解 説

固定翼系ロボティクス

Solid Wing Aerial Robotics

岩 田 拓 也* *産業技術総合研究所

Kakuya Iwata* *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1. 固定翼系ロボティクスの歴史と分類

近年ドローンと呼ばれて、空撮映像や測量計測、インフラ点検、火山観測、物資輸送などに利用されつつある空中ロボティクスであるが、ドローンという呼称のルーツは1935年に実用化された固定翼の軍用無人標的機にある。これは1931年に英国において世界で初めて実用化された軍用無人標的機（図1）のクイーンビー（女王蜂）に遅れること4年、米軍で開発されたため、ドローン（オス蜂）という名称となったようである。

1931年といえば、すでに単葉機が実用化されて複葉機が消えつつある時期であるが、最初に実用化された無人航空機が依然として複葉機であった理由は、人が遠隔で操縦するために、操縦応答性が良く理解された機体である必要があったためである。この点は無人航空機の本質で人間の慣熟操作に依存できないがゆえに、ジャイロセンサによる自動姿勢安定装置や慣性航法装置、GPS航法装置などが搭載されて人間の代わりにバランスを取る操作をする必要がある。最近では人間が行うエマージェンシー対応も自動化されている無人機も軍用分野ではすでに実用化されている。これは、空中という空気の流れ以外に外乱要素が極端に少ない開空間であることと、人が搭乗しないために減少するリスクとIT機器の発達によるデータ容量の増大を合わせて、やっとデータベース化が可能になった技術である。特に人間の操縦によるこれまでの知見の蓄積は、ロボティクスが吸収すべき部分であり、人間が今まで飛行機の操縦において何をやってきたかを理解する機会でもある。

航空機の分類では、まず空気より軽い気球や飛行船と、空気より重い固定翼機、回転翼機に分類される。歴史的に、初飛行は空気より軽いものが早く、空気より重いものの中では固定翼機が早かった。これは固定翼機が回転翼機より少ないエンジン出力で飛行できたことに加えて、ある範囲において空力的にバランスがとれる状態が作り出せる長所

図1 無人標的機クイーンビー [1]

があったからと考えられる。固定翼機の空力的なバランスの代表的なものは、ロール軸では主翼の上反角効果および下反角効果、ピッチ軸では主翼の頭下げモーメントと水平尾翼揚力のバランス、ヨー軸では垂直尾翼の風見鶏効果や主翼の後退角効果などが挙げられる。アクロバット機のように高い機動応答性を得るためにバランスをとる復元力を意図的に消す設計の航空機もあるが、飛行ロボットにおいては通常これらの空力的復元力を利用しながら機体の制御を行っている。

2. 固定翼ロボティクスの特色

固定翼系ロボティクスでの制御は、進行方向の並進・回転運動、横方向の並進・回転運動を通常分離している。主翼の迎角が大きい領域などでは、進行方向と横方向の連成運動が発生するため、ピッチ軸回りの姿勢角摂動運動操舵応答および推力制御、ロール軸回りの姿勢角と横滑り運動やヨーイングに加えて、両者の連成運動相互作用がモデルに組み込まれている。非線形な連成運動の組み込みが大きな外乱に耐える安定性やユニークなマニューバを可能にする競争力を生み出す鍵になっている。例えば、失速を利用して着陸する図2のPUMAのような飛行ロボット特有タイプも、揚力飛行運動と失速降下運動の連成運動を制御している例である。

図2は失速降下時の様子であるが、水平尾翼が通常飛行時の機首上げの方向に向いているが、失速降下時には降下方向に向き縦方向のバランスを制御している。このように

原稿受付 2015年11月4日

キーワード: UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Cargo-UAV, Drone, UAS (Unmanned Aerial System), Aerial Robotics
*〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1

*Tsukuba-shi, Ibaraki

図 2 エアロパイロメント社の PUMA [2]

図 3 エアロゾンデ [3]

固定翼系飛行ロボットでは、人間の操縦から複数要素連成運動の取り込みを進めている一方で、従来の有人の固定翼航空機では用いられない新しい飛行形態が取り入れられている。また、固定翼飛行ロボットの弱点として、離発着に失速速度以上の速度で滑走する滑走路などのスペースが必要な点が挙げられるが、PUMA の離陸方法は人間による手投げで、着陸方法は狭い場所に降ろせる失速降下であるため、固定翼飛行ロボットの広い離発着場所が必要な弱点を克服して、マルチロータヘリコプタに匹敵する運用のしやすさを実現しながら、2〜4時間の長時間飛行を実現している。

