな相違がある。

一方、2005年10月に苫小牧で公開実験が行われた車車間通信を利用した情報交換型運転支援システムは、むしろTCASに近い。すなわち、ドライバに危険を知らせ、回避を促すものの、ドライバがそれに従わないからといってシステムの判断で自動的にブレーキ制動をかけるようにはなっていない。

3. どの機能をどこまで自動化するのか

目標達成のために人が何をし、機械が何をするのかを定めることを機能配分⁽³⁾という。高度技術システムと称されるものでは、情報獲得と情報解析は自動化されていることが多いが、意思決定と行為実行に関してはシス

表1 自動化レベル

-
- (1) コンピュータの支援なしに、すべてを人間が決定・実行。
 - (2) コンピュータはすべての選択肢を提示し、人間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間に提示するとともに、その中のひとつを選んで提案。それを実行するか否かは人間が決定。
 - (4) コンピュータは可能な選択肢の中からひとつを選び、それを人間に提案。それを実行するか否かは人間が決定。
 - (5) コンピュータはひとつの案を人間に提示。人間が了承すれば、コンピュータが実行。
 - (6) コンピュータはひとつの案を人間に提示。人間が一定時間以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間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、何を実行したか人間に報告。
 - (8) コンピュータがすべてを決定・実行。人間に問われれば、何を実行したか人間に報告。
 - (9) コンピュータがすべてを決定・実行。何を実行したか人間に報告するのは、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。
-

テムによって様々である。この多様性を統一的なことばで表現するとき用いられるのが「自動化レベル」の概念である。Sheridanによる10段階のレベル⁽⁴⁾に筆者らの提案⁽⁵⁾による「レベル6.5」を加えたものを表1に示す。

TCASや情報交換型運転支援システムでは、意思決定と行為実行の自動化レベルは4、衝突被害軽減ブレーキの自動化レベルは6である。また、車が車線を逸脱しそうになったとき、警報と表示でドライバに知らせると同時にステアリングを修正するシステムであれば、自動化レベルは6.5となる。

いわゆる「人間中心の自動化」では人の特性に配慮したシステム設計を求めると同時に、「最終決定権は人に与えるべき」とされる。そのためには自動化レベルは5以下でなければならないが、人の特性に配慮すると、自動化レベルは6以上であってもよい場合が存在する。衝突被害軽減ブレーキはその典型である。さらに、衝突回避等のためにドライバが車線変更やブレーキ操作を行ったときに路面が滑りやすいことを検知すると自動的に車両安定化制御を行うシステム（自動化レベルは7）など、自動車の安全確保には高い自動化レベルが欠かせない。これは、状況の緊急度や人の能力限界等を考慮すると、われわれが目指すべきものは「自動車のための人間中心の自動化」であり、それは必ずしも「航空機のための人間中心の自動化」と同一である必要はないことを意味している⁽⁶⁾。

4. 人と支援システムのミスマッチ

支援システムにも、おのずと能力限界がある。走行環境についてのドライバーと支援システムの視認能力の組合せを図1に示す。領域④は対象外として、人と支援システムの能力が一致している①は理想的と思われるかもしれないが、支援システムがACCやLKAのような制御を担当するものであると、そこに組み込まれている「ものの考え方」が人と異なっていたり、きわめて複雑なものであったりした場合には、「なぜ今、こんな制御をするのだ！」と叫びたくなるようなオートメーション・サプライズ⁽⁷⁾が起り得る。

領域②では、「支援システムには見えていない」ことをドライバーが知ることができるようになっていなければ、ドライバーは支援システムの能力を過信することになる。一方、支援システムが危険を知らせる警報システムであれば、領域③において「接近車両あり」との警報に接しても、それがドライバーの死角にあるなら、「本当か？どの車のこと？」のような、いわば不信や不安を抱くこともある。

