

## 絶対安全への挑戦：人と協調する知的技術

Challenge toward ultimate safety: Machine intelligence collaborating with humans

稲垣 敏之 筑波大学 システム情報工学研究科  
Toshiyuki Inagaki Institute of Information Sciences and Electronics,  
University of Tsukuba

**Keywords:** flight-deck automation, safety and reliability, decision and action authority

### 1. はじめに

人は深く広範な能力を持つ。しかし「人は誤るを常とする」ともいわれるように、懸命に努力しているときですら誤りは起こる。重大な局面での判断を迫られたとき、「もう少し様子を見てから」と決断を先に延ばし、問題が自然に消えるのを願うこともある。ヒューマンマシンシステムでは、管理・運用にあたる人間への期待と信頼が前提となるが、人の誤りや心理特性を考慮すると、機械（コンピュータ）の支援が欠かせない。誤りを犯す人間を補佐し、時には代替することもできるこれらの機械はシステム安全に多大な恩恵をもたらした。

本稿では、動的環境のなかで迅速・的確な対応が求められるシステムの典型である航空機を例にとり、安全実現のための知的技術のいくつかを紹介し、人間と機械の協調の現状と将来への課題を考察する。

### 2. 航空機は怖い？

「航空機は怖い」という人に会うことがある。しかし、統計データから見るかぎり、航空機は危険な乗り物ではない。2000 年を例にとってみよう[土屋 01]。この年、全世界での運航便数は 2,120 万便であった。そのうち、機体が全壊する全損事故の発生は 20 件

である。旅客機の事故率は「100 万便あたりの事故件数」で測るので、2000 年の全損事故率は 100 万便あたり 0.94 件となる。すなわち、航空事故の発生はきわめて稀である。

では、死者数はどれくらいだろうか。2000 年の民間旅客機事故による死者数は、全世界で合計 778 人であった。ちなみに、自動車事故による死者は、日本だけでも年間約 9,000 人に達する。「自動車は怖い」という人に出会わないのが不思議なくらいの数である。しかし、航空機でひとたび事故が発生すれば死者数は多い。一回の事故で百人以上が命を落とすこともある。すなわち、航空事故の社会的インパクトは、自動車事故の比ではない。

航空事故の形態は様々である。機体が制御不能になれば事故に至る可能性が高いのは容易に想像できる。しかし、まったく異常がない機体でも墜落することがある。CFIT (Controlled Flight Into Terrain) と呼ばれ、健全に飛行を続けることのできる航空機が地表面や水面に衝突する事故である。まさに、墜落すべきでない航空機の墜落であり、航空関係者がこれほど口惜しく思う事故はない。2000 年の民間旅客機の CFIT 事故は 2 件であるが、死者数は実に 274 名にのぼる。

CFIT は機体制御不能による事故とともに航空事故の双璧をなす。1991 年から 2000

年までに、機体制御不能による墜落事故で 2,359 名、CFIT 事故で 2,237 名が死亡している [Boeing 00]。これらの数字は、第 3 位の飛行中の火災による 600 名を大きく引き離している。

なぜ、まったく故障がない航空機が山にぶつかったりするのだろうか。衝突の直前まで、コクピット内での穏やかな雰囲気がボイスレコーダーに記録されていたケースもある。危険が迫っていることなど、まったく想像もしていないようである。本来の航路を外れていることに気づきさえすれば、墜落は避けられたであろうが、実は「何か変だ」ということに気づくことは意外に難しい。

2002 年 7 月 1 日に南西ドイツのユーバールンゲン上空で発生した空中衝突も、墜落すべきでなかった航空機の事故である。この事例は、時間や情報が十分でない場合の人間の判断・決定・操作能力に限界があることを如実に示している。空中衝突による死者数は、1991 年から 2000 年までの累積データで第 4 位 (506 名) を占める。ますます航空機の数が増え、航空機が大型化していく傾向にある現在、空中衝突を防止することの重みは、増すことはあっても減ることはない。

