

人間機械共生系：システム設計の視点と課題*

稲垣 敏之¹⁾

Human-Machine Symbiotic Systems: Design Viewpoints and Challenges

Toshiyuki Inagaki

Key Words: Driver Behavior, Preventive Safety, Human-Machine Interface / Function Allocation, Adaptive Automation, Authority and Responsibility, Levels of Automation, Automation Surprises, Trust and Reliance, Situation Awareness ⑬

1. はじめに

近年の機械は、状況を認知・解析し、今何をなすべきかを決め、さらにそれを実行に移すことができるだけの能力を備えている。このような高い知能と自律性を持つ機械が、さまざまな交通移動体の安全性、効率性、快適性に貢献してきたことは論を待たない。しかし同時に、これらの知能機械（自動化システム）と人との間には、当初予期しなかったような不整合が発生していることも事実である。早くから高度自動化を指向してきた航空分野では、(1)多機能インタフェースによるエラーの誘発、(2)人と機械の意図の対立、(3)自動化システムへの不信と過信の交錯、(4)自動化システムによる「異常の隠蔽」、(5)高機能システムの「わかりにくさ」などが知られている²⁾。ただし、これらは航空機に限った問題ではなく、先進技術の導入が急速に進展しつつある自動車にもあてはまる。

また、航空機では「事故原因の70~80%はヒューマンエラー」といわれるものの、人の特性を十二分に考慮しなかったデザインに真の問題があったのではないと思われるケースも少なくない。徹底的な教育・訓練を受ける航空機のパイロットでさえ上述の問題から完全には逃れられないことを考えると、十分な教育や訓練を仮定することができない非職業ドライバを対象とする自動車のデザインが解決すべき課題の難しさは、ある意味で航空機の比ではない。

本稿では、ドライバ（人）とクルマ（機械）が「自然」な形で協調（共生）できるシステムを実現するうえでデザインに求められる視点と課題について、事例を取り上げながら述べる。

2. 人と機械の役割分担がもたらす「わかりにくさ」

人と機械の間での役割分担を定めることを「機能配分」とよぶ³⁾。ヒューマンマシンシステム設計における重要な課題のひとつである。古典的な機能配分の代表は、(1)対象となる機能ごとに人間と機械の能力を比較し、優れた能力を持つほうに当該機能を割り当てる方式（Fitts MABA-MABA list）、(2)自動化

できる機能はすべて自動化し、それ以外のものを人間に割り当てる方式、(3)システム開発コストを最小化できるように人と機械に機能を割り当てる方式、の3通りに分類できる。いずれも「誰が、何をするのか」を決めるものであり、ひとたび定めた配分は未来永劫変更されることはないことから、静的機能配分とよばれる。

このうち、(2)または(3)では、人の特性を考慮することなく機能配分が定められることから、人は自分に割り当てられた役割を快く感じなかったり、割り当てられた機能すべてを正確に認識・記憶しておくことが困難になったりすることがある。これが、人と機械の役割分担がもたらす「わかりにくさ」のひとつの形態である。

また、(1)にも欠点がある。個々には人が優れているタスクであっても、そのようなタスクを複数個同時に担当しなければならない状況では必ずしも人の優位性が保証できないこと、タスク担当が長時間に及ぶときは、様々な要因によって作業の質や効率が低下し得ることなどである。

このことは、単に「誰が、何をするのか」を決めるのではなく、「誰が、何を、いつするのか」を定める必要があるとする動的機能配分の考え方の重要性を示している。動的機能配分では、人または機械のいずれかが行っていたタスクを適当な時点で他方に譲り渡すことが行われる。これを権限委譲という³⁾。これからのヒューマンマシンシステム設計で求められているのは静的機能配分ではなく動的機能配分であることは論を待たない。特に、人の作業負担や効率の動的変化あるいは外界状況変化の中での人の能力限界などを考慮に入れて機能配分を動的に変化させる適応的機能配分（アダプティブ・オートメーション）^{3),7)}が重要であり、すでにいくつかの例が世に送り出されている。ただし、「いつ、誰から誰へ当該タスクの権限を移すか」を定めるのが機械である場合には、「なぜこのようなときに、このようなことが起きるのか」といった類の不都合が生じ得る。これも、人と機械の役割分担がもたらす「わかりにくさ」である。動的あるいは適応的機能配分に起因する「わかりにくさ」をいかに解消・軽減・抑制することができるかが、人と知能機械の共生を実現するうえでの鍵を握っている。

