

TSC Foresight

Vol. **17**

無人航空機 (UAV) システム分野の 技術戦略策定に向けて

2017年2月

1 章 UAVシステム技術の概要	2
1-1 UAVシステムとは	2
1-2 UAVシステムの要素技術	3
1-3 UAVシステム開発の方向性	4
2 章 UAVシステム技術の置かれた状況	5
2-1 UAVシステムの市場規模・シェア	5
2-2 特許文献数、論文件数の動向	5
3 章 UAVシステム分野の技術課題	9
3-1 UAVシステムの技術体系及び課題	9
3-2 UAVシステムの社会実装に向けた規格・基準等の課題	11
3-3 目視外自律飛行の実現に向けたUAVシステムの構造	13
4 章 おわりに	14

TSCとはTechnology Strategy Center (技術戦略研究センター)の略称です。

1章 UAVシステム技術の概要

近年、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) の産業利用への関心が急速に高まっている。その用途として農作業、警備、監視、点検、物流等、様々なものが提案され、産業界の期待も大きい。安全を考慮したUAVシステムの高度化を図る技術開発により、社会に受け入れられる仕組みを整え、UAVの産業利用を促進する動きが活発化している。

1-1 UAVシステムとは

UAVは無人航空機一般を指し、ドローンと呼ばれることもある。これらの名称は混用されているが、本稿では呼称をUAVで統一し、機体と運航管理のための地上サポート機器を含めてUAVシステムと呼ぶこととする。

UAVは、大型から小型まで、用途は軍事用から産業用、ホビー用まで多岐にわたる。図1にUAVの種類を用途別に示す。

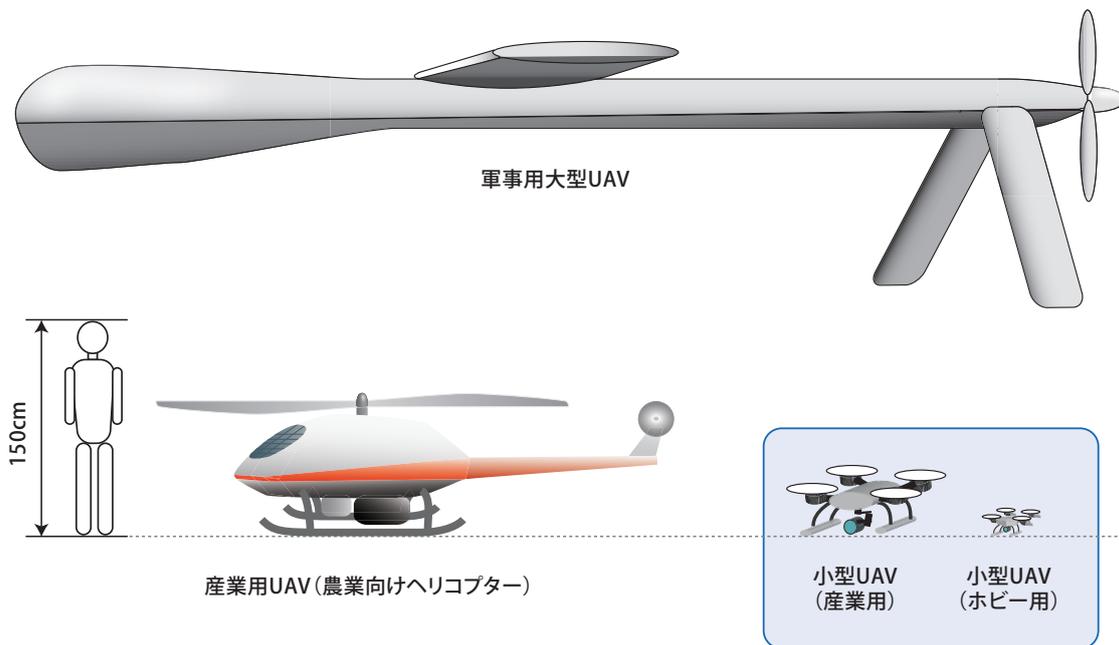


図1 UAVの種類とサイズ比較 (イメージ)

注 特定の機種を作図したものではない。

出所：各種公開資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2016)

無人航空機(UAV)システム分野の技術戦略策定に向けて

UAVには様々なタイプの機体があり、固定翼機、回転翼機及び両者の複合型が存在する。中でも製品開発が活発なのがマルチコプターと呼ばれる4個以上のプロペラを用いて垂直離発着を行うものである^{※1}。ヘリコプター^{※2}とは異なり、各プロペラの回転数を指定するだけで安定飛行でき、制御機構が単純であるため、小型化に向いているといった特徴がある。

IMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置)^{※3}への半導体センサの導入による小型・低価格化やバッテリーの軽量化をきっかけとして、2010年のParrot (フランス)のA.R.Droneの発売以降、急速に開発が進み、DJI (中国)の成長に代表されるようにUAV市場も拡大している。これらのUAVは主にホビー用であるが、使用される技術及び機体は産業用と共通である。

日本では、1990年代から無線操縦のヘリコプターによる農薬散布がUAVの最大の用途である。農林水産省の統計によれば、国内では2015年現在で2,500機程度が利用されている^{※4}。この用途向けの一般的な機体は重量が70kg程度、ローター半径1.5m程度と離発着に広い場所が必要で、利用できる場所が限定されることと、機体価格も1,000万円台と高価で、普及は限定的となっている。

一方、小型マルチコプターは100万円程度と安価で、プロペラと本体を含めても半径0.3～1m程度である。カメラを用いて障害物の回避や人の追従を行う機能や、スマートフォンと連携して地図や機上カメラの画像を表示する機能、さらに簡易な自動操縦機能も備えている。そのためUAVを用いた測量や、橋や鉄塔などの高所の点検といった分野での活用も進みつつある。そして、2015年のダボス会議でもUAVの自律飛行に必要な「Sense and avoid」が

注目されたほか^{※5}、Amazon (米国)の英国でのUAVによる商品配達の実証実験など、サービス市場においてもUAVを活用したイノベーションが起きると期待されている。

本稿で対象とするのは、民生用UAV、中でも小型マルチコプターであり、かつ、ペイロード1～10kg程度の産業向けの機体とする。

1-2 UAVシステムの要素技術

UAVシステムの現状の要素技術は、以下のように整理される(図2)。

(1) アクチュエータ系

モータ、プロペラ、バッテリー

(2) センサ系

IMU
衛星測位デバイス(GPS: Global Positioning System)
カメラ

(3) 制御系

自動操縦
航法
センサを利用した環境認識による測位

(4) 運航サポートシステム

無線通信機
地上機器(操縦装置)
運航管理システム
電子地図等

※1 マルチコプターの定義上は3個プロペラの機体も含まれるが、異なる制御方法を用いることと実現例が数少ないため除外した。

※2 ここでは回転翼機のうちスウォッシュプレートに代表される複雑な回転翼(ローター)の制御機構を有するものを指す。

※3 加速度、角速度等を測定し、機体の姿勢やその変化率を求めるセンサ。

※4 出所: 農林水産省「農林水産航空事業の実施状況について」
http://www.maff.go.jp/j/syouan/syokubo/gaicyu/g_kouku_zigyo

※5 <https://www.weforum.org/agenda/2015/03/emerging-tech-2015-sense-and-avoid-drones/>
Sense and avoid は本稿ではDAA (Detect And Avoid)を用いる(後出)。