### 3. 人を支援する知的技術

上述の事故のどれをとっても「パイロットのエラー」として簡単に片付けることはできない。まして、「もしパイロットが状況を正しく認識し対応を誤らなかつたら、このような事故は起きなかつたはずだ」と非難することも適切ではない。一般に、事故がパイロットのひとつのエラーで発生することはない。事故の経過を調べてみると、機体に生じた些細なトラブル、気象条件の変化、空港設備の状況、他者 (パイロット、管制官) とのコミュニケーションの失敗など、さまざまな要因

が鎖のようにつながってはじめて事故に至る様子を見ることができる。例えば、パイロットが差し迫った危険にまったく気づいていない場合でも、パイロットの注意を引きつけていた別の要因の存在が判明することがある。あるいは、緊急事態に気づいて対応しようとしても、もはやその時間的余裕がない場合もある。いかに人がすばらしい能力を持っていたとしても、それを十分に発揮できない状況に追い込まれることがありうることは、人を支援する何らかの知的技術が必要であることを示している。そのような支援技術をいくつか見てみよう。

#### 3. 1 地表への衝突防止

まったくどこにも異常のない機体が予期せぬうちに地表面や水面に衝突する CFIT 事故を防ぐ技術の代表が対地接近警報装置 (GPWS : Ground Proximity Warning System) である。GPWS が導入されたのは 1970 年代半ばであるが、それまで年平均約 8 件発生していた CFIT 事故は、GPWS の導入によって半数以下に減少した。

GPWS が検出対象とする事象モードは 7 つある。いずれも航空機の電波高度とその変化率などをモニタすることにより、場面に応じた警報を生成する (図 1)。

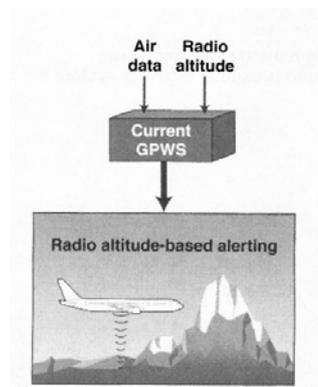


図 1 GPWS [Bresley 97]

代表的なモードをいくつか示す [藤村 95].

**モード 1:** 電波高度 2,450 ft 以下を飛行中に降下率 (1 分間に何 ft 降下するか) が過大になると, 音声警報「Sink Rate」と警報灯で注意を喚起する. もし, パイロットが回避操作を行わなければ, 警報音「Whoop, Whoop」に続いて音声「Pull Up (操縦輪を引け)」が発せられ, 警報灯「Pull Up」が点灯する.

**モード 2A:** フラップが着陸体勢になっておらず, グライド・スロープ・ビーム (滑走路端から上向き 2.5~3 度に発せられる電波. 滑走路への進入コースを示す) も捉えていないとき, 地表への接近率が過大であると判断すると, 警報音「Terrain, Terrain」と警報灯で異常を知らせる. パイロットが回避操作を行わないときは, 警報音「Whoop, Whoop, Pull Up」が発せられるとともに警報灯「Pull Up」が点灯する.

**モード 2B:** もしフラップが着陸体勢にあるときにモード 2A と同様な状況が検知されると, 警報灯の提示とともに警報音声「Terrain, Terrain」が反復される.

**モード 4B:** 脚は降りているがフラップが着陸体勢になく, 高度も不足しているとき, 速度が 154 kt (1 kt = 1.852km/h) 以下であれば, 警報音「Too Low Flap」が発せられる. 速度が 154kt より大であれば, 発せられる警報音は「Too Low Terrain」である.

警報の生成条件を記述した「警報領域」がモード毎に精密に設定されているが, GPWS 警報がつねに正しいとは限らない. 地形の起伏などによっては, 正常な飛行をしていても警報が発せられる場合がある. 警報に対して, 「誤報だろう」と言いつつ回避操作をしないまま山に激突する事故が発生する遠因がここにある.

GPWS は急峻な崖の検知が苦手であり, 警報が出ない(あるいは遅れる)ことがある. 航空機の高度変化を見るシステムだからである. 平坦な地形の前方に突如として崖がせり上がっているとしよう. 平坦地の上空を飛行しているうちは電波高度の変化率は小さい. 変化率が大きくなり崖の存在に気づく頃には, もはや崖は近くに迫っていることが起こりうるのである.