*2005年12月21日自動車技術会シンポジウムにおいて発表。

1) 筑波大学大学院システム情報工学研究科リスク工学専攻
(305-8573 つくば市天王台 1-1-1) inagaki@risk.tsukuba.ac.jp

3. オートメーション・サプライズ

人の意図や指示とはまったく独立に智能機械が自らの意思に沿って行動しているように見えることがある。「なぜ今、機械がそのようなことをしているのか」人が理解できずに戸惑うことを総称してオートメーション・サプライズ (automation surprises) という²⁾。これは、機械が「状況を認知・解析し、今何をなすべきかを決め、さらにそれを実行に移すことができる能力」を備えたことによる望ましくない副産物である。オートメーション・サプライズの形態は多様であり、その背後要因もさまざまである。高度自動化システムを搭載した自動車において発生し得るオートメーション・サプライズの例を以下に示す。

3.1 モードの誤認

ACC (Adaptive Cruise Control) システムに対しては、例えば「50 km/h 以上」のように定義された高速度域において、ドライバの設定した速度を維持あるいは前方の他車両に指定された時間距離を確保した追従することを目的とした高速域 ACC と、例えば「45 km/h 以下」のように定義された低速度域において先行車を追従する低速域 ACC を区別することがある。

いままで高速域 ACC を搭載した車を使用してきたドライバが、あらたに低速域 ACC を導入したとしよう。このドライバにとっては、これら2つのシステムは、「同じような支援」を提供するようにみえる可能性があるものの、実際にはいくつかの点で相違がある。低速域 ACC は、設定速度での走行を目的とするものではなく、低速で走行する先行車への追従を実現するシステムであるため、先行車が存在するときに限って作動させることができる。一方、高速域 ACC は先行車が存在しなくても作動可能である。また、低速域 ACC において、「先行車が検出できなくなったときにはシステムによる制御を解除する」方式を採用すると、「先行車が検出できなくなってもシステムによる制御が継続され、ドライバが事前に設定していた速度まで加速する」高速域 ACC と好対照をなす。

高速域ACCと低速域ACCを、「ACCが持つ2つのモード」とみなすことが可能である^{1),3)}。一般に、複数のモードを持つシステムを使用する際、ユーザーが「作動中である」と思っているモードと、実際に作動しているモードが相違していることが起こり得る。例えば、高速域と低速域の2つのモード間を行ったり来たりするような走行状況が続いているうちに、「今、いずれのモードで走行しているのか」の認識が明確でないと、先行車が車線変更を行った後に別の車が自車前方に現れ、それが減速したときに「ドライバが自らブレーキをかけなければならない」のか、「何もしなくてもシステムがブレーキをかけてくれる」のかの判断が的確に行われないこともあり得る (Fig.1)。「モード・コンフュージョン」(mode confusion) と称せられる現象は、グラス・コクピット航空機が今もって直面している深刻な問題のひとつである。

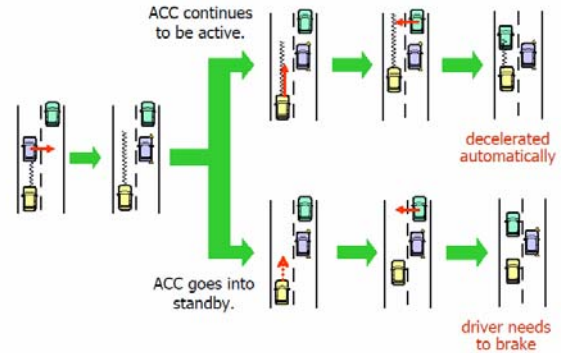


Fig. 1 モードの認識

3.2 状況認識の食い違い

「状況認識」(situation awareness) は日常用語としても使用されていることばであるが、つぎの3つのレベルを識別しておく、議論の精密化をはかることができる⁶⁾。

