

## 操作応答関係の類似性がモード認識にもたらす影響

堀口 由貴男\*・福寿 竜一\*・榎木 哲夫\*

Effects of Similarity in Action-Effect Configuration on Mode Awareness

Yukio HORIGUCHI\*, Ryuichi FUKUJU\* and Tetsuo SAWARAGI\*

Automated systems are often structured into modes for providing enhanced capabilities to perform complex tasks, but they also increase the need for and difficulty of maintaining mode awareness, which may induce mode errors and eventually lead to automation surprises. Salient feedback on the mode status is necessary for the user to maintain mode awareness, and it should be carefully designed not to interfere in the user's primary task to be achieved in collaboration with the systems. For the purpose of developing a practical theory for effective and robust supports for maintaining mode awareness, this study focuses on *action-effect relations* as an intuitive human-machine communication channel. An action-effect relation is defined as an association of a user action with some observable effects on the system behavior, and it is expected to provide additional valuable information on the internal state of the system with no focal visual attention required. From this perspective, one hypothesis is made that different modes with a same or similar configuration of action-effect relations should be easily mixed up with one another. This paper tests this hypothesis through a driving simulator experiment where subject drivers were examined on their awareness of the operating mode status of ACC (Adaptive Cruise Control) during driving with the mode-rich automated system. Another experiment examines the contribution of differentiated configuration of action-effect relations to enhancing mode awareness.

**Key Words:** mode awareness, mode error, action-effect relations, human-machine systems

## 1. はじめに

複雑な作業を自動化する機械の振舞いは、その活動の様式（モード）がイベントに反応して切り替わる情報処理メカニズムによって実現される<sup>1)</sup>。このモードの存在は、人と機械の双方がタスクの遂行に密接に関与する共同作業においてさまざまな問題をもたらす。特に機械のモードが注意の及んでいないところで変化することは、ユーザから見える状況の不確かさを増大させシステムの振舞いを予測困難なものにすることから、ユーザの混乱や過誤の温床であり<sup>2)</sup>、オートメーションサプライズ (automation surprises)<sup>3)</sup>の主要因となっている。そして、自動化が高度になればなるほどモードの遷移構造が複雑化し混乱の危険が増すために、システムの活動状態やその意図を表わすモードをいかに的確にユーザに伝えるかが人間-自動化系の設計において重要になる<sup>3)</sup>。

一方、人は外界に対して積極的に働きかけることを通じて解釈のための情報を獲得する能動的な認知主体であり、外界とのインタラクションから得られるフィードバック情報は、

そのような行為者の状況理解に大きな意味をもつ。この構図を人間-機械間関係として捉えると、ユーザの操作入力とそれに対するシステムの反応挙動の間で成立する対応関係は、システムに関するユーザのメンタルモデル<sup>4)</sup>を形成する重要な情報である。本研究では、この対応関係を『操作応答関係』と定義し、その構成がシステムのモード情報の伝達に果たす機能について検討する。

モードの特定には、システムの動作則についての知識やモード遷移の記憶といったユーザ内部の情報と、インタフェース表示などの外部から提供される情報の両方が認知資源として活用される。そしてユーザのモード認識は、モード表示機器 (mode annunciator) の参照によって直接的に更新される場合と、モード遷移をもたらすイベントの知覚に基づいてユーザ内部で間接的に更新し維持される場合が考えられるが、本研究の焦点は、これらとは別種のモード認識過程としての操作応答関係の利用にある。間断なく注意を割かなくてはならないタスク環境では、モード管理に必要な認知資源がユーザの本来のタスクと競合する可能性が高いため、モード表示が情報伝達の経路として機能しない状況が発生し得る。たとえば視覚的注意を奪われることで、表示確認の機会を逸したり、頭の中で保持していたモード認識が混乱したりするなどの危険が当然考えられる。このような環境下でのモード認識の頑健性を高めるためには、即座に利用できる外的な認知資源を

\* 京都大学大学院工学研究科 京都市左京区吉田本町

\* Graduate School of Engineering, Kyoto University, Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto  
(Received January 19, 2009)  
(Revised June 16, 2009)

幾重にも用意することが求められるが、操作応答関係はそれを構成する有望なコンポーネントになると考えられる。

認知的な手がかりとして操作応答関係がモード情報の伝達に寄与するには、それが識別しなくてはならないモードごとに差別化されている必要がある。逆に操作応答関係がモード間で類似し区別する情報をもたない場合、それらのモードはより取り違えられやすいのではないかと予想される。そこで本研究では、操作応答関係の類似性が自動化システムとの共同作業におけるユーザのモード認識にどれほど影響を与えるかについて調査する。さらに、モード認識を支援するインタフェース設計の観点から、操作応答関係を差別化することの効果についても議論する。

本稿の構成は以下のとおりである。2章では、人間-自動化系におけるモードエラーの問題とそれに対する先行研究の動向について説明する。3章では、操作応答関係の認知的な手がかりとしての役割について見解を述べるとともに、それに基づくインタフェース評価基準を提供するモード誤認識予測手法を提案する。そして4章では、提案手法を検証するために実施した被験者実験について説明する。この実験では、先進安全自動車技術の一つであるACC (Adaptive Cruise Control) を実装したドライビングシミュレータを使用し、システムの動作モードに対するドライバの認識のパフォーマンスを調査している。さらに5章では、操作応答関係の差別化によるモード認識支援効果について、同実験環境を用いて検討した結果を報告する。6章では、二つの実験結果に基づいて提案手法の効果について考察するとともに、その技術的課題を整理する。最後に、7章において本研究の知見をまとめる。