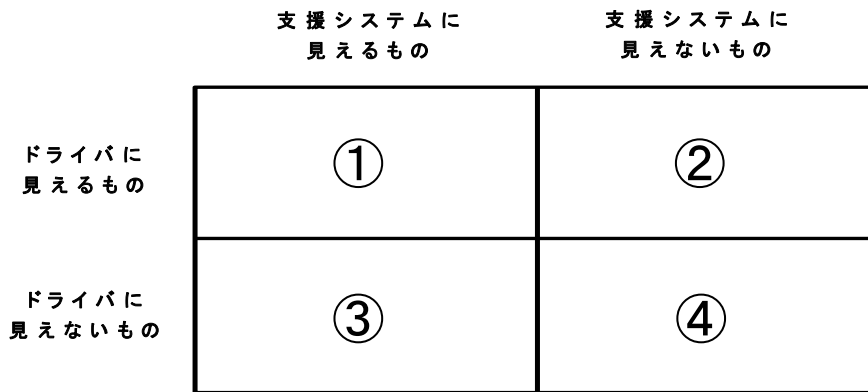


図1 限界のある能力の組合せ

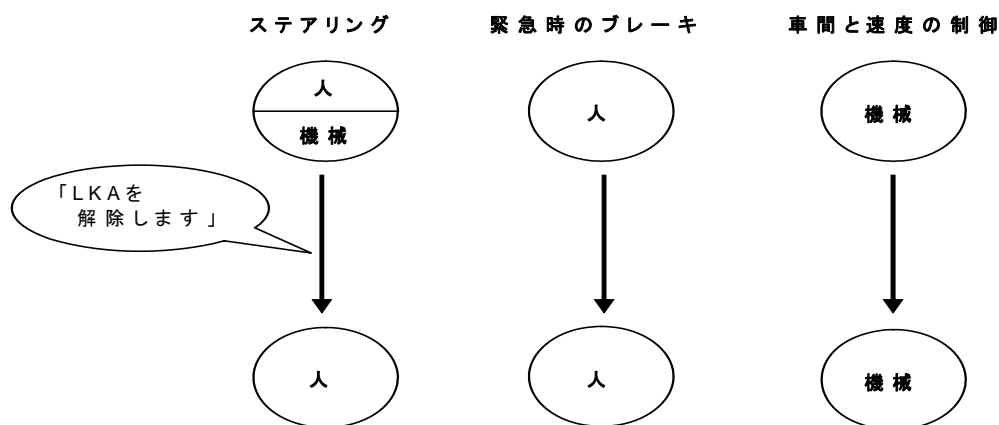


図2 平時の権限委譲

人と支援システムとの機能配分が時間経過とともに変わる場合にも注意が必要である。ACCとLKAを使用しながら走行している場面での機能配分を図2に示す。ステアリング操作は基本的にはドライバの担当であるが、負荷軽減のために、LKAが背後で「下支え」的なステアリング操作を行っているものとする。また、緊急時のブレーキ操作はドライバの担当であるが、平時の車間制御と速度制御はACCが行うものとしよう。さて、ドライバが過度に支援システムに依存することは望ましくないことから、ドライバの運転積極性の欠如が疑われたときはLKAを解除するシステムが考えられる。このとき、ステアリング操作の権限はドライバに完全に委譲されるが、LKAの解除をどのようにドライバに伝え、実行するのかにはいくつかの方式がある。ドライバの了承を求めたうえで解除する方式（自動化レベル5）、解除予定であることを通報して一定時間が経った時点で自動的に解除する方式（自動化レベル6）、解除した後でLKAの表示を消して事後報告とする方式（自動化レベル7）等である。もしステアリング操作の権限がドライバに移されたにもかかわらず、それをドライバが認識していなかったとすると、カーブに差し掛かってもそのまま直進することになる。人が認識しないときの権限委譲はオートメーション・サプライズをもたらす⁽⁸⁾。

衝突被害軽減ブレーキは緊急時の権限委譲の例であるが、「いざとなっても自動ブレーキがかかる（人から機械への権限委譲が起こる）はずだから、何もしないで任せてよい」と考えることはシステムへの過信である。