- レベル1： 何かが起こっていることに気づくこと
- レベル2： その原因を同定できること
- レベル3： これからの事態の推移が予測できること

さらに、状況認識を議論する際には、対象を明確に規定しておく必要がある。「システムに生じた異常に気づかなかった」というタイプの状況認識喪失であるのか、「システム異常には気づいたが、システムが置かれた環境状態との関連付けを誤った」というタイプの状況認識喪失であるのかによって、状況認識を改善するための方策・工夫は大きく異なるからである。何に対する状況認識を論じるのかを考える際に、人/ライブウェア (L) と、それを取り囲むソフトウェア (S)、ハードウェア (H)、環境 (E)、他者 (L) との相互関連を表現するSHELモデルが参考になるが、高度自動化の進んだシステムにおける人間と機械の共生を論じる際には、ほとんど人間と同等な認知・判断能力を持ち、時には人に命令されなくとも行動に移す自律性を持つコンピュータ (C) とS, H, E, Lとの相互作用を明示的に組入れた C-SHELモデル⁸⁾ (Fig. 2) が有用である。

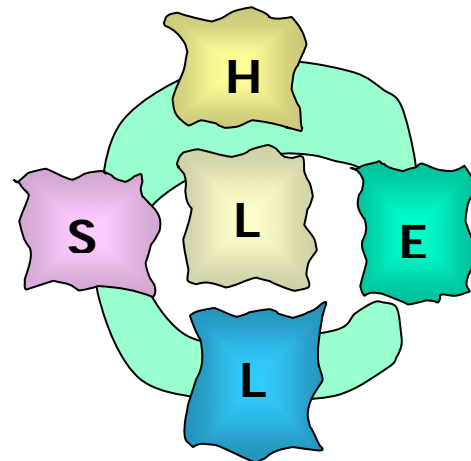


Fig. 2 C-SHEL モデル

自動車の運転をはじめとして、状況が認識できれば、何をなすべきかが容易に決まる例は多い。「状況 → 行動」型の標準手順を定めることができるのはそのためである。さて、ヒューマンマシンシステムでは、人と機械は独自のセンシング機能をもとに状況を把握しようとするが、必ずしも両者の状況認識は一致するとは限らない。

Fig. 3 (左) に示したケース1 を考えてみよう。高速域 ACC を使用して先行車へ追従走行を続けるうちに、先行車が渋滞の末尾に近づいてきたという設定である。このとき、前方の渋滞に気がついたドライバは、自車の ACC がやがて減速操作を開始するものと期待するであろう。しかし、そのとき比較的強いカーブに差し掛かっており、追従対象が、今までの対象であった先行車から、外側のレーンを走行中の車両に切替ったとしよう。しかも、外側のレーンがまだ渋滞には至っていないならば、ドライバの期待に反して、ACC は減速しないであろう。状況によっては、加速することもあり得る。

Fig. 3 (右) のケース2 は、自車の右横から割込んでくる気配を見せる車に気がついたドライバは、「割込み車は ACC にも見えていであろうから、ほどなく減速してくれるはずだ」と期待しているものの、割込み車は ACC のセンサ検知範囲内にまだ入っておらず、ACC は前方の先行車の加速に対応すべく、自らも加速を開始しようとしている状況を描いたものである。