飛行制御には姿勢制御と経路制御の二つがあるが、固定翼飛行ロボットの場合、姿勢は経路を追従させることにより安定させるタイプが多い。機体の形態によって、縦横方向の運動とのインタラクションの度合いが異なる。例えば、主翼と胴体、水平尾翼と垂直尾翼からなる3舵式固定翼機の場合、無尾翼機と比較して縦方向と横方向の相互作用が少ないため分離したモデル化が可能で、揚力中心や重心からの尾翼の距離を長く確保し縦方向のモーメントに強くする設計をすると、だいたい最適解が図3のエアロゾンデのような形態になるため、この形状の固定翼飛行ロボットは世界各国で数多く見受けられる。

固定翼型飛行ロボットの性能は、大きく主翼の特性に依存することから、固定翼ロボティクスでは目的に合った主翼の選定から設計が始まる。固定翼飛行ロボットでニーズが高いのは、高効率な特性を生かした長時間および長距離飛行型であるが、この目的のためには、翼端誘導抗力の小さいアスペクト比の高いテーパー翼が使用される。図3のエアロゾンデなどは、このタイプの翼の選択をしているが、アスペクト比の高い直線翼は揚力の増大に伴いピッチ軸回りに頭下げモーメントが顕著に発生する。このためそれを打ち消す尾翼が必要で、空気抵抗の小さな尾翼にするために胴体やフレームを長く取ってモーメントを稼ぎ、なおかつエレベータとラダーを一体とした逆V字尾翼を採用する設計がなされている。

図 4 ボーイング社のスキャンイーグル [4] [5]

固定翼無人機の最大の長所は揚抗比の高さで、揚抗比10の機体なら空気抵抗の10倍の揚力を発生することが可能なため効率が良く、少ない燃料や充電量で長時間飛行することが可能であるが、尾翼をなくすことで更なる空気抵抗の低減が可能で、これにより飛行効率を向上することができる無尾翼機は、図4のスキャンイーグルなどで実用化されている。

固定翼飛行ロボットの弱点として、離発着に失速速度以上の速度で滑走する滑走路などのスペースが必要な点が挙げられるが、スキャンイーグルは人が搭乗しないロボットであることを活かしたユニークな解決法を採用している。図4のように、カタパルトで機体を打ち出すことで離陸のスペースを削減し、着陸はクレーンから吊るしたワイヤーに機体の翼端のフックを引っかけることにより図4の宙吊り状態で回収される。ワイヤーが機体に当たらなければ、何度も自動で繰り返しワイヤーの場所を通過するプログラムにより、人が何もしなくても回収できる仕組みである。このほかに、着陸用のパラフォイルを開傘して狭い場所に着陸する方式など、固定翼飛行ロボットの広い離着陸場所を必要とする弱点を克服する技術が近年続々と実用化されている。

3. 長距離長時間飛行型固定用無人機

固定翼無人機の最大の長所は効率が良く、少ないパワー

図5 ヘリオス [6]

図7 スノーグース [8]

図6 空中無人輸送機

図8 新しい翼 Woopy [9]

で大きな揚力が得られる効率の良さを使えば、例えば、揚抗比が5であれば、揚力の5分の1の空気抵抗に抗する前進力しか必要としない。それ故に低速で飛行させて、図5のヘリオスのように長時間飛行を可能にするタイプの固定翼機がある。

また、1960年代にNASAで開発されたログロ翼と振子安定制御装置を搭載した図6の空中無人輸送機も、固定翼でありながら軽量で取り扱いが容易な利便性があり、長時間および長距離の飛行が可能でペイロードも70~100[kg]と大きいことが特徴となっている[7]。

同じく1960年代に開発された風によって展開される柔軟構造を持つパラフォイルという翼を用いた図7のCQ-10スノーグースというUAVをカナダのMMST社が実用化している。これは、270[kg]の搭載能力があり、時速55[km]で飛行可能で、940[km]の航続距離や20時間の耐空飛行時間が可能である。さらに最近、柔軟構造とソリッド構造の中間の図8のWoopyという翼が製品化され、固定翼飛行ロボットへの応用が期待されている。これらの新しい翼に共通する点は、従来の固定翼と比較して圧倒的に失速速度が低いため、狭い場所での離着陸が可能である点であり、着実に固定翼の弱点である滑走路が必要な点を克服する新技術が誕生してきている。

4. 固定翼飛行ロボットの課題

前述のとおり、固定翼の課題である滑走路が必要な点は、翼というハードウェアの進歩により克服されつつあるが、ICTソフトウェアの分野には、まだ固定翼飛行ロボットの飛行運航に関する大きな課題が残っている。

固定翼飛行ロボットの長距離長時間飛行が可能で高効率による可搬重量が大きいという長所を活かすためには、長距離飛行による視程外飛行と長時間飛行に伴う夜間飛行、重量の大きい機体を安全に簡便に運航できるしくみが必要である。