## 2. 人間-自動化系におけるモードエラー

### 2.1 モードエラーとは

Norman<sup>4),5)</sup>によれば、モードエラーとは、ユーザが状況の分類を誤り、ユーザの分析した状況では適切だが、実際の状況下では不適切な行動を選択した結果生じた人的過誤を意味する。すなわち、ユーザの意図した行動であったが、それを実行するモードを間違っただけで、想定とは異なる振舞いをシステムが示したという「スリップ」(slip)の一種である。本来は、ユーザの入力や指令にのみ反応する比較的単純なコンピュータ機器を対象とした、ユーザが自分のペースで作業する際に発生する人的過誤が想定<sup>(注1)</sup>されていたが、高度な自動化が対象となるとその問題はより複雑なものとなる<sup>3),6)</sup>。なぜならそのような機械は、ユーザの指令だけでなく、外部状況の変化やシステム内部の要因にも反応してモードを変化させるからである。そして、制御の高度化にともなってモード数が増大し、そのようなユーザが関与しないモード変化を多数含む複雑なモード遷移構造を機械が備えるようになった。

複雑化した機械との共同作業において、ユーザは直面する作

業状況に最も適したモードの選択を求められる。しかし、自動化のモード変化を追跡して時機を得た情報の取得と操作介入を実践することは、非常に認知的負荷の高い副次課題である。共同作業において効果的なインタラクションを実現するためには、共同相手の行動をうまく予測できる必要がある<sup>7),8)</sup>。モードをもつ機械との共同作業についても同様であり、ユーザは機械のモードやモード遷移に関する適切なメンタルモデル<sup>4)</sup>を構築し、モード遷移イベントの発生を知覚して、モードの変化を追跡することが求められる<sup>9)</sup>。これが不十分な場合には、不必要な操作の実行や必要な操作の不実行が発生することになる。特に後者は自動化との共同作業に特徴的とされる<sup>6),10)</sup>。

### 2.2 モードエラーに対する取り組み

Norman が適切なフィードバックの欠如をモードエラーの要因として挙げているが<sup>4),5),11)</sup>、ワープロのような比較的単純な人間機械系におけるモードを対象とした研究は、システムの状態をどうユーザにフィードバックするかに重点が置かれている。たとえばMonk<sup>12)</sup>は、ユーザのモード変化に対する気づきを向上させるために、操作に付随して発生する音を利用したモード遷移の通知方法(“keying-contingent sound”)を提案し、複数反応炉の調節タスクに適用している。また、Sellenら<sup>13)</sup>は、ユーザが自ら積極的に維持しなくてはならないモード状態(user-maintained mode states)の設計がモードエラーの防止に非常に有効であることを提案している。特に、ユーザの認知負荷を軽減するという観点からは、主タスクと競合する視覚よりも運動感覚へのフィードバック(kinesthetic feedback)のほうがシステムの状態を認識させるための感覚チャンネルとしてより効果的であることを、テキストエディタを用いた文書編集課題について検証している。

一方で、SarterとWoods<sup>6)</sup>が、自動化の状態と振舞いに関する不明瞭な表示に加えて、メンタルモデルの欠陥をモード誤認識の要因として挙げている。複雑さを増した機械との共同作業ではシステム設計の問題点を特定することがより難しくなり、システムの動作をユーザのメンタルモデルと厳密に照合する作業が必要になる。そのため、人間-自動化系におけるモードエラーに関する研究では、状態機械モデルを用いた形式手法(formal method)の観点から、ユーザに混乱をもたらすモード設計の誤りやあいまいさを論理的に導出する分析が実践されている<sup>1),9),10),14)-21)</sup>。たとえばDeganiら<sup>9),14),15)</sup>は、有限状態機械モデルをベースとした、人間-自動化系におけるモード誤認識の潜在的な可能性を特定するOfanと呼ばれるフレームワークを提案している。Ofanでは、人間オペレータと機械、および両者をつなぐユーザインタフェース(UI)要素であるコントロールとディスプレイ、そしてシステムの外部環境という五つのモジュールの状態を有限状態機械によって表現する。そして、特定の作業シナリオにおいてそれらの状態がどのように遷移するかをシミュレートすることで、モードエラー発生のリスクやその要因を分析することができる。

(注1) モードエラーの名称はテキストエディタの二つのモードテキストモードとコマンドモードに由来している<sup>5)</sup>。

また, Leveson ら<sup>10)</sup> は, モード誤認識の可能性を事前に洗い出すための分析技術として SpecTRM (Specification Tools and Requirements Methodology) を提案している<sup>10), 16)</sup>. SpecTRM では, SpecTRM-RL (SpecTRM Requirements Language) と呼ばれるソフトウェア要求事項の記述言語を用いて, UI コンポーネントを含む自動化の動作仕様を状態機械としてモデル化する. そして, 作業シナリオに沿ってシミュレートされた機械の状態遷移とユーザの想定していた状態遷移との齟齬を分析することで, モード誤認識と関連づけられる設計制約違反を特定する.

これらの取り組みは, いずれもシステム動作則の整合性の観点から人間-自動化系におけるモードエラー要因の解消を指向した価値ある技術提案となっている. しかしながら, 表示機器にそのときの自動化のモード構成が正しく表示されていないが, ユーザがそれに気づかずにオートメーションサブライズが発生したという事例も報告<sup>22), 23)</sup>されているように, モード認識支援のためのインタフェース設計については, 動的なマルチタスク環境における人間の認知特性に対する理解を深め, その知見に基づく技術開発を進める必要がある<sup>6)</sup>.

### 3. 操作応答関係に基づくモード設計評価

本研究では, ユーザの操作入力とそれに対するシステムの反応挙動の間の対応関係を操作応答関係と定義し, モード認識支援のためのインタフェース評価の基準として用いる.