5. ドライバの状態センシング

情報提供、注意喚起、警報等の支援が有効に機能するのは、ドライバがそれらを的確に把握できる場合に限られる。しかし、人はつねに適正な注意を払って運転しているとは限らない。居眠りの場合はもとより、たとえ覚醒していても、脇見運転や漫然運転なら、提示情報に気づかない、気づくのが遅れる、提示情報の意味の把握に時間がかかるといったことが懸念される。

例えば、先行車との車間距離が短くなっていることを検知した支援システムが注意喚起や警報を提示したとする。ドライバが前を

向いていたならば、漫然状態にあったとしても、正常な注意を取り戻し、比較的すばやく対応操作に移ることが期待できる。しかし、脇見を繰り返している状態であれば、注意喚起や警報の音に気づいて表示画面に眼を移し、つぎに前方車外を見て始めて注意喚起や警報の意味を理解し、ようやく対応操作に移ることになる。操作開始までに時間が経過し、ときには危険回避操作が間に合わないこともあり得る。

もし、支援システムがドライバの心身状態を推測できておれば、ドライバの状態に即して提供する支援形態を変えることができるであろう。例えば、ドライバが居眠りあるいはそれに近い状態にあることが疑われる場合は、注意喚起や警報の提示ではなく、支援システムの判断による自律的な減速も考えられる。ドライバが脇見をしている可能性があるときも、先行車との車間の減少率によってはシステムによる自動減速のほうが適切であることもあろう。一方、ドライバが前を見ていることが確認できておれば、注意喚起や警報を提示する形態が基本的であろう。ただし、軽い自動減速と組み合わせることは、ドライバに時間余裕を与えるとともに、減速度（視覚情報や聴覚情報とは異なるモードの手がかり）による状況認識強化の役割が期待できる。

ドライバの行動や姿勢等をセンシングし、ドライバの状態（疲労、緊張、脇見、漫然状態、居眠り等）を推定しようとする研究は、近年、国内外を問わず活発に行われるようになってきている（文献については、紙数の都合上、例えば⁽⁹⁾のリスト等をご参照願いたい）。

平成16年7月～19年3月の予定で進行中の科学技術振興調整費による「状況・意図理解によるリスクの発見と回避」プロジェクト⁽⁹⁾もそのひとつである。実現しようとしている運転支援システムは3層構造を持つ。第1層では、ドライバに見えないものを見えるようにする情報提示技術を通じてドライバの状況認識強化をはかる。第2層では、ドライバの行動センシングからドライバの意図を推測し、走行環境センシングに基づく機械の「状況」理解と照合してドライバの意図や状況認識の適否を推測するとともに、ドライバの状態が運転に適したものであるか否かを判定する。第3層は、第2層までの支援が有

効でないとき、ドライバの状態や走行環境に応じて機械が安全を担保あるいは確保するための機能配分を行うアダプティブ・オートメーションである⁽¹⁰⁾。

このうち、第2層の行動センシングの対象となるものは、ドライバの姿勢とその変化、手足の動き、顔や頭部の向き、視線の方向と注視時間等である。これらに基づいて、ドライバは何をしようとしているか、漫然運転や脇見運転になっていないか、認知的負荷が過大になっていないか、状況に潜むリスクに対応できる体勢を整えているか等を実時間で検出する技術に結びつけようとしている。その技術は万人向けの単一のものではなく、個人に適合させたテーラード・デザインのものとなるはずである。