上のいずれも、現実には起こっている状況を人は A と認識し、ACC は A* と認識するというように、状況認識が食い違っているケースである。人は「A → B」の規則に当てはめ、ACC が行動 B をとるものと予想（期待）するものの、ACC は「A* → B*」の規則にしたがって行動 B* をとる。ここで、人は、「なぜ、今、このようなところで加速するのか」と驚くことになる⁷⁾。

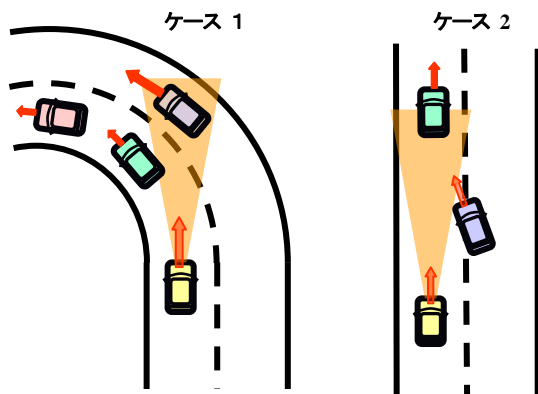


Fig. 3 状況認識の食い違い

3.3 複雑な制御ロジック

機械に付与された知能は、深い知識を持たないユーザーには到底理解できないほどの複雑なものとなっていることがある。車線逸脱防止支援システムを例にとって考えてみよう。このシステムは、ドライバの不注意等による走行車線からの逸脱を防止することを目的とするものである。逸脱の可能性があるとシ

ステムが判断した場合は、視覚的あるいは聴覚的に警報を発する。それでもドライバが警報に適切に反応しない場合には、システムがステアリングにトルクを与え、車線逸脱を防止する機能を持つ。

さて、車線逸脱防止支援システムを搭載した車両に乗ってみると、このシステムがどれほどの能力を持っているのか実感してみたいくなるのは人情のなせる業であろう。しかし、走行中に遭遇する場面は、似ているようであっても実際には異なるのが常である。あるとき、システムがステアリング・トルクを発生して車線逸脱を阻止する場面を経験したとする。次に、類似の場面が近づいてきたとき、先刻と同じようにシステムがステアリング・トルクを発生してくれるものと期待しても、実は、トルクが生ぜず、あわや車線を逸脱しようとするのに気づいて、あわててステアリング操作を行わなければならないことを経験することがある。「なぜ、ここでは対応してくれないのか」という「不作為」に対する驚きも、オートメーション・サプライズのひとつである。

4. 信頼・不信・過信

システムのユーザーである人は、程度の差はあるものの、システムに対するメンタルモデルを形成する。自らの置かれた状況に対する理解・把握と、システムに対するメンタルモデルをもとにして、そのシステムがその場面ですべき行動を予測する。しかし、オートメーション・サプライズに代表されるように、システムの行動がその人の予想を裏切るものであれば、人はシステムへの信頼を失う。信頼の喪失にとどまらず、結果的にはヒューマンマシンシステムの安全も損なわれることがある。

Lee & Moray¹⁰⁾ は、人がシステムに対して「信頼」(trust) を抱くためには、Table 1 に示す4つの要件を満足す必要があるとした。すなわち、4つの要件のうち満足されないものがあれば、そのシステムへの信頼は磐石なものとはいえない。前節に述べたオートメーション・サプライズは、Table 1 に示す(2) - (4)のいずれかが満足されていないものである。

Table 1 信頼の4つの次元

- | | |
|---------|---------------------------------|
| (1) 基礎: | 自然界を支配する法則や社会の秩序に合致していること |
| (2) 能力: | 終始一貫して安定的かつ望ましい行動や性能が期待できること |
| (3) 方法: | 行動を実現するための方法、アルゴリズム、ルールが理解できること |
| (4) 目的: | 上記の背後にある意図、動機が納得できること |

Table 1 の要件が客観的には満足されているにも関わらず、「満足されていない」と誤った判断をする場合を「不信」(distrust) と称する。一方、客観的には満足されていないはずの要件に対