無人航空機 (UAV) システム分野の技術戦略策定に向けて

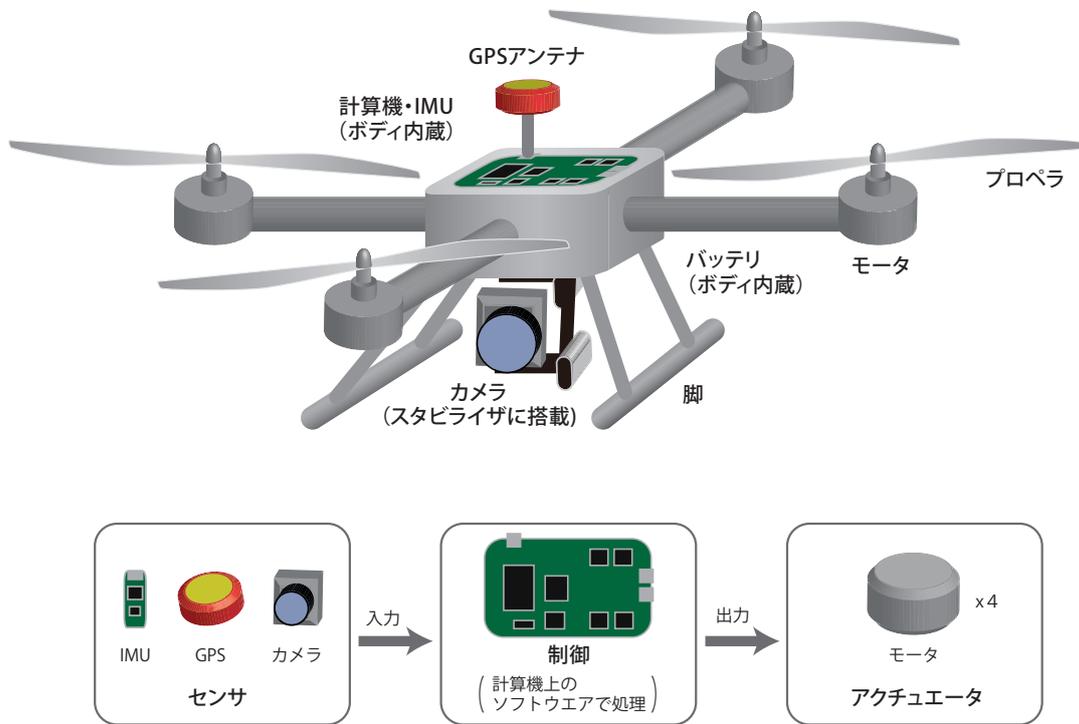


図2 UAVの主な要素技術

出所：各種公開資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

1-3 UAV システム開発の方向性

日本では、現在、改正航空法^{※6}により、目視（直接肉眼による）範囲内で常時監視してUAVを飛行させることが義務付けられており、これによらない手法での飛行にはあらかじめ国土交通大臣の承認を得ることが必要となっている。

産業利用の本格化に向けては、目視外自律飛行が期待されている^{※7}。そのためにUAVシステムの技術開発とともに、UAVシステムを広く普及させるための制度作りも検討する必要がある。

※6 http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html

※7 http://jane.or.jp/topic/detail?topic_id=525

2章 UAVシステム技術の置かれた状況

2-1 UAVシステムの市場規模・シェア

UAVシステムの世界市場については、サービス市場の拡大が見込まれており、近い将来、十兆円を超える規模に達するとの試算結果も公表されている^{※8}。

現在、小型UAVの市場では、DJI (中国)、Parrot (フランス)、3D Robotics (米国) の3社がほぼ独占している。

しかしながら、スマートフォンメーカーの小米 (中国) の機体開発の表明や、ウェアラブルカメラを手掛けているGoPro (米国) も機体を発売するなど、異業種からも多くの新規参入が始まっており、今後は価格競争が激化すると考えられる。

2-2 特許文献数、論文件数の動向

(1) 特許文献数の動向 (発行年ベース)

