

## 1109 無人航空機の飛行制御システム

## Flight Control System of Unmanned Air Vehicles

○河野 充 (富士重工業) 吉井 強 (富士重工業)  
 阪口晃敏 (富士重工業)

Mitsuru KONO, Fuji Heavy Industries, Yonan 1-1-11, Utsunomiya-shi, Tochigi  
 Tsutomu YOSHII, Fuji Heavy Industries  
 Akitoshi SAKAGUCHI, Fuji Heavy Industries

*Key Words* : Flight Control, Auto Landing, UAV, Dynamic Inversion, Feedback Error Learning, Neural Network

## 1. はじめに

近年の電子技術の進歩により、無人航空機(以下、無人機)は実用的で高い信頼性を有するようになった。現在、無人機は戦場以外に火山観測や農薬散布等、民間用途での運用も行われ、飛行制御系への要求はさらに複雑で高度なものとなっている。富士重工業(以下 FHI)は、1970年代の海自向け大型標的機の生産を皮切りに、国内最多の無人機開発実績を誇る。本資では FHI の開発実績から、先進的な飛行制御技術のトピックとして自動離着陸技術と安全性向上技術について紹介する。

## 2. 無人航空機の飛行制御系概説

無人機の飛行制御系は、一般に「航法」、「誘導」、「制御」の3機能に分類される。「航法」は、現在の自機状態を知るための機能であり、誘導・制御則が行う意思決定の基礎となる。一般的には、加速度計出力を用いた慣性航法で位置・速度を推定するが、加速度計のバイアス誤差によるドリフト防止のため GPS 等の位置情報によるカルマンフィルタ補正等の方式を採用することが多い。「誘導」は、航法で得た自機状態をもとにして、自機をどのように(上昇降下、加減速等)動かすかを決定する機能である。また「制御」は、誘導則に追従するために舵面等の操作量を決定する機能であり、PID等の古典制御から最適制御、適応制御など、その方式は要求仕様に応じて多岐にわたる。

誘導と制御を区分する趣旨は、制御対象の帯域差にある。航空機の位置誘導は、舵面による回転運動を介して作用力の方向を変化させて実現するため、姿勢制御等の比較的早い運動制御と、位置誘導等の緩慢な運動制御に分離し、相互干渉をおこさないように設計することが多い。一方、スロットルによる速度制御など、回転運動を介さない制御の場合には、両者を分離せずに設計するのが通常である。

## 3. 運用拡大の基礎技術としての自動離着陸

無人機の発進/回収方式は、搭乗員保護のための加速度制限等がなく、有人機と比べて多様である。しかしミッションの高度化で搭載機器が高価かつ精密になるにつれ、有人機と同じ離着陸方式が要求されつつある。その一方で、離着陸には高精度な航法センサに加え、高度な操縦技術が要求されるため、離着陸の自動化は無人機の運用拡大にとって極めて重要な技術課題である。以下、弊社に関連した自動離着陸技術開発の概要を紹介する。

## 3. 1 RPH2 (回転翼無人機)

FHI として初の産業用無人機である RPH2 無人ヘリコプターは、無線操縦による農薬散布等を実施しているが、今後の運用範囲拡大を目指し、2001年に回転翼無人機として国内初の自動離着陸を実証した<sup>(1)</sup>。また2003年には、ニューラルネットワーク(以下 NN)を適用した着陸誘導則を搭載し、艦艇を想定した揺動面への着陸実験(Fig.1)に成功した<sup>(2)</sup>。このとき機体と目標着陸点との相対位置は、画像着陸センサにより計測した<sup>(3)</sup>。また NN のパラメータは、遺伝的アルゴリズムを用いて事前に探索したものをを用いた<sup>(4)</sup>。



Fig.1 Autonomous landing of RPH2 on the moving plane

## 3. 2 HSFD-1 (固定翼ジェット無人機)

2002年、NAL/NASDA(現 JAXA)はクリスマス島において HSFD-1 による完全自動離着陸の飛行実証に成功した<sup>(5)</sup>。本機は主たる航法装置に NAL/NASDA で開発した搬送波位相ディファレンシャル GPS を用い、離陸から着陸後の機体停止に至る全シーケンスを完全自動で行った。実験機ならびに地上機材も含めた本システムは、FHI が主契約者として設計製造・運用支援にあたった。

## 3. 3 FABOT (固定翼小型プロペラ機)

単発プロペラ機のように小型低速の固定翼機は、風等の影響を受けやすい上、小規模滑走路へ着陸が多いという大型高速機とは異なる課題がある。FHI が開発した FABOT (Fuji Aerial Robot) は、既存モーターグライダーをベース機とし、最小限の搭載機器と可搬式の小型地上装置のみで構成され

る無人実験機システムであり、2003年に低速プロペラ機として、国内初で世界的にも例の少ない自動離着陸試験に成功した<sup>(6)</sup> (Fig.2)。

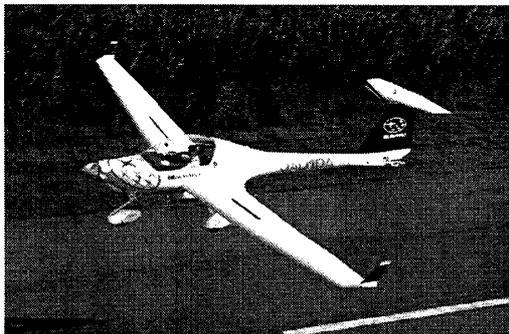


Fig.2 Fuji Aerial Robot (FABOT)

