

## 30-2 オートパイロットの最新動向

### 1. はじめに

航空輸送の需要は世界的に今後 20 年間で 3 倍に増加すると予想されている。一方、航空機の全損事故の確率は、100 万離陸回あたり 1 件弱の値を保ち、下げ止まりの傾向にある<sup>1)</sup>。このため、航空機の墜落事故件数は今後 20 年で約 3 倍に急増すると危惧されている。航空機全損事故の原因は、1960 年から 2015 年までの 1,104 件の全損事故のうち、58% がパイロットエラー、17% が機材故障、6% が天候によるものと分析されている<sup>2)</sup>。このうち、単純なパイロットエラーは CRM (Cockpit Resource Management) などの訓練法の導入により減少しつつある一方、今後は、機材故障や悪天候によるパイロットワークロードの増加がパイロットエラーを誘発する事故が増加すると予想される。というのは、現状の航空機は通常運航時は自動操縦で飛行可能であるが、機材故障時や悪天候時には急遽、自動操縦を手動操縦に切り替えることが必要であり、そのときにパイロットのワークロードが急増するからである。

また近年は、航空輸送の需要増加が深刻なパイロット不足を世界的に引き起こしている。国際民間航空機関 (ICAO) は 2017 年から 2036 年までの 20 年間に、全世界で約 60 万人のパイロットが不足するとの試算を公表した<sup>3)</sup>。パイロットの養成には長い時間と多くの経費が必要であり、パイロットの補充は容易ではない。増加するパイロットの技能に差が生じ、安全性の保障が脅かされるとの指摘もある。さらに最近では、いわゆる「空飛ぶクルマ」と呼ばれる小型航空機が新しいモビリティとして多数提案されている<sup>4)</sup>。もしこれが現実になったとき、航空輸送数は上述した予測をはるかに上回る。無数の航空機が街中を低空で飛行するようになったとき、その飛行安全性の確保が何よりも重要である。このような航空機はパイロットが搭乗するか、あるいはパイロットレスとなるかに関わらず、高度に知的な飛行制御システムが組み込まれるはずであり、それはどのようなものなのか、そしてどのように認証するのが問題になっている。

こうした背景から、パイロットの労力を削減し、それによって航空安全を向上させる飛行制御システムに関する研究が行われている。それは、通常の自動操縦では対処できない事態に陥った時でも、パイロットを補佐し、できれば自動制御を継続させる制御システムである。最新の現代制御理論\*を取り入れ、数値シミュレーションを行っている研究は数多く見受けられるが、実際の航空機を使った実証試験を行っている研究例は少ない。日本では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) や JAXA と多くの共同研究を実施してきた東京大学に見られる程度である。しかし、そのような状況が変わったのが小型無人航空機の登場である。ラジコン操縦の模型飛行機が電化され、マイコンと各種センサから成る小型フライトコントローラによって自律飛行ができるようになった。小型無人航空機は大学の研究室レベルで製作し、飛行させることが可能であるため、多くの大学が取り組みを始めたところである。

本稿は、オートパイロットに関する多くの最新動向の中から特に耐故障飛行制御に関する研究に絞り、数十年で確実に実用化されていくと思われる飛行制御の研究を紹介する。

注記\*: 現代制御理論とは、1960 年代以降に登場し、多入力多出力の制御対象を状態方程式で定義し、制御系を構成する理論である。これに対して、古典制御理論は、1960 年以前からある手法で、1 入力 1 出力の制御対象を、伝達関数で定義し、制御系を構成する理論である。

## 2. 航空機の飛行制御

### 2.1 概要

飛行制御の研究の歴史の中で転機となったのは 1985 年の御巣鷹山墜落事故であろう。垂直尾翼の大半と油圧操縦システムも全喪失した事故であったが、パイロットは最後までそのことを認識していなかったらしいと言われている。残された操縦手段は左右のエンジン推力の調整による操縦であったが、それを行ったとしても訓練を受けていないパイロットの手動操縦では困難であったろうと推測する。一方、1989 年にはユナイテッド航空 232 便が米国で油圧操縦システム喪失という同様な事故を起こしたが、この機にたまたま乗り合わせていたパイロットが左右のエンジン推力を調整することに専念できたことから、CRM が有効に機能して犠牲者を抑えることができた。これら 2 件の事故によって、故障に対処する耐故障飛行制御は最優先で取り組むべき研究課題として認識されるに至った。