機体針路前方にある地表への接近を早期に検知すべく開発されたものが Enhanced GPWS (EGPWS) であり, 現在エアライン各社で配備が進められている. EGPWS は, 従来の GPWS が用いる情報のほかに全世界の地表面の約 95% をカバーする地形データベース (Terrain Database) を有しており, GPS 等から自機の位置情報を取得する (図 2). これにより, 前方の地形を知ることができるだけでなく, そのどの部分が自機にとって脅威となりうるのか, それは今から

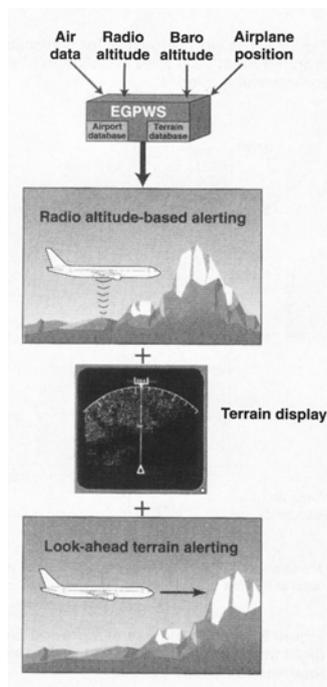


図 2 EGPWS [Bresley 97]

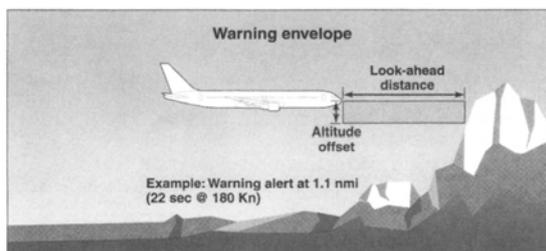


図3 針路前方の脅威地形の検出  
[Bresley 97]

何秒後かを計算することが可能となる [Bresley 97].

EGPWS は, GPWS では検知困難であった前方の急峻な地形に対しても, 衝突の 40~60 秒前に Caution alert, 衝突の 20~30 秒前に Warning alert という 2 段構えで警報を発する能力を持つ (図 3).

また, ディスプレイには地形の状況が上から見た形で表示され, しかも自機と地形との高度差が瞬時に判別できるように, 色 (赤, 黄, 緑) と密度が異なるドット・パターンで表示される. これは, いつ頃警報が発せられそうか, または警報の理由や適否をパイロットが自ら判断するうえで重要な情報である. 正しい警報を「誤報だ」と早合点する誤りは EGPWS のもとでは起こりにくいと思われる.

### 3. 2 空中衝突の防止

航空機上に搭載され, 自機と衝突の危険がある航空機の接近を検知すると, パイロットに相手機の位置や自機との高度差を表示し, 衝突を避けるための回避操作を提示するシステムがある. 航空機衝突防止装置である. 国際的には ACAS (Airborne Collision Avoidance System) とよばれるが, 米国の呼称 TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System) を用いることが多い.

本稿でも TCAS と称することにする [杉浦 00, 小瀬木 01].

TCAS は, 機体の上下 2 箇所を設置された指向性アンテナから毎秒 1 回質問信号を送信して周囲の航空機の位置を測定する. 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, 距離を知る. これを連続的に行うと, 相手機の接近率と最接近点, 最接近点到達までの時間が計算でき, 最接近点における両機の位置関係も予測可能となる.

「相手機は自機にとって脅威となる可能性がある」と TCAS が判定すると, パイロットに警報を提示する. TCAS の警報は, トラフィック・アドバイザリ (TA : Traffic Advisory) と回避アドバイザリ (RA : Resolution Advisory) の 2 種類に大別できる.

トラフィック・アドバイザリ (TA) 相手機の存在と相対位置をディスプレイに教示し, パイロットの目視確認を補助する機能を持つ. 最接近点に到達する約 40 秒前 (飛行高度に依存し, 20~48 秒の幅がある) に音声警報「Traffic, Traffic」を発する.

相手機が TA の対象機であるか否かは距離と高度に基づいて判定される. TA 生成ロジックを見てみよう.