#### 3.1 認知的な手がかりとしての操作応答関係

Norman<sup>4)</sup> によれば, メンタルモデルとは「自分自身や他者や環境, そしてその人がかかわりをもつものなどに対して人がもつモデル」とされる. ユーザはシステムがどのように機能するかについてのメンタルモデルを自身内部に構築しており, それを用いてシステムの状態について推論し, 動作を予想し, 反応挙動の理由を説明しようとする. 他方, そのシステムの実現は, デザイナが頭に思い描いたメンタルモデル (= デザインモデル) に基づいている. ユーザがシステムを適切に理解し使用するためには, ユーザのもつモデルがデザインモデルと整合している必要がある. しかし, ユーザとデザイナーがそのためにコミュニケーションをとることはないため, 具体化されたシステムそのものがそれを媒介する存在となる. すなわち, ユーザはシステムとのインタラクションを通じてシステムについてのメンタルモデルを構築し, そこでユーザが目にするシステムの外観や操作と応答の対応関係, 説明の類がシステムの「イメージ」をユーザに提供する. Fig. 1 はこれらの関係を図に表現したものである.

システムイメージの構成要素でも, 目に見える外観は対象の理解に大きく貢献するが, そこにシステムのすべてが露わになっているわけではない. そのため, 人は隠された特徴を引き出すべく積極的に対象に働きかけ, システムの認識にインタラクションを活用しようとする<sup>24)</sup>. 作業環境に規則的な操作を加えることで隠れた特徴に特定する別の情報源を作り出したり<sup>25)</sup>, 意思決定が単純になるように空間構造に秩序を

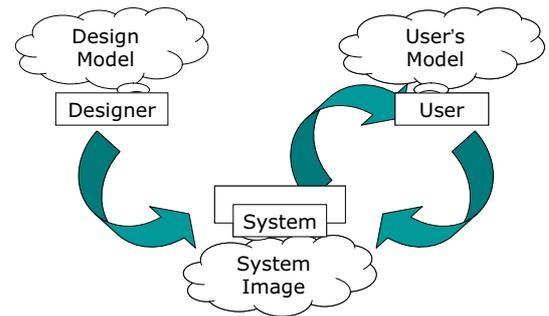


Fig. 1 Three aspects of mental models

与える<sup>26)</sup>といった非常に巧みな認知戦略がこれに含まれる. そして, インタラクションを通じて得られるシステムの状態に関するフィードバック情報は, ユーザの状況の理解に重要な意味をもつ.

Monk<sup>27)</sup> は, インタフェースが抱える潜在的な問題を洗い出すための技術として, ユーザが選択可能な操作 (action) とユーザが観測可能なその操作のシステムへの影響 (system effect) の間で成立する規則を “action-effect rules” と表現し, システムの内部状態を参照することなく, システムがどのように振舞うかを記述する準形式的な表記法を提案している. このようなモデル化はシステムをブラックボックスとしてユーザ視点で捉えたものであり, インタラクションを通じて得られる情報の価値をより強調している. 人間-自動化系という動的なマルチタスク環境でのモード認識を支援するには, そしてモード表示機器を補完するインタフェース設計を検討するには, このようなシステムの操作応答関係の考慮が重要である. 特に, ユーザの意識的な操作の文脈の中で得られるシステムの反応挙動は顕在性が高く, ユーザの状況認識を効果的にサポートするものとする.

#### 3.2 操作応答関係に基づくモード誤認識予測

インタフェース設計を評価する基準として, 操作応答関係を利用してモード誤認識の可能性を見積る手法を提案する. 提案手法は, システムのモードを操作応答関係の有無を属性としたベクトル量としてコード化し, そのモード間の類似性を評価する. そして, ユーザの操作入力に対するシステムの反応挙動が似ていれば似ているほど, それらのモードが混同される危険性が高いものとみなす.

以下に具体的な手続きを述べる.

(1) ユーザが認識できる振舞いのレベルで, システムに実装されている操作応答関係  $R_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) を列挙する. このために, タスク遂行に関係する, ユーザが操作可能な操作デバイスを列挙し, それらに対する異なる種類の操作ごとにユーザが知覚可能なシステムの反応挙動を調べる. その際, 操作入力に反応してモード遷移が発生する場合のシステムの反応挙動は対象から除外し, モード状態が維持される条件下でのユーザとシステムのインタラクションのみを分析する. そして, ある操作に対してシステムが分析対象のモード間で異なる反応を示す場合に, それを  $R_i$

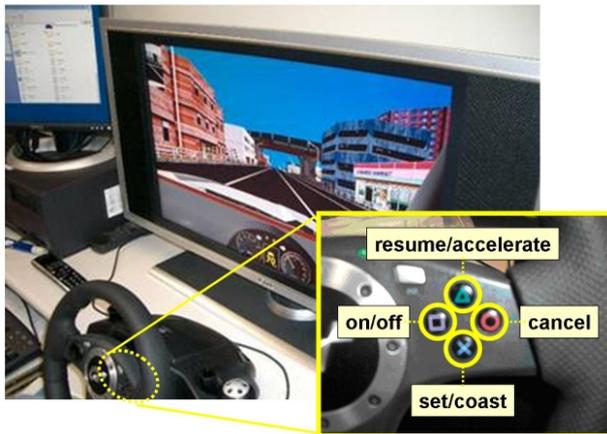


Fig. 2 Driving simulator equipped with ACC

のリストに加える．各  $R_i$  は、反応挙動の種類に応じてダミー変数を用いて表現される．たとえばある操作に対するシステムの反応が三つのクラスに分類できた場合には、それぞれを  $(1, 0, 0)$ 、 $(0, 1, 0)$ 、 $(0, 0, 1)$  というようにコード化する．