して「満足されているはずだ」との判断を下す場合を「過信」(over-trust) と称する。いずれも、「不適切な信頼」(mistrust) の例である。オートメーション・サブライズの発生には、C-SHELモデルの構成要素に対する過信と不信が交錯していることを読み取ることは難しくないであろう。

なお、「依存」(reliance) という用語は、ときに「システムに依存するようなことがあってはならない」というように否定的な意味合いで用いられることがあるが、この用法は必ずしも正しくない。「信頼に値するものに対する依存」は当然の行為あるいは判断であり、ワークロード軽減の観点からも正当なものである。あってはならないものは、「信頼に値しないものに対する依存」である。「信頼」に対して適否を区別したように、「依存」に対しても適否を区別することが肝要である。

5. 人が機械を理解しやすくするには

人を支援するためのシステムが、その能力以上に信頼されても、能力を不当に低く評価されても、オートメーション・サブライズをはじめとする「人と技術システムとの間の mismatch」から逃れることができない。人と知能機械の関係を自然なものにするには、その機械が人にとって「わかりやすい」ものである必要がある。そのためには、ヒューマン・インタフェース設計に対して、下記の配慮(1) - (4)が必要となる³⁾。それらは、「状況が認識できれば、必要な行為の選択は容易い」とする Naturalistic Decision Making (NDM) の立場からも、さらに「人間中心の自動化」⁵⁾の立場からも重要な要請である。

- (1) 機械がなぜそのように判断したのか、その根拠が分かるような情報を提示する。
- (2) 機械が今何をしようとしているのか、意図理解の手がかりとなる情報を提示する。
- (3) 人と機械の状況認識共有を助けるような情報を提示する。
- (4) 機械への過信を防ぐために、機械の能力限界を知る手がかりとなる情報を提示する。

6. 機械が人を知る必要性

知能機械をはじめとする人工物は人が作り出したものである。しかし、そこでいう「人」が必ずしも「ユーザー」とは限らないことから、「人が理解しやすい機械」にすることの必要性を論じてきた。ここからは、ユーザーである人を機械も知っておく必要があることについて考察する。

自動車事故のなかには、「ドライバーが走行環境や自身の状態を的確に把握し、それに応じた運転をしておれば防げたであろう」とされる事故が少なくない。すなわち、「安全不確認」、「動静不注意」、「わき見運転」、「漫然運転」等、状況認識の誤り、不適切な意図、疲労等に起因する事故を未然に防止することができれば、理論上は事故件数は半減させることが可能である。

ドライバーは、状況を認知・予測しながら、それに見合う意図を形成して運転行動を行っているが、状況、意図、行動の間に不整合が生じると潜在的危険性が高まり、事故に至る可能性が

生じる。一般に、人の行動は、認知(認識)、判断、操作の繰り返しであるが、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 Fig. 4 にあるように、状況に潜在するリスクを正しく認知(認識)することはそれほど容易ではない。

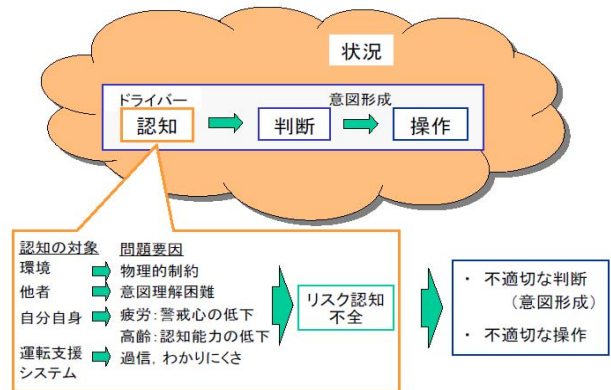


Fig. 4 自動車運転における認知・判断・操作

ただし、認知が基本であるからとはいえ、ドライバーの心の中を見ることはできず、認知の適否を直接的に知ることもできない。そこで、ドライバーの挙動を観測し、行動データベースとの照合を行うことによってドライバーの意図を推測し、さらに、機械が理解した「状況」との照合から、ドライバーの状況認識の適否を推測する、といった方式が採られることになる (Fig. 5)。