距離に関する判定条件はつぎのとおりである. まず, 自機の周囲に球形の「保護領域」を定義する. 例えば飛行高度が 1,000ft 以下のとき保護領域半径は 0.30 nm (海里, 1 nm = 1.852 km), 高度が 30,000ft 以上ならば 1.30nm のように, 保護領域半径は自機の飛行高度によって異なる. さて, 「相手機がすでに保護領域に入っている」, あるいは「保護領域に入るまでの所要時間の予測値が定められた閾値以下である」ことが, 脅威機としての距離条件である. 高度 1,000ft 以下の

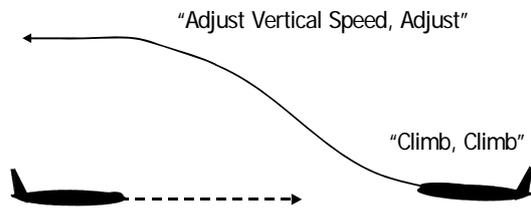


図4 TCAS 回避アドバイザー

場合の閾値は 20 秒, 高度 30,000ft 以上なら 48 秒というように, この閾値も飛行高度に依存する. 保護領域半径や閾値が飛行高度に応じて設定されているのは, 航空機の運動特性が高度によって異なるからである.

一方, 高度に関する判定条件はつぎのとおりである. 「相手機との高度差の現在値および最接近点における相手機との高度差の予測値が閾値以下である」, あるいは「自機と相手機が同一高度になるまでの時間が, 距離条件の判定に用いた閾値以下である」ことが, 脅威機としての高度条件である. 例えば, 飛行高度が 10,000~20,000ft の場合, 自機との高度差が 850ft 以下である相手機は, 脅威機としての高度条件を満たす.

相手機が距離条件と高度条件の両方を満たすとき, 相手機は脅威機であると判定され, TA が発せられる.

回避アドバイザー (RA) そのまま飛行を続ければ一定時間内に相手機との衝突または異常接近が起きる可能性があるとき, 回避操作を指示する機能を持つ. RA の場合も, 飛行高度に応じて, 保護領域半径, 相手機が保護領域に入るまでの所要時間の閾値, 自機と相手機の高度差に関する閾値などが定められている.

相手機を脅威機と判定した場合, TCAS は音声警報などでパイロットに垂直面内の

回避方向を指示する. 音声警報には, 「Climb, Climb」, 「Descend, Descend」, 「Adjust Vertical Speed, Adjust」などがある (図 4). 脅威機も TCAS を搭載しているときは, 自機と脅威機の TCAS がデータリンクを用いて回避方向情報を交換し, 片方が Climb を指示するなら, 他方は Descend を指示するというように, たがいの回避方向が同一にならないよう調整した後, 最接近の 15~35 秒前にそれぞれのパイロットに回避方向を指示する. 現在使用されている TCAS は, 自機の前方向約 40nm, 上下約 9,000ft の範囲で最大 45 機を連続的に監視する能力を持っており, 同時に 3 機の脅威機との回避を調整することができる.

このように優れた能力を持った TCAS であるが, 完全無欠ではない. 高度 29,000ft を水平飛行中に, 針路前方に低高度から上昇中の航空機が見えたとする. 「現在の飛行がそのまま続く」ことを仮定して最接近点を予測する TCAS は, RA を発する可能性がある. しかし, 相手機のフライトプランが「高度 28,000ft で水平飛行に移る」ことになっていたとしたら, どうだろう. RA は不要である (図 5). そのほかにも TCAS が「不要 RA」を発しうる場面は考えることができるが, アルゴリズムに改訂を加えることによる不要警報抑制[白川 99], 空域内航空機の飛行計