(2) ユーザが識別すべきシステムのすべての動作モードを、そのモードが該当する  $M$  個の  $R_i$  をつなげた  $N$  次元の 2 値ベクトルとしてコード化する．これをモードベクトルと呼ぶことにする．

(3) モードベクトル間の距離を計算し、モード間の非類似性の尺度とする．そして、モード間距離が小さく混同される可能性の高いモードの組合せを特定し、設計改善のための要検討対象とする．

なお、(1) の分析でモード遷移の反応挙動を対象外とした理由は、モードが遷移したことによって結果的にシステムの動作モードが認知されるが、それはシステムの現在のモードを特定するための行為とフィードバック情報の関係ではないためである．

#### 4. 運転支援システムのモード識別実験

提案手法の有効性を検証するために、ACC による車速自動制御機能を模擬したドライビングシミュレーション環境を構築し、ドライバのモード認識パフォーマンスを調査する被験者実験を行なった．

##### 4.1 実験環境

Fig. 2 に本研究で使用したシミュレーション実験環境を示す．ステアリングコントローラには Logicool GT FORCE Pro を使用した．ACC システムの機能は、ハンドル内側に取り付けられた四つのボタンスイッチを使って操作される．

ACC の最も基本的な機能は、ドライバが設定した速度を正確に維持して自車両を走行させることである．しかし、一度先行車が検知されると、システムは安全な距離を保つように自車速度を制御してその車両に追従させることができる．さらに、ACC による走行制御の途中で先行車を追い越したく

なった場合などには、アクセルペダルを踏み込むことでドライバが一時的に自動運転をオーバーライドすることができる．このような ACC の知的な動作は、さまざまな制御モードとそれらのモード間の遷移によって実現される．Fig. 3 は、ドライビングシミュレータに実装した ACC の振舞いを構成するすべてのモードと遷移イベントを示している<sup>(注2)</sup>．このマシンモデル内で実線で描かれた有向リンクはドライバが起動するモード遷移を表わす．一方、破線で描かれた有向リンクは、ACC 独自の交通環境の判断によって実行される自動的なモード遷移を表わす．そして、これらのリンクを修飾するラベルはモード遷移を引き起こすイベント条件を表わしている．

Fig. 3 より、ACC の動作モードには *idle*、*armed*、*canceled*、*override*、*constant-speed*、*car-following* の六つがあり、共通する遷移イベントに応じていくつかのグループにまとめることができる．各モードの機能はつぎのとおりである．

- *idle* モードは ACC がまだ起動されていない状態を表わす．この状態のときに“on” ボタンを押下すると、システムが待機状態 (*armed*) に移行する．
- *armed* モードにあるシステムは、ドライバからのクルーズコントロール始動の合図を待っている状態である．車速が 30km/h 以上のときに“set” ボタンを押下すると、システムは直ちに *constant-speed* モードに移る．その際、ACC の目標走行速度には *set* イベントが発生したときの車速が設定される．
- *constant-speed* モードにある車両は、設定された目標速度を正確に守って走行する．ACC が *engaged* にある限り、ドライバは“accelerate” や“coast” ボタンを使って目標速度を変更することができる．そして、システムが前方に別の車両を発見し、その走行速度が自車両よりも遅い場合には、その車両は追従走行 (*car-following*) のターゲットになる．
- *car-following* モードにあるとき、自車両は先行車との車間距離を安全に保って走行する．先行車が警戒領域から離脱すると、システムはその車両をターゲットから外し、*constant-speed* モードに戻る．
- システムがアクティブ (*active*: *constant-speed* モードもしくは *car-following* モード) である間は、ドライバはアクセルペダルを強く踏み込むことで自動制御をオーバーライド (*override*) して、設定速度よりも速く走行させることができる．そして、アクセルペダルを踏み込むのをやめると、ACC は再度 *constant-speed* モードに復帰する．
- システムが *engaged* (*active* もしくは *override* モード) のとき、ブレーキを踏むか“cancel” ボタンを押下すると、システムの状態は *canceled* に移行する．このモードの動作は *armed* とほぼ同じだが、“resume” ボタンが有効なのは *canceled* モードだけである．*resume* イベントによ

(注2) Fig. 3 のモデル表記は、Degani らの方法<sup>1), 14), 15)</sup> に倣っている．

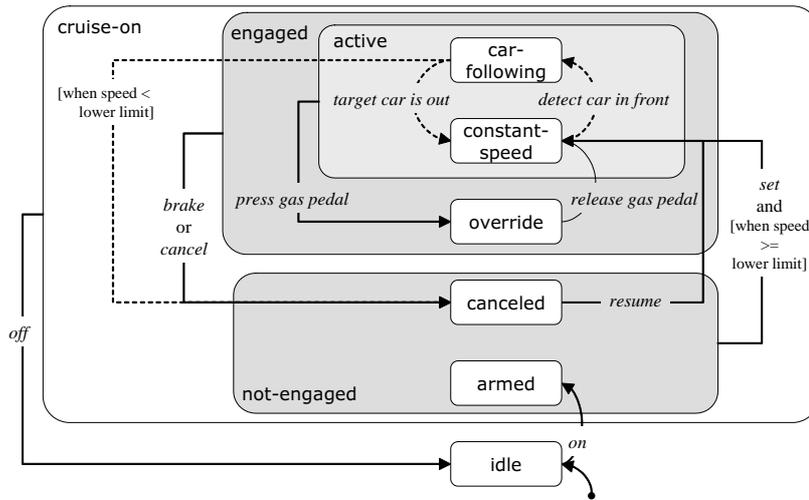


Fig. 3 Modes and their transitions constituting the ACC system

り、キャンセルされる前に設定されていた目標速度で ACC を再度アクティブにすることができる。また、自車両の走行速度が決められた限度を下回った場合 ([when speed < lower limit]) には、システムは自動的に car-following から canceled に移行する。