耐故障飛行制御の考え方は 2 通りに分類される。一つはロバスト制御である。故障によって機体の運動特性が変化しても制御性能を悪化させない頑健な制御系を事前に構成しておくことである。当然、対処できる限界は事前想定範囲の限界であり、そこを超えると制御系は破綻をきたす。もう一つは適応制御（アダプティブ制御）である。これは実システムの挙動の変化に合わせてモデルを学習、変化させ、適応的に制御系を更新して制御性能の劣化を防ぐ手法である。この場合、学習、更新がどのような状況においても破綻しないことが保障されていないことが問題である。とくに実際の航空機に搭載する場合に、実機の挙動が保障されていないことが問題視されている。どちらかと言うと、前者のロバスト制御の方が先行して航空機の制御系設計に使われてきたが、最近の機械学習、さらには人工知能的な手法によって適応制御の研究が活発に行われるようになってきた。以下、最近 10 年で行われた実機による飛行実証まで至った耐故障飛行制御の研究を紹介する。

### 2.2 ニューラルネットワークによる飛行制御

平成 20 から 22 年度にかけて、経済産業省の委託事業「航空機用先進システム基盤技術開発：先進パイロット支援システム」を日本航空宇宙工業会（SJAC）が実施した。SJAC からの再委託として、東京大学、JAXA、富士重工業（現 SUBARU）は耐故障飛行制御システムの基本研究と飛行実験に当たった。旅客機よりも事故発生率の高いジェネアビ（小型航空機）にも対応可能な安全性向上技術として、高価で特殊な機器を別に装備することなく、通常装備の IMU（Inertial Measurement Unit）のデータから機体の一部欠損や操縦系統の故障に対応することが可能な耐故障飛行制御システムの研究が行われた（図 1）。

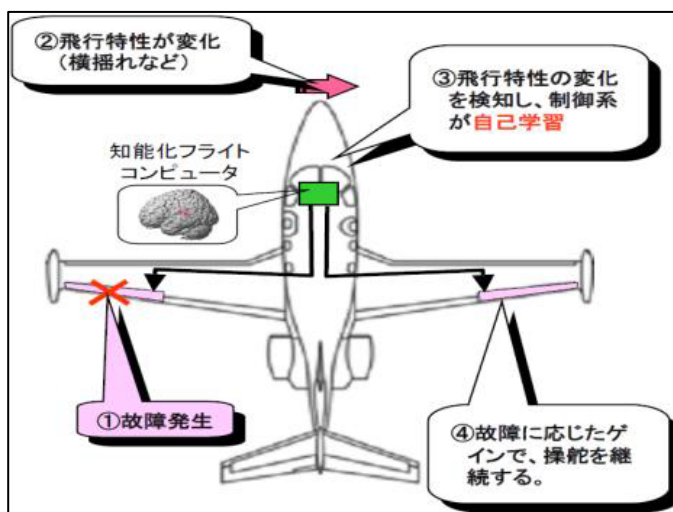


図 1 耐故障飛行制御系の概要<sup>8)</sup>

このとき、東京大学と富士重工業からそれぞれニューラルネットワークを活用した2種類の適応制御則が提案された。東京大学が提案したのがフィードバック誤差学習法である(図2)。ヒト等の動物が運動を学習するモデルを応用して提案されたものである。ニューラルネットワークをフィードフォワード制御器として適用し、通常の制御器であるフィードバック制御器から出力されるシステムの入力信号を小さくするように、フィードフォワード制御器のニューラルネットワークをオンラインで学習する方法である。フィードバック制御器が必要なくなるように、ニューラルネットワークにシステムの逆モデルをさせようとしている。