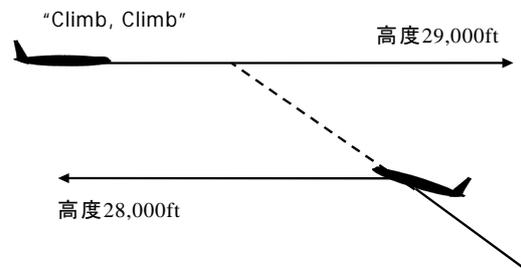


図5 飛行計画がわかっていたら  
不要な回避アドバイザーの例

画を考慮した衝突検知 [船引 99] などの研究が進められている。

### 3. 3 「着陸」の定義は？

目的空港の滑走路が眼下に近くにつれてエンジン音は静かになる。着地の軽い衝撃を感じるとすぐ、エンジン音が急に大きくなる。スラスト・リバーサーの音である。このとき、主翼上面に大きな板状の翼面が立つのをご覧になった方もあろう。スポイラー（操縦に用いるフライト・スポイラーと区別して、正確にはグラウンド・スポイラー）である。スポイラーは、機体揚力を減殺し機体重量を十分に車輪にかけることによって、ブレーキの効きを良くする働きをもつ。スラスト・リバーサーとスポイラーは着陸滑走距離を短くするのに欠かせない制動装置である。

スラスト・リバーサーはパイロットが操作するが、スポイラーは着陸と同時に自動展開するように設計されているものが多い。では、「航空機が着陸した」ことを、コンピュータはどのようにして知るのだろうか。「着陸」の判定ロジックの歴史の変遷を見てみよう。

スポイラーの自動展開をはじめて実現したのは B737 型機であり、主脚タイヤの回転が時速 60kt 相当以上になることをもって「着陸」と判定し、スポイラーを展開した。しかし、やがてこのロジックに落とし穴が見つかった。ハイドロプレーニング現象である。タイヤが滑って回転数が上がらず、スポイラーが展開しなかったり遅れたりし、オーバーラン事故などが発生した。

そこで、B747 や B757 などでは、新しいロジックが採用された。主脚のそれぞれには複数のタイヤが前後に並んでいるが、着地の際は後方のタイヤがまず接地し、そのあと前方のタイヤが接地する。この性質を利用し、「前方タイヤと後方タイヤを結ぶビームが

回転」したとき「着陸」と判断するロジックを採用した。しかし、このロジックも思わぬトラブルに見舞われた。上空でタイヤがパンクしたときにビームが回転したり、主脚を下げて着陸体勢に入っているときに乱気流でビームが回転したりするケースが生じたのである。

現在では、例えば 4 基のエンジンを持つ B747-400 では、「スピードブレーキ・レバーが作動準備完了位置にあり、かつ第 1, 第 3 エンジンのスラスト・レバーがアイドル位置にあり、かつ主脚が接地したとき」などのように、着陸を意図するパイロットの行為をも反映させて着陸判定条件を記述されている。加えて、主脚接地を検知するセンシング技術の高信頼化により、上空でグラウンド・スポイラーが展開する確率は 10 億回に 1 回以下に抑制されている。

ボーイング機と脚構造が異なる A320 では、つぎのようなロジックが採用されている。タイヤの回転数が 72kt 相当以上、または両主脚の脚柱が相当量圧縮されているとき、2 本のスラスト・レバー (A320 は双発機) がともにアイドル位置、あるいは少なくとも一方がリバース位置にあるならば、その機は「着陸」と判定し、スポイラーを 50 度展開する。興味深いのは、「2 本の主脚の一方だけに脚柱の圧縮が検出される場合は、スポイラーを 10 度展開する」という Partial Extention ロジックが添えられていることである。

Partial Extention が考案されるきっかけになったのは、ひとつのオーバーラン事故であった。1993 年 9 月、悪天候のなかワルシヤワ空港に着陸しようとした A320 は、風の影響で片側の主脚が十分に着地しなかった。そのため約 9 秒にわたってスポイラーが展開せず、オーバーランに至ったのである。現

在は、たとえワルシャワ事故と同じ状況に遭遇してもオーバーランは起こらない。片脚着地と判定すると **Partial Extention** ロジックがスポイラーを 10 度展開し、機体の揚力を減少させる。すると、空中に浮かんでいる主脚が着地し、本来のロジックのもとでスポイラーが完全に展開されるというしくみである。「スポイラー展開」という制御操作を、機体が本当に着陸しようとしているのかの同定にも活かすアイデアは、不確実性の下での技術の例として、他の場面にも応用可能性がある。