- cruise-on 内 (idle 以外) のどのモードにあっても、“off” ボタンを押下するとシステムはいつでも idle 状態になる。

システムの状態、すなわち現在の ACC の動作モードとそれが参照する設定情報は、インストゥルメントパネル内の表示を参照することでいつでも知ることができる。Fig. 4 に示すように、車アイコンの色の違いと目標走行速度のデジタル表示、先行車の検知を意味する車アイコン両脇の縦線の点灯の組合せによって ACC の動作設定と状態が区別して表示される。

4.2 動作モードのコード化

ドライバーから見えるシステムの操作応答関係を属性として、Fig. 3 の ACC のモードをベクトル形式で記述する。この実験環境においてドライバーの操作対象となるのはアクセルペダルとブレーキペダル、ハンドル、四つのボタンスイッチ、ウインカースイッチ、シフトレバーであるが、これらへの操作に対してモード間で反応挙動に違いのあるものとして、以下に示す 4 種類の操作応答関係がリストアップされた。

- R<sub>1</sub>: アクセルペダルを踏み込んだときの反応挙動
  - R<sub>1</sub> = (1, 0): 自車両が加速する
  - R<sub>1</sub> = (0, 1): 自車両が加速しない
- R<sub>2</sub>: アクセルペダルから足を放したときの反応挙動
  - R<sub>2</sub> = (1, 0): 自車両が減速する
  - R<sub>2</sub> = (0, 1): 自車両が減速しない
- R<sub>3</sub>: resume/accelerate ボタンを押したときの反応挙動
  - R<sub>3</sub> = (1, 0): 目標走行速度の数値が増加する
  - R<sub>3</sub> = (0, 1): 目標走行速度の数値が変化しない
- R<sub>4</sub>: set/coast ボタンを押したときの反応挙動



(a) Mode annunciator

モード	表示状態
idle	—
armed	車アイコン [青]
canceled	車アイコン [青], 目標速度
constant-speed	車アイコン [黄], 目標速度
car-following	車アイコン [黄], 目標速度, 先行車
override	車アイコン [赤], 目標速度

(b) Annunciator configuration

Fig. 4 Mode annunciator to indicate the operating state of the ACC system

- R<sub>4</sub> = (1, 0): 目標走行速度の数値が減少する
- R<sub>4</sub> = (0, 1): 目標走行速度の数値が変化しない

そして、これらの関係を用いて各モードを 2 値ベクトルとして表現するとつぎのようになる。

- idle = (1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1)
- armed = (1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1)
- canceled = (1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1)
- constant-speed = (0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0)
- car-following = (0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0)
- override = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0)

このように定義されたモードベクトル間の距離は Table 1 のとおりである．距離計算にはユークリッド距離を使用した．操作応答関係の似通ったモードは混同されやすいとの立場に立つと，{idle, armed, canceled} や {constant-speed, car-following} という，モード間距離が 0 になる組合せは高い確率でモード誤認識が発生することが見込まれる．

#### 4.3 実験条件

実験では，仮想的な市街地の中を ACC を利用しながら走行する運転課題を被験者に課した．他車両も多数走行している市街地道路は信号機によって交通がコントロールされており，被験者はそのような道路環境の中を実験者が指定するコースに沿って運転する．実験中可能な限り ACC の機能を活用してもらうために，「赤信号で停車したら ACC の機能をオフ (idle) にする」「特定の道路区間では先行車に対して追い抜きをかける」というルールを運転に課した．

被験者は約 10 分間の市街地走行を行なうが，その間におよそ 1 分間隔で強制的なシミュレーション停止の割り込みが入る．これは Endsley らの SAGAT (Situation Awareness Global Assessment Technique)<sup>28)</sup>の方法に倣ったものであり，割り込みの発生とともにシミュレータの画面が白く塗り潰され，被験者は 3 秒間 ACC の状態に関する情報を外部からまったく手に入れられない状況に置かれる．そして被験者にはそのときに把握している ACC の動作モードについて瞬時の回答を求め，彼らの直前の状況認識すなわちモード認識を調査した．この質問への回答のほかに，実際のモード遷移の履歴と自動制御の参照値 (ACC の設定速度)，インストールメントパネル内の表示状態についてのデータを記録した．なお，被験者は全員実験開始前に ACC システムのもつモードと遷移構造，そしてその操作方法に関する 20 分間のチュートリアルを受け，10 分間の練習走行を行なった．

#### 4.4 実験結果

延べ 35 人の被験者 (大学生および大学院生) に対して 262 個のサンプルデータを実験から得た．そのうち被験者が実際と異なる ACC の動作モードを回答したものが 59 個あり，モードの誤回答率は 22.5% であった．

ここでは，実験で収集したモード誤認識の発生分布が，提案手法で評価した操作応答関係の類似性とどれほど高い相関をもつかについて調べた．1 章で述べたように，モード認識にはさまざまな種類の認知資源が複合的に利用されるはずで，本実験環境でも誤認識回避のための情報源は複数存在する．それらの中から操作応答関係の影響のみを分離して評価することは非常に難しいため，誤認識発生傾向が操作応答関係に基づくモード間距離の指標でどれほどうまく説明できるかという観点から，提案手法を評価することにした．

Table 2 に実験から得られたモード誤認識の内訳を示す．誤認識率は，モード間距離の表 (Table 1) との対応をとるために，実際のモード A をモード B と回答した回数と実際のモード B をモード A と回答した回数を合計し，実際のモードが A あるいは B であった回数で除すことで算出している．

Table 1 Distances among mode vectors

armed	0				
canceled	0	0			
constant-speed	2.83	2.83	2.83		
car-following	2.83	2.83	2.83	0	
override	2	2	2	2	2
	idle	armed	canceled	constant-speed	car-following