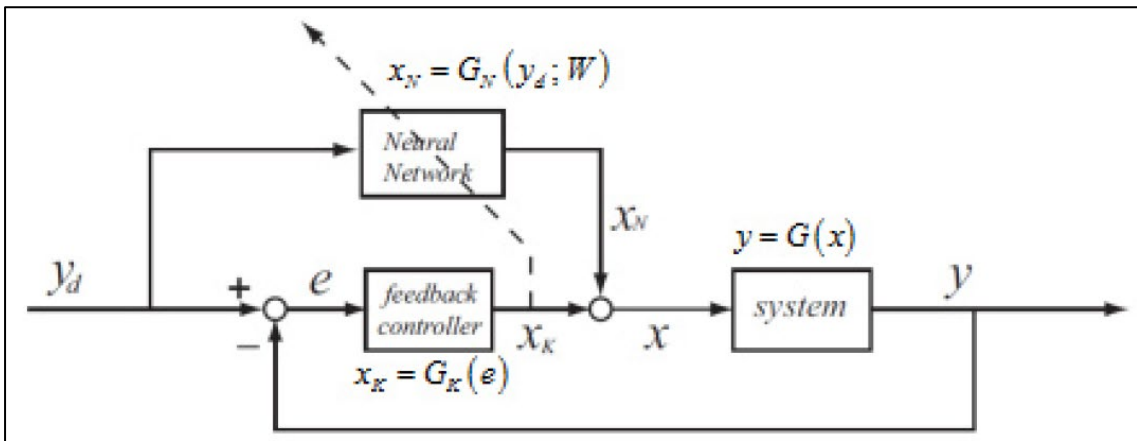


図2 フィードバック誤差学習法<sup>8)</sup>

一方、富士重工業は、逆ダイナミクス法における近似誤差を最小化するようにニューラルネットワークをオンラインで学習する方式を提案した(図3)。規範モデルは目標値が加えられた時のプラントの望ましい応答を出力し、それを入力としてプラント逆モデルが実際のプラントに入力する信号を出力する。しかしながら、モデル化誤差や外乱の影響を受けるため完全な逆モデルは存在しない。そこで、その誤差を打ち消すためにニューラルネットワークが学習してプラントへの入力を補正する信号を出力する。

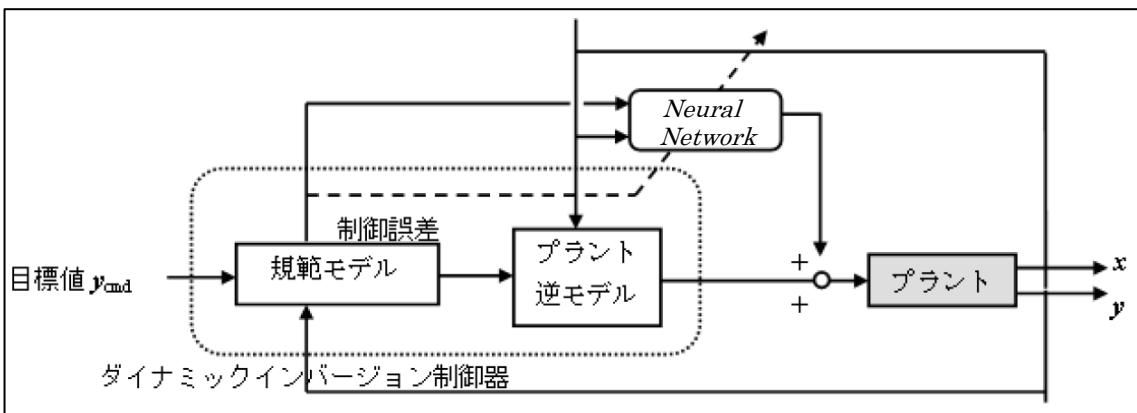


図3 逆ニューラルネットワーク補償を付加したダイナミクス法<sup>8)</sup>

この研究の独創的だった点は、実際の航空機を故障させる飛行実証を実施したことである。実験に使った航空機は有人機ではなく小型無人航空機である。ビジネスジェットを模した機体形状の設計は富士重工業が担当し、製作と機材等の準備は東京大学が行った。機体には飛行中に片翼の先端の26%が脱落する仕組が作り込まれた。そのような大規模な機体損壊を、有人機の飛行実験で模擬することは到底不可能である。無人航空機を最新制御システムのテストベッドとして利用した例である。同様の実験は、軍用機をベースにした模型実験が米国で2008年に実施されていたが<sup>5)</sup>、民間機を想定した実証試験は世界初であった。