#### 4. 無人航空機の安全性向上

無人機の飛行範囲は、戦場や洋上等の限定された空間から一般空域へと広がる傾向にある。無人機を一般空域で運用するには、自動離着陸等の基本機能の向上に加えて、安全性向上が重要な課題となる。中でも、他機との安全間隔確保のための「衝突回避技術」と、自機の信頼性向上のための「耐故障制御技術」は重要な課題である。

##### 4.1 衝突回避技術

有人機には、TCAS(Traffic alert and Collision Avoidance System; 航空機衝突防止装置)が搭載され、衝突の危険がある場合に警告を発出する。パイロットはその警告に基づき、回避操作を実施して機体の安全を確保する。

防衛省航空装備研究所は「滞空型無人機要素技術の研究」の中で、前述の衝突防止装置と自動飛行システムを統合させて、無人機が他機を検知し、必要に応じて衝突回避し、その後経路へ復帰するシステムについて、2007年に飛行実証を行い、これに成功した。本研究では、FHIが主契約者として、システムの設計製造・運用支援にあたった。

##### 4.2 耐故障制御技術

従来の耐故障制御システムの多くは、故障検知、故障分離、制御系再構成というステップで故障に対応するが、そのためには故障モードを事前に想定しておく必要がある。しかし複雑なシステムの故障を事前に網羅するのは困難である。FHIではこの解決策として、機体特性の変動をNNで飛行中に認知・学習する知的飛行制御系の研究を進めている。

NNを用いた飛行実証について、海外ではNASAのX-36がダイナミックインバージョン法(以下DI)にNN補償を付加して飛行実証を行った<sup>(7)</sup>。日本では、東京大学でフィードバック誤差学習<sup>(8)</sup>(Feedback Error Learning; 以下FEL)の研究が進められている<sup>(9)</sup>。FHIはFABOTを用いた飛行試験でこれに協力し、姿勢角制御にFELを適用して応答遅れや定常偏差の改善を飛行実証した。

また前述のDI+NN制御系を、FHI開発の超小型固定翼無人機<sup>(10)</sup>に搭載し飛行実証を行った<sup>(11)</sup>。この無人機はホビー用RC機をベースにした全長約60cmの機体で、そのサイズからセンサは限定され、外乱風の影響も大きく、機体の空力特性も十分検証されていない。飛行試験では、NN補償がDI制御内の逆モデルと実際の特性の差異をオンライン学習し、モデル化誤差に対するNNの対応能力を実証した。

その後2005~2007年に、社団法人「日本航空宇宙工業会」の取りまとめで実施した経済産業省委託事業「航空機用先進

システム基盤技術開発:耐故障飛行制御システム」にFHIも参画し、超小型無人機で実証したDI+NN制御系を、機体特性の異なるFABOTやJAXA所有の多目的実証実験機MuPAL- $\alpha$ に搭載し<sup>(12)</sup>、舵面故障を模擬した状況下で姿勢角制御を成功させ、耐故障制御としての有効性が確認された。

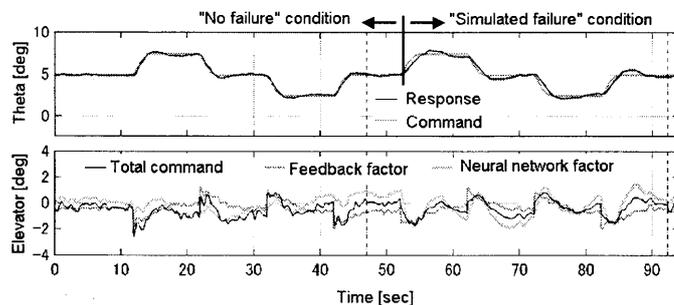


Fig.3 Flight test data using MuPAL- $\alpha$  on the simulated failure condition that elevator effectiveness is reduced by half

#### 5. おわりに

今後も電子技術の発展が期待され、その技術的進歩を基盤に無人機は活動範囲を広げることが期待される。自動離着陸技術や安全性向上技術を始め、無人機の真の実用化には、制御技術の進歩が重要な鍵になると考えられる。

#### 参考文献

- (1)山根他,"無人ヘリコプタ RPH-2 による自動離着陸", 第40回飛行機シンポジウム (2002)
- (2)山根他,"画像認識・ニューラルネットワークを用いた無人ヘリコプタ RPH 2 の自動着陸", 第42回飛行機シンポジウム (2004)
- (3)小川他,"進化的処理を用いた画像着陸センサの開発",第42回飛行機シンポジウム (2004)
- (4)手塚他,"無人飛行体着陸制御用ニューラルネットワークの構造と学習", 第42回飛行機シンポジウム (2004)
- (5)阪口他,"高速飛行実証(フェーズ I)の自動離着陸技術の開発", 第41回飛行機シンポジウム (2003)
- (6)永山他,"固定翼無人機の自動離着陸技術", 第41回飛行機シンポジウム (2003)
- (7)A.J.Calise 他,"Development of a Reconfigurable Flight Control Law for the X-36 Tailless Fighter Aircraft", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA-2000-3940 (2000)
- (8)D.Wolpert 他, "Internal models in the cerebellum", Trends in Cog. Sci., 2, 338-347 (1998)
- (9)野添他,"剛体運動を含めたニューラルネットワーク飛行制御系", 第41回飛行機シンポジウム (2003)
- (10)浅川他,"超小型無人飛行機の開発", 第42回飛行機シンポジウム (2004)
- (11)赤嶺他,"ニューラルネットワークを用いたダイナミックインバージョン法による超小型無人飛行機の制御", 第43回飛行機シンポジウム (2005)
- (12)赤嶺他,"耐故障飛行誘導制御技術の研究開発-小型航空機用適応制御の飛行実証-", 第45回飛行機シンポジウム(2007)