Table 2 Resultant probabilities of mode confusions from the first experiment [%]

armed	8.3				
canceled	6.9	12.2			
constant-speed	0	1.0	6.3		
car-following	0	0	1.0	12.4	
override	0	4.1	4.3	4.3	0
	idle	armed	canceled	constant-speed	car-following

Table 1 と Table 2 を照合すると，モード間距離が 0 の組合せは，他の組合せの場合に比べて誤認識が発生しやすいことが確認できる．そして，二つのモードの組合せ一つを 1 事例としてモード間距離とモード誤認識率の間の相関係数を調べたところ， $-0.84$  という非常に高い負の相関が得られた．

以上の結果より，操作応答関係に基づいてモード誤認識の可能性を見積る提案手法の有効性が確認できた．ただし，constant-speed と canceled の組合せ (誤認識率 6.3%) などについては，提案手法では説明できないモード誤認識が発生している．これについては 6 章で考察を加える．

### 5. 操作応答関係の改変によるモード認識支援

4 章の実験では，システムの操作応答関係の構成がユーザのモード認識に影響を与えることを確認した．ここでは，その知見を積極的に活用し，操作応答関係に関してモード間の類似性を減らすことが運転中のドライバのモード認識パフォーマンスの改善に寄与するかどうかについて検討する．

#### 5.1 新たな操作応答関係の追加

Table 2 の結果の中で誤認識率が非常に高かった constant-speed と car-following の混同 (誤認識率 12.4%) を改善の対象とする．この改善のために，両者のモード間距離を拡げるべく，新たな操作応答関係を導入した．具体的には，ステアリングコントローラへのフォースフィードバック生成機能を利用して，ハンドルの硬さを ACC の動作モードに応じて変化させることにした．これを操作応答関係追加の手段として用いた理由は，constant-speed と car-following の両モードにおいて， $R_1$  から  $R_4$  以外でドライバが操作する可能性があり，操作に対してモード遷移をとまなわない操作デバイスが，本

Table 3 Distances among redesigned mode vectors

armed	0				
canceled	0	0			
constant-speed	3.16	3.16	3.16		
car-following	2.83	2.83	2.83	1.41	
override	2	2	2	2.45	2
	idle	armed	canceled	constant-speed	car-following

Table 4 Resultant probabilities of mode confusions from the second experiment [%]

armed	8.3				
canceled	6.3	10.9			
constant-speed	0	0	4.3		
car-following	0	0	3.1	2.5	
override	0	0	4.3	4.0	0
	idle	armed	canceled	constant-speed	car-following

研究のドライビングシミュレーション環境ではハンドルのみだったためである。また、反応挙動としてのハンドルの硬さの知覚は視覚的注意を必要とせず、自動車の運転自体に必要な認知資源と競合が少ない点も考慮した。

ステアリングコントローラのフォースフィードバック生成機能を利用した結果、以下の操作応答関係がシステムに追加された。

R<sub>5</sub>: ハンドルを操作したときの反応挙動

R<sub>5</sub> = (1, 0): 強い反力が返ってくる

R<sub>5</sub> = (0, 1): 弱い反力しか返ってこない

そして、モードベクトルはつぎのように変更された。

$$\text{idle} = (1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1)$$

$$\text{armed} = (1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1)$$

$$\text{canceled} = (1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1)$$

$$\text{constant-speed} = (0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0)$$

$$\text{car-following} = (0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1)$$

$$\text{override} = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1)$$

これにより、constant-speed と car-following のモード間距離は 0 から 1.41 に拡大した。Table 3 に改変されたモード間の距離を示す。

## 5.2 実験結果

延べ 13 人の被験者(大学生および大学院生)に対して 213 個のサンプルデータを実験から得た。この実験の被験者は全員 4 章の実験を経験している。また、実験条件は 4 章と同じである。

被験者が実際とは異なる ACC の動作モードを回答したのは 29 個で、誤回答率は 13.6% であった。モード誤認識の内訳を Table 4 に示す。Table 2 との比較より、constant-speed と car-following の混同が大きく低減されたことがわかる(2.5%)。

この実験結果はモード認識改善に向けた試みの一例を示したに過ぎないが、操作応答関係のモード認識に対する影響を再確認させるとともに、操作応答関係の観点から見たモードの差別化がユーザのモード認識の改善に寄与できることを示唆している。

## 6. 考 察

二つの実験結果から、システムの操作応答関係のモード間での類似がユーザのモード認識に悪影響を与えることを確認した。モード認識はモード表示の参照やモード遷移イベントの知覚によっても更新・維持されるため、どの時点において操作応答関係がそれに実際に利用されたかを特定するには特別な実験が必要になる。しかし、認知的要求の厳しいタスク環境においてモード認識の頑健性を高めるには、操作応答関係を利用可能な認知的な手がかりとして機能させる工夫が効果的であるとの示唆を得た。適用例に用いた自動車の運転は、システム外部の環境に間断なく視覚的注意を割かなくてはならないという点で、視覚のみに依存したモード表示が見逃される危険の高いタスクである。そして、そのようなきわめて動的に変化するタスク環境のためのインタフェースの設計については、視覚的注意を要求する情報表示への過度の依存から脱却するべく、複合的な感覚モダリティの利用が模索されている<sup>29), 30)</sup>。本研究で得られた知見は、ユーザが識別しなくてはならないモード間で操作応答関係を差別化すべきという非常にシンプルな規則であるが、このようなインタフェースに対する有用性の高い設計指針と評価技術を提供するものである。