最終飛行試験は、2011年1月に鹿児島県枕崎空港において行われた。機体はラジコン操縦で離陸したのち、自動制御によるウェイポイント自動追従の最中に、翼端が分離された。機体には先に示したフィードバック誤差学習法あるいは逆ダイナミクス法がフライトコントローラの中に搭載され、自動制御開始時からニューラルネットワークは学習を始めている。不意な翼端分離にもこれら手法は見事に対応し、機体は何事もなかったように飛行を継続する様子が見受けられた(図4)。仮に通常のPID制御を飛行制御として搭載した機体で同じ飛行実験を行ったところ、短時間のうちに墜落に繋がる破綻に至った。一方、提案された耐故障飛行制御システムは、見事に不測の事態をリカバーし、翼端分離後も飛行を継続していた。<sup>6,7)</sup>



図4 飛行中に片翼先端の脱落<sup>8)</sup>

### 2.3 単純適応制御

飛行実験で効果が実証された先進的な飛行制御システムも認証を得られなければ実機適用は不可能である。先のニューラルネットワークを用いた飛行制御研究から、挙動の不確実性を排除できない制御則ではなく、従来のPID制御の延長として故障などの大きなシステム変動にも適応できる適応制御則を構築することが重要であると考えられた。その観点から、モデル規範型適応制御(MRACS, Model Reference Adaptive Control System)を簡略化した単純適応制御(SAC, Simple Adaptive Control)と呼ばれる手法の研究が東京大学にて行われた<sup>9)</sup>。PID制御を適用した飛行制御システムに対して単純適応制御則を構築すると、フィードフォワードゲインのみならずフィードバックゲインも適応的にオンラインで調整可能なため、安定性が損なわれた故障に対しても対応可能と考えられた。また、誤作動等を起こした場合でも単純適応制御系をオフにすれば従来どおりのPID制御が行

えるため、航空機の安全性を確保しやすい特徴がある。さらに、単純適応制御は構造が比較的簡単で、他の適応制御則と比べて定めるべき設計パラメータの数も多くないため、PID制御と同様、実用性の面から優れていると考えられる。これらの特性を利用し、従来のPID飛行制御システムを活かしながら故障時には故障検知システムなしで迅速に対応できるような拡張性の高い耐故障飛行制御系の構築を行おうとした。

特に注目すべきは、航空機のピッチ角制御において重心の後方移動などにより迎角静安定性が飛行中に失われた場合の制御である。従来のPID制御やそれまで研究されていたフィードバック誤差学習法では安定飛行を維持するのが不可能であった。図5はMuPAL- $\alpha$ （JAXAの多目的実証実験機）を用いた実際の飛行試験結果を示す。この実験では、飛行中の時間72 [sec]に迎角静安定に関係する安定微係数を大きく減少させることをMuPAL- $\alpha$ に模擬させ、それを単純適応制御で補う制御ができていることを確認した。