#### 4. 支援の側面と自動化レベル

支援システムの構築にあたっては、人がなすべきタスクのどの部分を、どの程度支援するのかを決める必要がある。「どの部分」については、情報収集、情報解析、意思決定、行為実行の 4 種類に分けることができる。「どの程度」支援するかは、対象となるタスクを「どこまで自動化するか」と同義であり、「自動化レベル」(表 1) [Sheridan 92] を用いた記述が可能である。

情報収集の例を考えてみよう。機体速度、高度、昇降率、機首方位やエンジン・パラメータなどは自動的に収集すべきものである。実際、航空機における情報収集では、7 以上の自動化レベルをもつものが多い。

EGPWS による支援は情報解析と意思決定の 2 側面にわたる。速度、高度、位置、地形データを用いて前方地形の脅威部分を計算し、ディスプレイに図示する。これは情報解析支援であり、自動化レベルは 7 以上である。しかし、意思決定支援の自動化レベルは低い。このまま飛行を続けると地表との衝突が予想される場合、最適回避行動(例えば「Pull Up」)を提示するが、パイロットへの強制力はない。自動化レベルでいえば 4 であ

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。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全選択肢を人間に提示し、そのひとつを提案。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、コンピュータがそれを実行。
  - (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、コンピュータはそれを実行。
  - (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、実行。
- 

る。

TCAS についても同様である。TCAS が自機周辺の航空機から獲得したデータをもとに脅威となりうる航空機をディスプレイ上に表示するのは情報解析支援であり、自動化レベルは高い。しかし、衝突が危惧される場合に発する「Climb」、「Descend」などの RA は助言であり、命令ではない。TCAS は RA から 5 秒以内(すでに発出した RA を変更する場合は 2.5 秒以内)のパイロット回避

操作を仮定しているが、強制力はない。ユーバリーゲン上空で衝突した航空機はいずれも TCAS 装備機であった。両機の TCAS は RA の調整を行い、一方に上昇、他方に降下を指示したが、上昇を指示されたパイロットは降下を選択したのである。

EGPWS や TCAS の指示に強制力を持たせない理由は、これらの装置に付与された知性に限界があるからである。動的環境のもとで起こりうるあらゆる場面を設計時点で網羅することはできない。当然、パイロットの「その場での判断」に任せざるを得ない部分が残る。

## 5. 権限をもつ支援システム

行為実行の支援についても、自動化レベルを高くすることに慎重な意見が多い [Parasuraman 00] が、着陸時のスポイラー自動展開のように、高い自動化レベルをもつ支援が安全確保に貢献している例は少なくない。双発機でありながら B747 に匹敵する大型機である B777 の推力非対称補償 TAC (Thrust Asymmetry Compensation) もそのような例である。B777 のエンジンは巨大である。そのため、離陸滑走中に片方のエンジンが故障したとき推力のアンバランスによって生じるヨー・モーメントはパイロットの手に余るほど大きいといわれる。TAC は、左右エンジンの推力の差が定格推力の約 10% を越えたとき、自動的にラダー（方向舵）を制御し、滑走路逸脱を防ぐうえで重要な役割を果たしている。

B777 と A320（およびその姉妹機）で忘れてはならない行為支援技術は、パイロットの操作入力をコンピュータが処理したあと、電気的信号として翼面のアクチュエータに伝達するフライ・バイ・ワイヤ (fly-by-wire) 技術を基盤とする flight-envelope

protection であろう。これは、機体姿勢や速度が安全を保證できる範囲から逸脱しないよう、必要に応じてコンピュータが介入するしくみである。したがって、危機を回避すべく操縦輪を大きく動かしても、失速、速度超過、過大バンク角（機体の左右軸と地面がなす角）などの事態が起こることはない。パイロットは危険回避に専念できるわけである。flight-envelope protection は、それが必要と判断したことは、パイロットの指示を待つことなく、自律的に行動にうつす権限と能力を備えた、自動化レベルの高い行為支援システムの例である。

## 6. まとめ

「人間中心の自動化」の観点からは、コンピュータに権限を与えることに慎重論が唱えられることが多い（この議論については、[稲垣 98]参照）。しかし、権限を人間に与えるのか、コンピュータに与えるのかという対立的構造の議論のなかからは適切な解は得られない。5 節の例のほかにも、権限をコンピュータに与えるほうがよい事例や状況がある [Inagaki 00]。人とコンピュータの間で権限をどのように共有・委譲すべきかについては、数理モデルなどを用いた精密な議論が必要である。