一方で、constant-speed と canceled の組合せについては、提案手法で説明できないモード誤認識を Table 2 と Table 4 において確認している。この現象に対しては二つの要因が考えられる。まず一つは、モード遷移を発生させるイベントが主として別の目的を達成するために用いられるものであるために、そのモード遷移が操作者に意識されにくかったことによるというものである。constant-speed で走行中に brake イベントが発生することによって canceled に移行するというように、二つのモードはドライバのブレーキ操作によって関連づけられる。元来減速のために用いられるブレーキ操作が副次的にモード遷移を発生させる場合、その効果を常に意識しておくことは難しい。タスク環境が時々刻々変化する場合はおさらである。そのため、brake イベントの自覚がなければ、表示情報を確認しない限り、ドライバのモード認識は canceled に改められないことになる。二つのモードの混同は全部で 9 件あったが、そのうち直前の遷移イベントが brake であった事例が 7 件にのぼることが、この可能性を示唆して

いる。航空機における“kill-the-capture”事例の分析<sup>1),22)</sup>が指摘しているように、別の目的の操作に対する副次効果として発生するモード遷移は問題が多い。そのため適用例に用いたACCシステムは、constant-speedからcanceledへのモード遷移にはたとえばブレーキ操作とは別の専用操作(cancelボタン)に限定するようにするなど、本研究の焦点とは別の観点から改善が必要である。

提案手法の予測がconstant-speedとcanceledの誤認識に適合しなかったもう一つの要因としては、分析に用いたモード記述の不足が挙げられる。文献1),9)においてクルーズコントロールのヒヤリハット事例として説明されているように、ドライバが介入(override)を終えてACCが定速走行(constant-speed)に復帰するまでの過渡期には、アクセルペダルを放すと減速するというcanceled(もしくはnot-engaged)と共通の挙動が観察される。この特徴が被験者のモード認識に影響を及ぼした可能性があるが、動作モードのコード化において考慮されていない。そのため、このような過渡的な状態を別のモードとして再定義するといった改善の方法があると考えている。

また、提案手法はすべての操作応答関係の影響力を同等のものとしたが、操作に対するフィードバック情報の効果は呈示する感覚モダリティや呈示の様式によって当然違いがあるものと考えなくてはならない。たとえば5章において追加した操作応答関係(R<sub>5</sub>)は、constant-speedとcar-followingのモード間距離への寄与は1.41であるが、両モードの識別に対する改善効果は非常に大きいものであった。それは、Sellenら<sup>13)</sup>の主張の一つである、運動感覚へのフィードバックを利用した効果と考えることもできる。このような操作応答関係の差異の効果の違いを反映させることも含めて、モードのコード化と類似度計算の方法をより詳細に検討することが評価の厳密化には必要である。

さらに、本研究の実験は操作応答関係のモード認識への影響を評価することに主眼を置いたため、システムがもつすべてのモードを識別させるという設定を用いた。しかし、実際の応用では、どのモードを他と異なるものとしてユーザが認識しなくてはならないかというタスク仕様(task specification)<sup>20),21)</sup>の考慮が必要である。これには、モードの混同によって誘発される事態の深刻さを比較し、モード設計の評価の枠組みに取り込むことによって拡張が可能と考えている。

## 7. おわりに

本研究では、自動化システムがもつ操作応答関係がユーザのモード認識に与える影響について検討し、操作応答関係の類似性の観点からモード誤認識の危険性を予測する分析手法を提案した。提案手法は、各モードをシステムの操作応答関係の存否を属性とする2値ベクトルとしてコード化し、ベクトル間の距離によってモード混同の可能性を評価する。これをシステム外部の環境に間断なく視覚的注意を割かなくてはならない自動車運転タスクに適用し、ACC機能を実装した

ドライビングシミュレータを用いた被験者実験によって提案手法を検証した。実験で得たモード誤認識率の分布とモード間距離を照合した結果、提案手法による予測が裏付けられるとともに、意図的に操作応答関係を差別化することでモード誤認識の低減が期待できることを確認した。

一方で、呈示する感覚モダリティや呈示の様式によって操作応答関係が認知的な手がかりとして機能する程度には違いがある。そのため、モード誤認識の可能性をより厳密に評価したり、認識支援のためにモード間をより効果的に差別化するためには、このような情報呈示の様式についての調査を進める必要がある<sup>31)</sup>。また、誤認識によって誘発される事態の深刻さにもモード間で違いがある。そのため、より重点的に解消すべきモード設計上の問題を特定するために、ユーザに求められるタスク仕様の側面を考慮できるような評価体系を構築する必要があると考えている。

## 参考文献

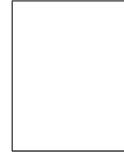
- 1) A. Degani: Taming HAL: Designing Interfaces Beyond 2001, Palgrave Macmillan (2004)
- 2) J・ラスキン(村上 訳): ヒューメイン・インタフェース; ビアソンエデュケーション(2001)
- 3) N.B. Sarter, D.D. Woods and C.E. Billings: Automation surprises, (G. Salvendy, ed) Handbook of Human Factors & Ergonomics, Wiley (1997)
- 4) D・A・ノーマン(野島 訳): 誰のためのデザイン; 新曜社(1990)
- 5) D.A. Norman: Categorization of action slips, Psychological Review, 1-88, 1/15 (1981)
- 6) N.B. Sarter and D.D. Woods: How in the world did we ever get into that mode? Mode error and awareness in supervisory control, Human Factors, 37-1, 5/19 (1995)
- 7) D・A・ノーマン(安村, 岡本, 伊賀聡, 上野 訳): 未来のモノのデザイン; 新曜社(2008)
- 8) G. Klein, D.D. Woods, J.M. Bradshaw, R.R. Hoffman and P.J. Feltovich: Ten challenges for making automation a “team player” in joint human-agent activity, IEEE Intelligent Systems, 19-6, 91/95 (2004)
- 9) A. Andre and A. Degani: Do you know what mode you’re in? An analysis of mode error in everyday things, (M. Mouloua and J.M. Koonce, eds) Human-Automation Interaction: Research and Practice, 19/28, Lawrence Erlbaum (1997)
- 10) N.G. Leveson, L.D. Pinnel, S.D. Sandys, S. Koga and J.D. Reese: Analyzing software specifications for mode confusion potential, Proc. of the Workshop on Human Error and System Development (1997)
- 11) D.A. Norman: Design rules based on analyses of human error, Communications of the ACM, 26-4, 254/258 (1983)
- 12) A. Monk: Mode errors: a user-centered analysis and some preventative measures using keying-contingent sound, International Journal of Man-Machine Studies, 24, 313/327 (1986)
- 13) A.J. Sellen, G.P. Kurtenbach and W.A.S Buxton: The prevention of mode errors through sensory feedback Human Computer Interaction, 7-2, 141/164 (1992)
- 14) A. Degani and A. Kirlik: Modes in human-automation interaction: Initial observations about a modeling approach, Proc. of 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 4, 3443/3450 (1995)
- 15) A. Degani, M. Shafto and A. Kirlik: Modes in auto-