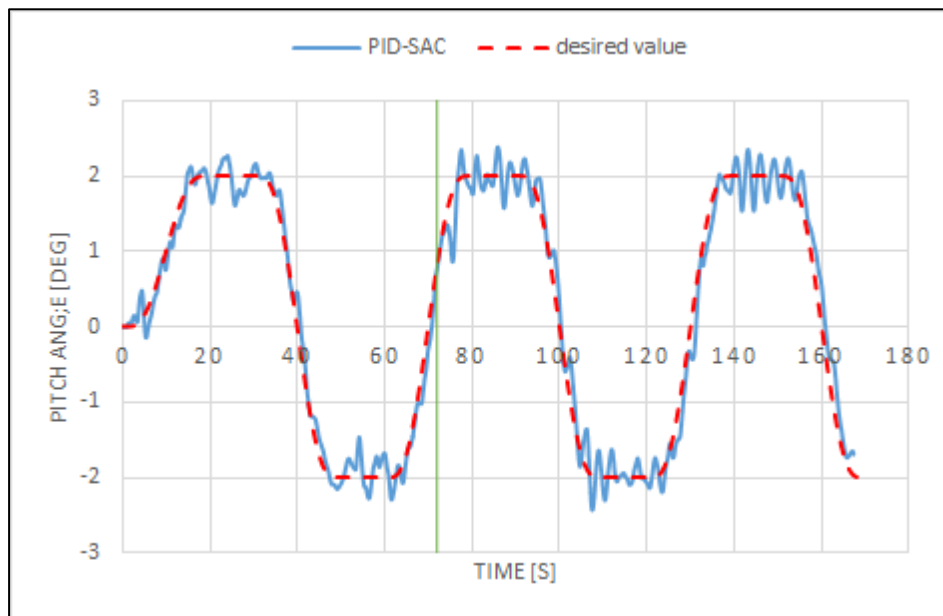


図5 単純適応制御をPID制御に組み合わせた飛行制御の飛行試験結果<sup>9)</sup>

## 2.4 HORIZON 2020

東京大学でこれまで行われてきた耐故障飛行制御の研究は国際共同研究に発展した。ヨーロッパにおいて、科学技術政策の大枠は欧州委員会が決めた戦略に基づいている。全欧レベルのイノベーションや研究開発を促進するためのファンディングのシステムとして、FP（フレーム・ワークプログラム）があり、現在、FP8が2014～2020年までの7年計画で進行中である。このFP8はHORIZON 2020と呼ばれている。HORIZON 2020では、様々な社会的課題に対して総額約800億ユーロの予算が配分されることになっている。そのなかで、航空分野における新たな日・EU共同プロジェクト「VISION (Validation of Integrated Safety-enhanced Intelligent Flight Control)」が2016年から始まった<sup>10)</sup>。飛行安全性向上に関わる航空制御技術、とくに画像を用いた耐故障飛行制御と着陸誘導システムの研究を行っている。日本側代表は東京大学、EU側代表はフランス国立航空宇宙研

研究所 (ONERA) が務め、大学・研究機関・企業を含む 11 のパートナーが参加している (図 6)。ONERA より東京大学に申し出があったのは、上述した 10 年間にわたる耐故障飛行制御システムの基礎研究と飛行実験を含む実績があったからである。日本では HORIZON 2020 に参加するために、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託研究「航空機用先進システム実用化プロジェクト (次世代自動飛行システム研究開発)」を株式会社リコーと東京大学が代表となって平成 28 年度から 31 年度までの予定で実施している。NEDO 委託研究を利用して HORIZON 2020 の中で日本は、リコーが持つ高度な画像処理技術ならびに東京大学の知的制御技術を活用し、欧州と連携して Dassault Aviation の有人機、ONERA の無人固定翼機および JAXA の MuPAL- $\alpha$  などを用いた実証実験に取り組み、技術成熟度レベル (TRL) 向上を目指している。