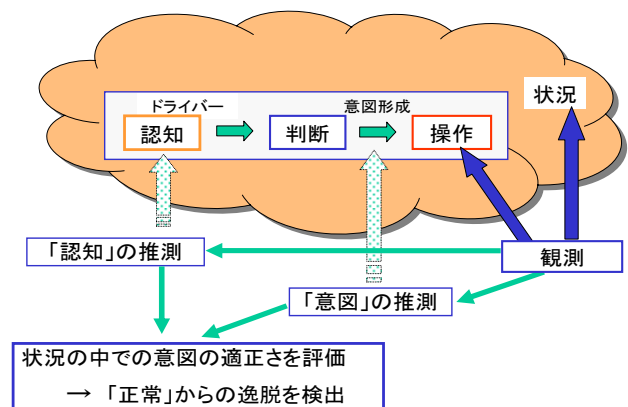


Fig. 5 状況と意図の理解によるリスクの回避

そのようなアプローチにより、ドライバーが潜在的危険状態に陥ることを防止する、あるいは仮に潜在的危険状態に陥ったとしても早期にそれを検出し、安全な運転行動への復帰を促すしくみを開発しようとする試みのひとつが、文部科学省科学技術振興調整費による重要課題解決型研究「状況・意図理解によるリスクの発見と回避」プロジェクト(研究代表者: 稲垣敏之, 研究期間: 平成16年度~18年度, 研究費総額: 5億9500万円)

である (Fig. 6). そこでは, 状況・意図に応じた予防安全型自動車運転支援の実現を目指し, 平時における運転者の状況認識支援と負荷調整, 緊急時のリスクを低減する適応的機能配分を行うための技術, すなわち, (1) 高リスク心的状態の実時間検出技術, (2) 状況認識の強化技術, (3) 緊急時の安全制御技術の開発, などが課題となる. (1) では, ドライバの姿勢, 手足位置や動き, 視線方向等のセンシングデータから, 高リスク心的状態を実時間で検出する技術の開発が主眼となる. また, (2) では, 警戒心等についてドライバの「通常レベルからの逸脱」が疑われるときの状況認識改善を促進させるための情報提示技術が課題である. ただし, ひとつ注意が必要である. 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高い」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」とのメッセージ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. にわかには納得しにくい情報を与えられたとき, 人はその情報を信用するとは限らず, そのような情報を提供する機械にも信頼を置かないことがあり得る.

では, どのようにすればよいのだろうか. ひとつの方法は, 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, 上述のメッセージは提示せず, その間の安全は機械が担保するというものである. 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権限委譲の準備は整えておきながらも, 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, 機械は表に顔を出さない」ようなシステム設計である. これは, 適応的機能配分の一つである. 適応的機能配分は (3) にも必要な技術となる. すなわち, ドライバの警戒心レベルの改善が不十分な中で事故に至る可能性の高い事象が生じたときは, 直ちに権限委譲を行うことにより, 事故回避あるいは事故被害の最小化を図るものとなる.

7. 人と機械が状況に応じた協力ができるように

「人間中心の自動化」では, 「最終決定権は人に与えておくべきである」⁵⁾との主張がなされるのがふつうであるが, 前節までにみたように, 人の認知 (あるいはそれに引き続く判断, 操作) はつねに正しいという保証はない. 「このままでは事故に至る」ことが認識できていても, それを回避するための操作が実行できない事例が少なくないことも知られている. すなわち, 人と機械が共生するヒューマンマシンシステムを実現するには, 「最終決定権を持つのは人か, 機械か」という対立構造に立脚したシステム設計からの脱却が求められる.