人工知能研究の最前線から見れば、本稿で述べた「知的技術」は古典的なものといえようが、それは民間航空機が、数ある交通機関の中でも際立って高い信頼性が求められていることによる。ただし、個々には if-then ルールの形で表される単純なロジックも、機体全体では膨大な数にのぼり、それらが複雑に絡み合う。事実、十分な知識と技量を持つパイロットですら、コンピュータが人間を無視して勝手に判断・行動しているように見える (automation surprises) ことがあり、コ

ンピュータの意図がわからないまま, 人とコンピュータが対立する形で事故に至る例もある [稲垣 97].

このような不都合は, 単に知的技術の機能高度化をめざすだけでは解決しない. 人と機械がたがいの能力を補い合って協調するには, 推論や知的機構が何を前提とし, どのような限界をもつのか, 推論にはどのような不確定性が含まれているか, など, 支援システムの機能と能力の限界を明確に提示することが重要である.

安全ははじめから存在するのではない. 勝ち取るものである. そのための知的技術もはじめから知的であったわけではない. 盲点について発生する事故との戦いのなかで, 多くの犠牲を払いながら育成されてきた. 「絶対安全」の実現は見果てぬ夢であるが, それへの挑戦のなかから, 有用な知的技術を構築していきたいものである.

航空安全のための知的技術は多様であり, 紙数の都合で取り上げられなかったものも多い. [Billings 97]や[Wickens 98]などをご参照いただければ幸いである.

全日空総合安全推進部主席部員十亀洋氏には技術的部分に関してご討論・ご教示を賜った. また, 図 1-3 は Boeing 社の許可を得て Boeing Airliner 誌から転載した. 心より謝意を表する.

### 参考文献

- [土屋 01] 土屋修: 世界の航空安全の状況, 安全飛行, No. 211, pp. 2-13 (2001)
- [Boeing 00] Boeing Commercial Airplanes: *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents* (2000)
- [藤村 95] 藤村敏仁: 対地接近警報装置. 航空宇宙電子システム, pp.183-191, 日本航空技術協会 (1995)
- [Bresley 97] B. Bresley and J. Egilsrud: Enhanced Ground Proximity Warning System, *Boeing Airliner, July-September 1997*, pp. 1-13 (1997)
- [杉浦 00] 杉浦賢: 最新型 ACASII の導入, 航空無線, No. 26, pp. 28-32
- [小瀬木 01] 小瀬木滋: TCAS のしくみ: 何を見てどう考えどう語るか, SICE ヒューマンマシンシステム講演会「人間の知と機械の知: 緊急時における相克と協調」, pp. 3-17 (2001)
- [白川 99] 白川昌之: 航空機衝突防止装置のアルゴリズム改訂の影響について, 信学技報「安全性」SSS99-22 (1999)
- [船引 99] 船引浩平: 機上トラフィック・ディスプレイの試作と状況認識評価, 第 38 回飛行機シンポジウム講演集 (1999)
- [Sheridan 92] T.B. Sheridan: *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*, MIT Press (1992)
- [Parasuraman 00] R. Parasuraman *et al.*: A model for types and levels of human interaction with automation, *IEEE Trans. SMC*, Vol. 30, No. 3, pp.286-297 (2000)
- [稲垣 98] 稲垣敏之: 「人間中心の自動化」は何を目指す?, 計測と制御, Vol. 37, No.8, pp.572-577 (1998)
- [Inagaki 00] T. Inagaki: Situation-adaptive autonomy for time-critical takeoff decisions, *Int. J. Modelling and Simulation*, Vol. 20, No. 2, pp. 175-180 (2000)
- [稲垣 97] 稲垣敏之: ヒューマン・マシン・システムー高信頼性が損なう安全性, システム/制御/情報, Vol. 41, No. 10, pp.403-409 (1997)
- [Billings 97] C.E. Billings: *Aviation Automation*, LEA (1997)
- [Wickens 98] C.D. Wickens *et al.*: *The Future of Air Traffic Control*, National Academy Press (1999)