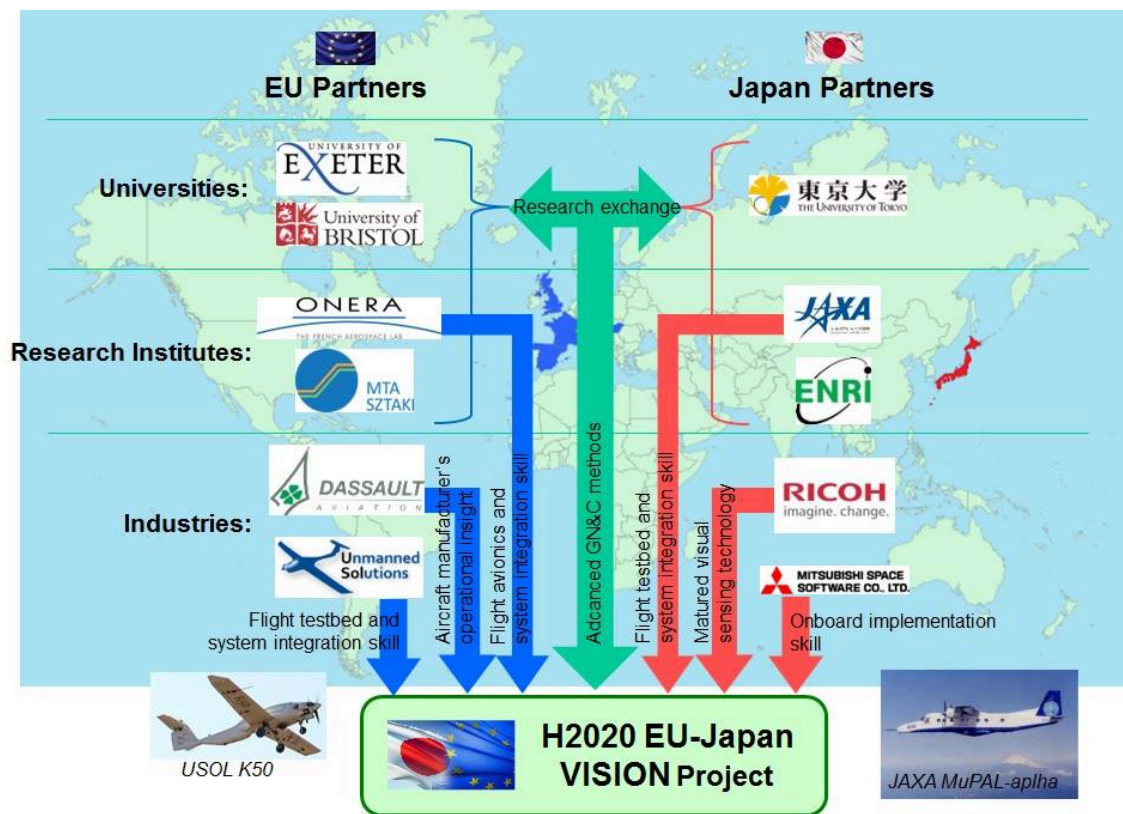


図 6 HORIZON 2020 における日欧共同研究体制

たとえば、研究の一例として、高解像度カメラによる画像処理技術によって舵面の状態を検知する研究が実施されている。舵面が制御信号の通りに駆動しているかを機上のカメラで捉えるというものである。舵面角度推定のアルゴリズムの検討を行い、実際に MuPAL- $\alpha$  を用いてシミュレーション環境の構築、そして機械学習を用いた舵面故障検知を行う手法が開発されている。また、東京大学では、機械学習で航空機モデルをオンライン推定し、故障の程度・箇所を特定する故障検知器 (FDI, Fault Detection and Isolation) を単純適応制御と組み合わせることで、より広範囲な故障に対処する研究が行われている。さらにリコーと東京大学は、機上のステレオカメラによって前方を監視しドローンなどの

障害物を検知して回避する技術、GPS/ILS ロスト時でも画像によって位置検出を行う技術の研究が行われている。耐故障制御による安定飛行の維持を実機飛行試験により確認するという最終目標に向けて研究が進められている。

## 2.5 小型航空機と AI 技術

2010 年代になると、いわゆるドローンと呼ばれる小型無人航空機が普及し、飛行安全の重要性が世間の注目を浴びるようになった。レベル 1（目視内での操縦飛行）、レベル 2（操縦を伴わない目視内飛行）、レベル 3（補助者なしによる無人地帯での目視外飛行）、レベル 4（有人地帯での第三者上空の目視外飛行）と技術レベルは分類され、2018 年からレベル 3 飛行が、また 2020 年代頃からレベル 4 飛行が本格的に始まろうとしている<sup>11)</sup>。小型無人航空機には落ちない、あるいは落ちても安全を目指し、高い信頼性が求められている。上述したように、知的制御技術、耐故障飛行制御はこれまで無人航空機をテストベッドとして研究が進められてきたところであり、技術の進展が速い無人航空機にいち早く応用されようとしている。さらに、2018 年になって、いわゆる空飛ぶクルマと呼ばれる小型有人航空機の構想が次々と発表されるようになってきた<sup>4)</sup>。たとえば、制御のソフトウェアの認証として FAA、EASA、日本でも採用されている DO-178C の適用は難しいとされ、新たな方法の検討が始まっている<sup>12)</sup>。