人と機械の協調形態を探る上で, 自動化レベル (level of automation) の概念を有効に利用することが可能である. Sheridan による 10 段階のレベル¹¹⁾に, 筆者らの提案による「自動化レベル 6.5」を加えたものを Table 2 に示す.

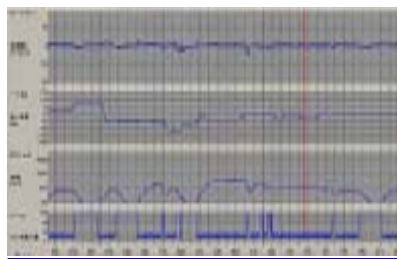
Table 2 Scales of levels of automation

1.	The computer offers no assistance, human must do it all.
2.	The computer offers a complete set of action alternatives, and
3.	narrows the selection down to a few, or
4.	suggests one, and
5.	executes that suggestion if the human approves, or
6.	allows the human a restricted time to veto before automatic execution, or
6.5	executes automatically after telling the human what it is going to do, or
7.	executes automatically, then necessarily informs humans, or
8.	informs him after execution only if he asks, or
9.	informs him after execution if it, the computer, decides to.
10.	The computer decides everything and acts autonomously, ignoring the human.

「最終決定権を持つのは, どのような場合に人であり, どのような場面では機械であるのか」を検討することは, 「自動化レベルをいかに設定するか」という問題と等価である. 最適な自動化レベルの選定には, 3つのアプローチがある⁹⁾. すなわち, (1) 数理モデルを用いた理論的解析に基づく選定, (2) 認知工学的実験による選定, (3) ヒューマンマシンシステムのコンピュータ・シミュレーションによる選定である. それぞれの方法には得失があり, 対象や用途に応じて使い分ける必要がある. 詳しくは, 文献⁹⁾を参照されたい.

参考文献

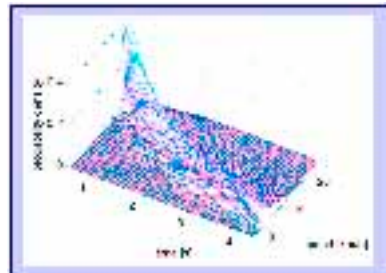
- 1) 伊藤他: 高速域 ACC と低速域 ACC が混在するシステムにおけるモード認識, 自動車技術会 2004 年秋季大会.
- 2) 稲垣: ヒューマン・マシン・システム- 高信頼性が損う安全性. システム/制御/情報, 41(10), 403-409, 1997.
- 3) 稲垣他: 2つのモードを持つ ACC システムへのドライバのモード認識, 自動車技術会 2003 年秋季大会.
- 4) 稲垣: 人間と機械の機能分担, 自技会「人と技術の協調によるアクティブセイフティ」シンポジウム, 2004.
- 5) Billings, C. E.: *Aviation Automation - The Search for a Human-Centered Approach*. LEA, 1997.
- 6) Endsley, M.: Towards a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*, 37(1), 32-64, 1995.
- 7) Inagaki, T.: Adaptive automation: Sharing and trading of control. *Handbook of Cognitive Task Design*, Chapter 8, 147-169, LEA, 2003.
- 8) Inagaki, T.: New challenges on vehicle automation: Human trust in and reliance on adaptive cruise control systems. *Proc. IEA 2003 (CD-ROM)*, 4 pages, 2003.
- 9) Inagaki, T.: Design of human-machine interactions in light of domain-dependence of human-centered automation; *Cognition Technology & Work* (in press).
- 10) Lee, J. & Moray, N.: Trust, control strategies and allocation of function in human machine systems; *Ergonomics*, 35(10), 1243-1270, 1992.
- 11) Sheridan, T. B.: *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. MIT Press, 1992.