- mated cockpits: Problems, data analysis, and a modeling framework, Proc. of the 36th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences (1996)
- 16) N.G. Leveson and E. Palmer: Designing automation to reduce operator errors, Proc. of 1997 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, **2**, 1144/1150 (1997)
  - 17) J. Rushby: Using model checking to help discover mode confusions and other automation surprises, Reliability Engineering & System Safety, **75-2**, 167/177 (2002)
  - 18) J. Rushby, J. Crow and E. Palmer: An automated method to detect potential mode confusions, Proc. of the 18th Digital Avionics Systems Conference, **1**, 4.B.2-1/4.B.2-6 (1999)
  - 19) M. Heymann and A. Degani: On abstractions and simplifications in the design of human-automation interfaces, NASA Technical Memorandum, 2002-211397, NASA Ames Research Center (2002)
  - 20) A. Degani and M. Heymann: Formal verification of human-automation interaction, Human Factors, **44-1**, 28/41 (2002)
  - 21) M. Heymann and A. Degani: Formal analysis and automatic generation of user interface: Approach, methodology, and an algorithm, Human Factors, **49-2**, 311/330 (2007)
  - 22) E. Palmer: "Oops, it didn't arm."—A case study of two automation surprises, Proc. of the Eighth International Aviation Psychology Symposium (1995)
  - 23) D.D. Woods, L.J. Johannesen, R.I. Cook and N.B. Sarter: Behind Human Error: Cognitive Systems, Computers, and Hindsight, Crew Systems Ergonomics Information Analysis Center, Wright-Patterson Air Force Base (1994)
  - 24) D. Kirsh and P.P. Maglio: On distinguishing epistemic from pragmatic action, Cognitive Science, **18**, 513/549 (1994)
  - 25) A. Kirlik: The ecological expert: Acting to create information to guide action, Proc. of Fourth Symposium on Human Interaction with Complex Systems, 15/27 (1998)
  - 26) D. Kirsh: The intelligent use of space; Artificial Intelligence, **73**, 31/68 (1995)
  - 27) A. Monk: Action-effect rules: A technique for evaluating an informal specification against principles, Behaviour & Information Technology, **9-2**, 147/155 (1990)
  - 28) M.R. Endsley: Direct measurement of situation awareness: Validity and use of SAGAT, (M.R. Endsley and D.J. Garland, eds) Situation Awareness Analysis and Measurement, Lawrence Erlbaum Associates, 147/173 (2000)
  - 29) N.B. Sarter: The need for multisensory interfaces in support of effective attention allocation in highly dynamic event-driven domains: The case of cockpit automation, The International Journal of Aviation Psychology, **10-3**, 231/245 (2000)
  - 30) 堀口, 木村, 岩田, 榎木, 中西: 運転操作支援のための可聴化技術利用に関する検討, SICE システム・情報部門学術講演会 2007 講演論文集, 445/446 (2007)
  - 31) Y. Horiguchi, T. Suzuki, H. Nakanishi and T. Sawaragi: A Study on Communication Modality to Support Mode Awareness: Examining Driver's Awareness of Mode of Driving Support System, Proc. of the 9th International Probabilistic Safety Assessment and Management, CD-ROM (2008)

.....

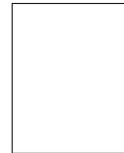
[ 著 者 紹 介 ]

堀 口 由 貴 男 (正 会 員)



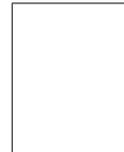
1999 年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。2003 年同大学院博士課程指導認定退学。同年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻助手。2005 年改組により機械理工学専攻助手, 2007 年同専攻助教となり, 現在に至る。その間, 2001~2003 年日本学術振興会特別研究員。人間機械系における協調のためのインタラクションデザインに関する研究に従事。ヒューマンインタフェース学会, システム制御情報学会, 日本知能情報ファジィ学会, IEEE の会員。京都大学博士(工学)。

福 寿 竜 一



2006 年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年, トヨタ自動車株式会社に入社, 現在に至る。

榎 木 哲 夫 (正 会 員)



1983 年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。86 年同大学院博士課程指導認定退学。同年京都大学工学部精密工学教室助手。94 年同大学院工学研究科精密工学専攻助教授, 2002 年同教授, 2005 年改組により機械理工学専攻教授, 現在に至る。その間, 91~92 年米国スタンフォード大学客員研究員。現在, 人間・機械共存環境下での協調システムの設計・解析と知的支援などに関する研究に従事。ヒューマンインタフェース学会, 日本機械学会, システム制御情報学会, IEEE などの会員。京都大学工学博士。

.....