6. ドライバの状態センシングに関する課題

ドライバの心身状態に「通常あるいは正常からの逸脱」を疑わせる兆候が見つかったとき、ドライバ自身に知らせる際には注意が必要である。例えば、いくつかのセンシングデータをもとに、機械は「ドライバが眠気を感じている可能性がある」と判定したとする。早期発見・早期対応の考え方に基づくなら、そのことはドライバに即刻伝えなければならない。しかし、ドライバがまったく眠気を自覚していないようなときに、「あなたは眠いのではないか」との注意喚起を機械から受けたとき、ドライバはどのように感じるだろうか。にわかには納得しがたい情報を与えられたとき、人はそのような情報を提供する機械に不信を抱く可能性がある。そのドライバの過去のデータなどをもとにして、「当人を納得させられる情報」を提示できればよいのだが、走行中にそのようなことで注意を奪うことは必ずしも得策ではない。

ひとつの対策法は、さらなる確証が得られるまで、あるいは人がある程度自覚できるようになるまで注意喚起は行わず、その間の安全は機械が担保するというものであろう。緊急事態の発生時にはいつでも機械が対処できるように安全制御の準備は整えておくと、緊急事態に至らないままドライバの状態が改善されたなら、結局は機械は表に顔を出さない。しかし、ドライバの状態の改善が不十分な中で緊急事態が生じたときは、直ちに権限委譲を行い、事故回避や被害軽減を図る

ものである。これはアダプティブ・オートメーション^{(3),(11)}である。

ドライバの行動が「通常あるいは正常からの逸脱」を疑わせるものであったときに「制御」レベルでの支援を行う場合は、その制御が状況の文脈に沿ったものであることを十分に確かめておく必要がある。例えば、走行レーン前方に障害物を発見したドライバが、右レーンの安全を十分に確認しないまま車線変更しようとしたとする。このとき、走行環境をセンシングしていたシステムが右レーン後方からの接近する高速車両に気づき、右レーンへ車線変更は危険であると判断したとしよう。このシステムがドライバのステアリング操作を打ち消し、現在の走行車線に留まるような「制御」レベルの支援を行ったらどうなるだろう。ドライバは自らの操作に合致しない車の挙動を見て、「いったい何が起こったのか」と驚くとともに、ステアリングをさらに強く右に回すことに気をとられているうちに、前方の障害物に衝突してしまうことにもなりかねない。

もし、前方に障害物がなければ、支援システムの制御は正しい。しかし、前方に障害物があるという文脈のもとでは誤りである。正解は、ブレーキ制動をかけて右レーン後方からの高速車両をやり過ごし、前方障害物への到達時間にも時間余裕を作り出すことである。

安全確保のための制御が文脈に即していなかったため、逆に危険や事故をもたらした例は航空機にはいくつかの例がある。1990年バンガロール空港へ着陸しようとしていたエアバス A320 機において、それまでエンジン推力と昇降舵をコンピュータが調整しながら速度と降下率を制御してきたモードから、エンジン推力をアイドルに固定し、昇降舵のみで（すなわち、機首の上げ下げのみによって）速度を制御するモードに移行した⁽¹²⁾。このモード変化はパイロットのエラーによるものであったが、パイロットは自分のエラーに気づかず、さらにモード変化にも気づかなかつた。さて、エンジンがアイドル状態であるため速度は次第に低下し、グライドパスも保てなくなった。コンピュータは速度低下を補うように機首を下げる。ふつうなら間違っていないこの操作が危険を招くことになる。すでに高度が低い状況での機首下げ

は、まさに地表面へ向かうものとなり、危険回避の時間余裕をいっそう減少させるものとなった。

7. む す び

車載の各種センサ類からの情報をもとに運転操作支援を行う「自律検知型運転支援」は、センシング技術や文脈理解技術の進展につれて、より高度なものに進化していくであろう。一方、車から直接には見ることができない事象に対しても、無線通信を用いて路側設備や他車両から情報を得ることによってドライバに適切な運転支援を提供する「インフラ協調型安全運転支援」の研究が進められている。自律検知型とインフラ協調型の運転支援がたがいを補完しあえば、ドライバの状況認識強化と危険回避支援に大きな効果をもたらすはずである。