加えて、飛行制御への人工知能（AI）技術の取り込みも様々な分野で行われている。たとえば、東京大学が中心となって進める NEDO 委託研究「次世代人工知能・ロボット中核技術開発（次世代人工知能技術の社会実装に関するグローバル研究開発）」（平成 30 年度～34 年度予定）では、革新的ドローン AI 技術と呼ぶ研究が行われている。有人の航空機であれば、機上のパイロットが飛行中に判断し危険な状況における対応策を実施するトラブルシューティングを AI で再現することを目指している。AI 技術で進展が著しい物体認識を用いた機体周囲の人・車両を認識する技術、GPS ロスト、通信断絶、気象急変等においても飛行継続する安定化飛行 AI 技術、機器故障に起因する動作不良、異常振動、姿勢不安定、信号ノイズなどの異常に対する故障診断 AI 技術、動作不良、損傷等の故障時にも周辺環境認識結果に基づき無人地帯を選択して安全着陸する AI 技術などの研究が進められている。AI コンポーネントの標準化も重要な課題と位置づけられている。

## 3. おわりに

最近の飛行制御の研究を概観すると、計算機による解析技術の発達によって複雑な航空機システムもモデルベース開発が進み、高度なシミュレーションを簡単な学習で扱えるようになり、制御ソフトウェアの研究もアイデアさえあれば誰でも挑戦できるようになってきた。今は制御理論の研究が急速なスピードで進んでいる。その最たるものが人工知能、AI の適用であろう。これら最新技術の動向を注視し、飛行制御に積極的に採り込んでいくことが重要である。一方で、航空安全は認証を含め、過去の経験と実績の膨大な積み重ねで達成されている。先進的な技術と安全のために合意されてきた基準とのバランスが今後議論されていくと思われる。

#### 参考資料

- 1) Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations | 1959–2016, [https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about\\_bca/pdf/statsum.pdf](https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf)
- 2) Causes of Fatal Accidents by Decade, <http://planecrashinfo.com/cause.htm>
- 3) Civil Aviation: An Engine of Economic Development, [https://www.icao.int/Documents/secretary-general/fliu/20180213\\_SG\\_Speech\\_CORIM\\_Aviation.pdf](https://www.icao.int/Documents/secretary-general/fliu/20180213_SG_Speech_CORIM_Aviation.pdf)
- 4) 空の移動革命に向けた官民協議会, [http://www.meti.go.jp/shingikai/mono\\_info\\_service/air\\_mobility/](http://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/air_mobility/)
- 5) <http://www.aero-news.net/index.cfm?do=main.textpost&id=2d97e740-144a-4f03-bcda-66d762a5ecca>
- 6) Suzuki, S., et. al. “Flight Demonstration of Fault Tolerant Flight Control System” ICAS2012-5-2-1, 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, Brisbane, 9/24-27, 2012.
- 7) 日経新聞, 「翼破損しても安全飛行, 富士重と東大 操縦実験に成功」, 2011.6.8.
- 8) 佐藤維大 他: 先進パイロット支援システム研究開発 4 ～耐故障飛行制御システム—制御システム、飛行試験, 第 49 回飛行機シンポジウム, 2011.
- 9) 大森優也, 鈴木真二, 単純適応制御を用いた航空機の重心後退時における耐故障飛行制御に関する研究, 日本機械学会 第 24 回交通・物流部門大会 講演論文集, 2015.
- 10) <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-transport/aviation/vision>
- 11) 無人航空機の目視外及び第三者上空等の飛行に関する検討会, [http://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk1\\_000057.html](http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk1_000057.html)
- 12) Brock Lascara, et al.: Urban Air Mobility Landscape Report, MITRE, <https://www.mitre.org/publications/technical-papers/urban-air-mobility-landscape-report>