広域、長距離、視程外を飛行するためには、その長距離を通信で繋ぐ長距離通信の確保が課題となる。軍用の場合、衛星通信で解決しているが、民間の場合、今の衛星通信ではコストと通信容量が合わない。衛星通信の低価格化を待つのか、携帯電話網との接続や地上通信の中継技術を発達させるのかで将来のマーケットの拡大速度が異なってくる。国際電機通信連合ITUの世界無線通信会議WRCでは、図9のように、視程内のUASと地上間の通信については5[GHz]帯の地上通信を利用し、長距離の視程外飛行についてはUASと通信衛星間の通信を用いることを将来の飛行ロボットの通信システムと想定している[10]。

図9 長距離飛行する固定翼飛行ロボットの通信

固定翼飛行ロボットには、その長距離飛行特性を生かして、離れたところから離陸し、目的の場所に飛来し作業をこなした後、また離れたところに帰っていく長距離運用でのソリューションが提供できるメリットがあり、それは過去に福島原発の撮影をしたグローバルホークが分かりやすい例となっている。このことから、衛星通信など長距離を通信可能なシステムの確立は、今後の固定翼型飛行ロボット普及の重要な鍵となる。

5. 固定翼系ロボティクスビジネスの将来像

固定翼系ロボティクスは、広域、長距離、長時間飛行が可能な特性から、通信などの社会インフラや既存航空や生活環境の安全維持などのグローバルな環境も含めた広範な総合システムに将来なることが予想される。

通信や情報処理、製造業、サービス業など多様な産業と社会環境が融合した広範な分野であるところは、他のロボティクスと同じであるが、1,000キロ以上の航続距離の長さ、24時間以上の飛行時間の長さなどをすでに実現しているところは先駆的である。これらの特徴や利便性を活かしたシステムとその運用について今後考えていく必要がある。特に、今年2015年に航空法の法改正が行われ、許認可のプロセスを伴うようになった。実際には許認可手続きは航空局だけでなく、警察や消防や地元自治体などにも必要なケースが多い。特に、警察への連絡は重要で、飛行ロボットを目撃した一般の目撃者から通報があると、警察署は確認に現場へ行かなければならない。また、地図には載らない自衛隊の演習空域も存在していたり、それらの情報は空域を利用する組織間で構成された協議会が地域で組織されていて、その連絡会でコンセンサスが取られていたりする

ので注意およびそのコミュニティへの参加が必要である。これらの許認可等雑多な作業を、飛行ロボットを使おうとする企業や製造しようとする企業が人員を育成して実施することは大変なコスト負担となるだけでなく、人材育成が追い付かない。このことから、特に視程外に飛行するニーズが多い固定翼飛行ロボットでは、多数の関係省庁への許認可を一手に引き受けて飛行ロボットを利用する利用者や製造するメーカーから運航代行するサービスプロバイダが必要になっている。それは、ちょうど、携帯電話ユーザの代わりに無線電波発信に関する許認可を一手に引き受けている携帯電話のサービスプロバイダであるドコモ、au、ソフトバンクの業認定と同様に、飛行ロボット運航における許認可や経路選定と気象予測、遠隔監視、エマージェンシー対応、衝突回避、プライバシーセキュリティ管理まで一手に引き受けるサービスプロバイダの誕生により、固定翼ロボティクスは今後大きく発展すると考えられる。

参考文献

- [1] <http://www.erepublik.com/en/article/uav-o-drone-la-historia-de-un-arma-dise-ada-para-la-guerra-2516757/1/20>
- [2] http://www.avinc.com/downloads/AV_PUMAAE_V10109.pdf
- [3] http://www.strategypage.com/military_photos/20130417205352.aspx
- [4] http://www.strategypage.com/military_photos/military_photos_2010080405531.aspx
- [5] <http://www.naval-technology.com/features/feature62615/feature62615-2.html>
- [6] <http://www.nasa.gov/centers/dryden/history/pastprojects/Helios/index.html#.VjB-abfhBdg>
- [7] K. Iwata, et al.: "Aerial Cargo Robot (Cargo UAV)," Journal of Robotics and Mechatronics, vol.26, no.3, pp.394-395, 2014.
- [8] http://www.mmist.ca/pg_ProductsSnowGooseOverview.php
- [9] <http://www.lightsportaircraftpilot.com/woopyflyultralight/index.html>
- [10] <http://www.arib.or.jp/osirase/seminar/no93konwakai.pdf>

岩田 拓也 (Kakuya Iwata)

1998年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年産総研に改組。2004年青色LEDから無人航空機（ドローン）の研究に転向。2007年日本機械学会交通物流部門優秀講演表彰受賞。AIAAにてCargo-UAV初飛行を発表。新潟スカイプロジェクト立ち上げ。現在産総研知能システム研究部門主任研究員、一般社団法人日本UAS産業振興協議会常務理事、（日本ロボット学会正会員）