ところで、「ドライバに見えないもの」に関する支援情報を提供できるようになることは利点であるが、同時に新たな課題も生み出している。見通しの悪い交差点において、ドライバには見えない車両であっても車車間通信でその車を検出し、ドライバに警告することができるシステムが「車両接近あり」と知らせたとしよう。さて、ドライバが交差点で停止していると、目の前を車が通り過ぎた。しかし、ディスプレイの「車両接近あり」の表示は消えていない。まだ来るのかと思ってしばらく待っていると、やがて表示が消え、車も来ない。「時間の無駄をした」との気持ちが残る。一方、まだ表示が消えていないのに目の前を車が通り過ぎるのが見えたからと発進したときに後続車が接近していたなら事故発生である。「自分で真偽を確かめられない情報が与えられたとき、人は見える範囲の中で都合のよい（一見合理的な）解釈で説明がつくなら、それで満足する」ことを知ったうえでヒューマン・インタフェース設計を行う必要があるだろう。

また、検出には「検出失敗」と「誤検出」の2種の誤りが起こり得るが、このことも問題を複雑にしている。車車間通信による車両検出システムの普及率が低い間は検出失敗が多いことと等価である。表示が出ないなら「接近車両なし」と解釈したいところだが、検出失敗の確率が高いシステムでは、表示が出ていなくても安心はできない。無駄かもし

れないと分かっているにもかかわらず停止線とどまることになるだろう。

このような状況で、「車両検出システムは万能ではないので、過信されては困る」とのことから、接近車両がなくても、時折「接近車両あり」の誤警報が出るようにわざと設計されていたらどうなるだろうか。普及率が低いために検出失敗が多く、誤検出まで起こる。しかも誤検出の起こりやすさに規則性も見出せないとなると、ドライバには受け入れないのではないだろうか。

人の能力を超えたものをセンシングできるようになったからこそ、その情報を人いかに伝えるかが重要になる。人の心の特性を踏まえた考察が求められるとともに、走行環境、自車、ドライバ状態に関するセンシング情報を統合した文脈理解技術の構築が望まれる。

参 考 文 献

- (1) E. Hollnagel, et al.: Principles for modeling function allocation. *Int. J. Human-Computer Studies*, Vol. 52, pp. 253-265 (2000).
- (2) 稲垣敏之：絶対安全への挑戦：人を支援する知的技術，人工知能学会誌，Vol. 17, No. 6, pp. 732-737(2002).
- (3) 稲垣敏之：人間と機械の機能分担，自動車技術会シンポジウム「人と技術の協調によるアクティブセーフティ」(2004).
- (4) T.B. Sheridan: *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. MIT Press(1992).
- (5) T. Inagaki et al.: Trust self-confidence and authority in human-machine systems. *Proc IFAC Human-Machine Systems*, 431-436 (1998).
- (6) T. Inagaki: Design of human-machine interactions in light of demain-dependence of human-centered automation, *Cognition Technology & Work* (2006 in press).
- (7) 稲垣敏之：リスク環境における人と知能機械の協調をデザインする，電子情報通信学会誌，Vol. 89, No. 12, pp. 1026-1031(2006).

- (8) 稲垣敏之：人間機械共生系：システム設計の視点と課題，自動車技術会シンポジウム「ヒューマトロニクス」(2005).
- (9) T. Inagaki: Towards monitoring and modelling for situation-adaptive driver support systems, *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments*, Springer Verlag, pp. 147-169 (2006).
- (10) T. Inagaki et al.: Efficacy and acceptance of driver support under possible mismatches between driver's intent and traffic conditions, *Proc. HFES Annual Meeting*, pp. 280-283 (2006).
- (11) T. Inagaki: Adaptive automation: Sharing and trading of control, *Handbook of Cognitive Task Design*, LEA, pp. 147-169 (2003).
- (12) N.B. Sarter et al.: How in the world did we ever get into that mode? Mode error and awareness in supervisory control, *Human Factors*, Vol. 37, No. 1, pp. 5-19(1995).