走行環境と行動データに基づく運転行動モデル



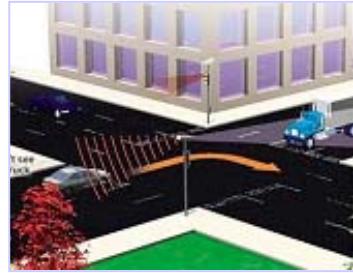
カメラ画像に基づく走行環境理解と運転者の表情追跡



確率・統計的手法による状況・意図理解



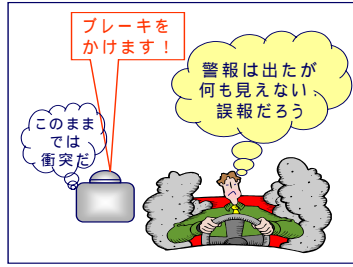
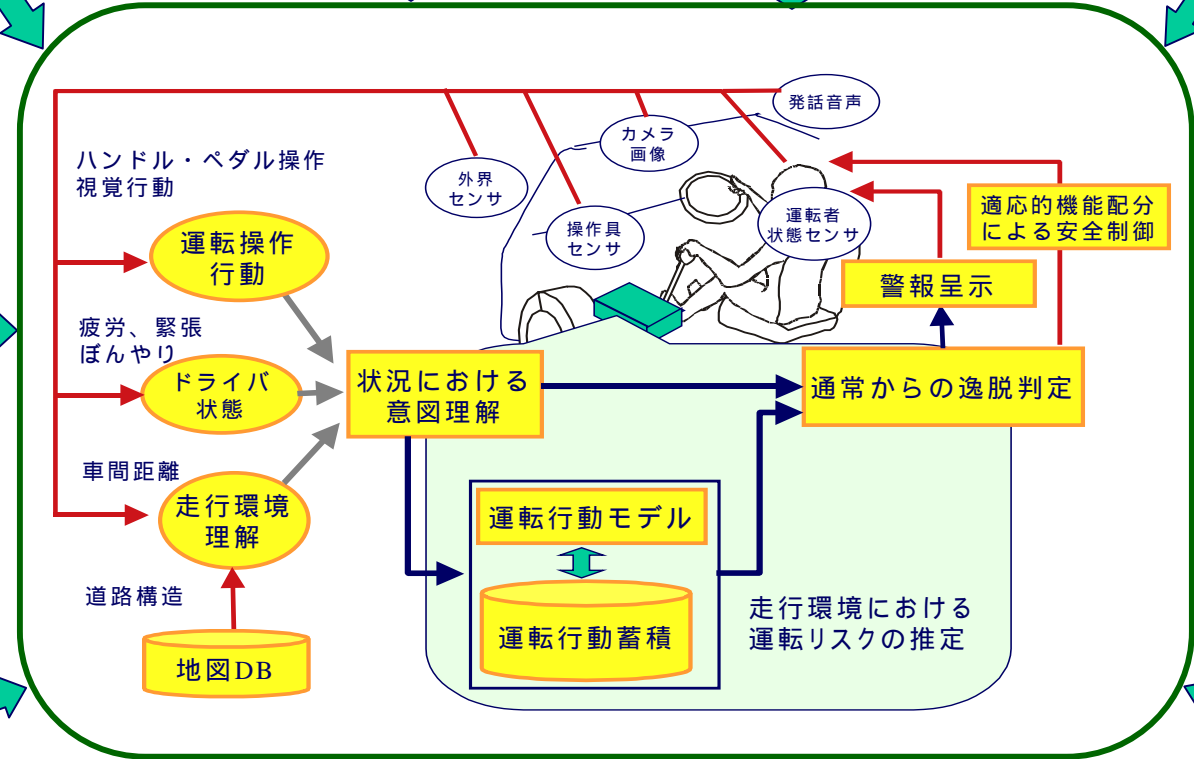
発話音声による心身状態実時間センシング技術



動的環境理解のための視覚補強技術



高齢者の身体・認知特性に適した支援



運転リスクを最小化する人間機械協調



緊急度と運転者の状況認識に応じた警報生成

動的環境と人の状態・意図に応じた支援により自動車の安心・安全を確保する予防安全型技術の実現

Fig.6