UAVに関する特許文献^{※9}数は近年増加している。特に中国からの出願が急増している (図3)。

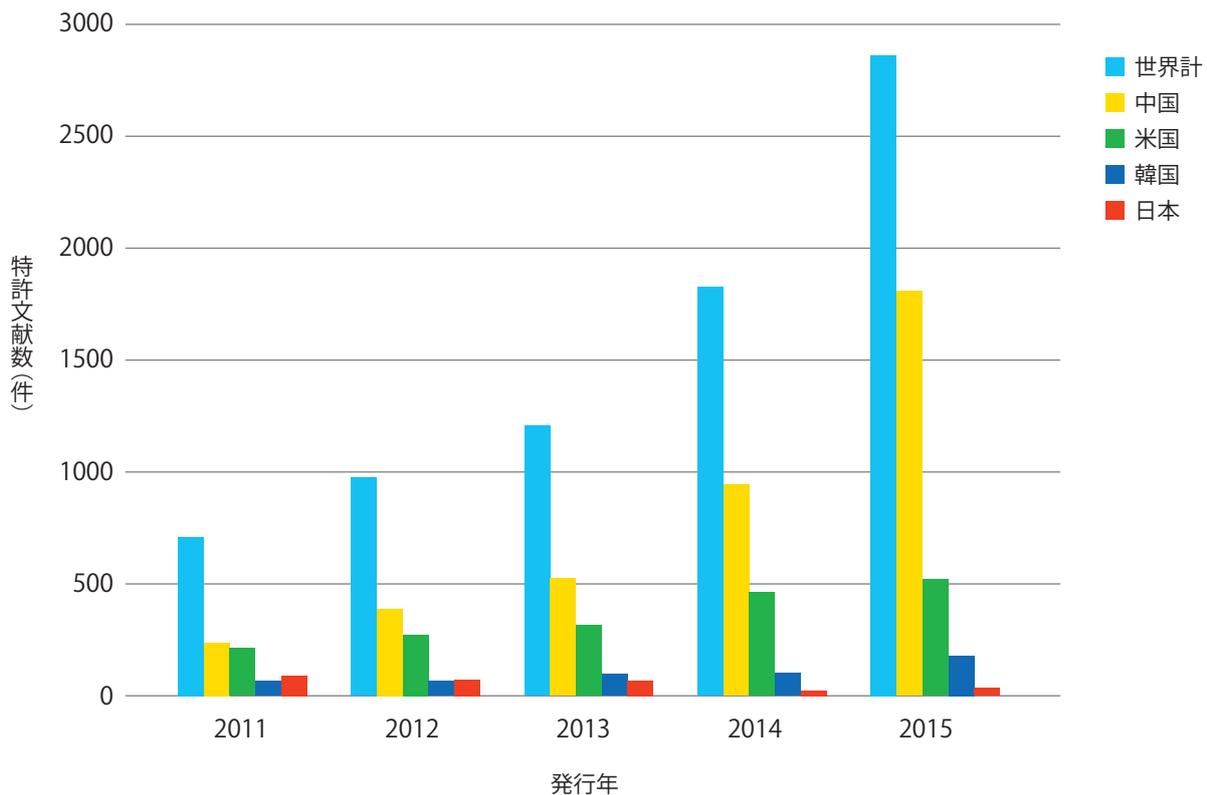


図3 UAV技術の年別特許文献数 (国内外)

出所：Derwent World Patents Indexでの検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2016)

※8 <https://www.pwc.es/es/publicaciones/tecnologia/assets/clarity-from-above.pdf>

※9 特許文献：公開特許公報、特許公報、登録実用新案公報等が該当する。

無人航空機 (UAV) システム分野の技術戦略策定に向けて

図4と図5に、UAVの安全性技術と自律飛行制御に関する最近5年(2011～2015年)の特許文献数の推移を示す。これらの技術は産業用途のUAVの安全性を高め、社会に普及させるために不可欠であり、国内外の特許文

献件数は、ここ1、2年で急増し、技術開発競争が始まりつつある。ただし、特許文献数自体が少ないため、現時点では国別の優劣の分析は困難である。

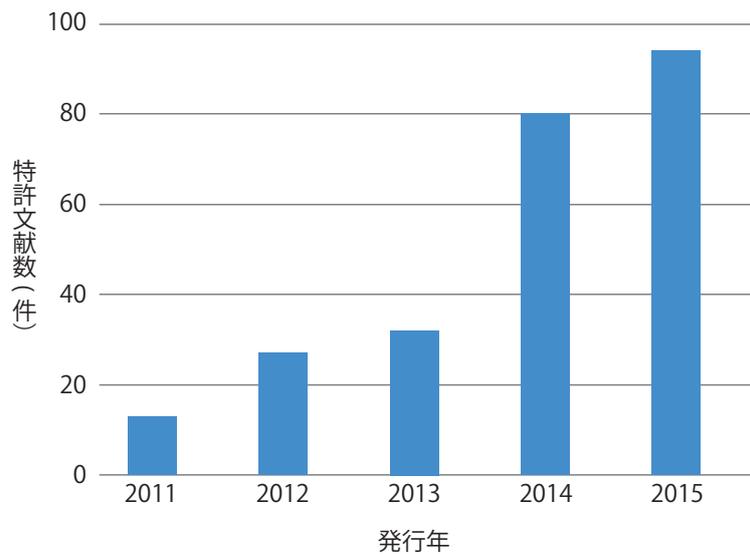


図4 安全性技術の年別特許文献数(国内外)

出所：Derwent World Patents Indexでの検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

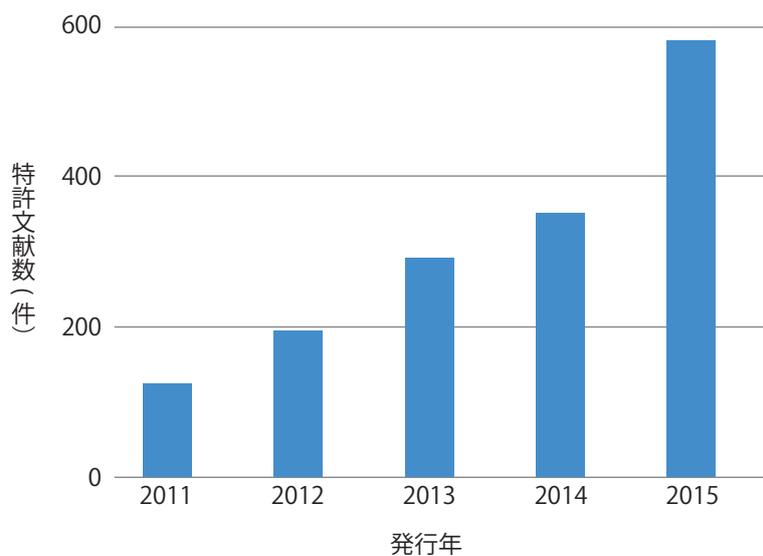


図5 自律飛行制御の年別特許文献数(国内外)

出所：Derwent World Patents Indexでの検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

無人航空機 (UAV) システム分野の技術戦略策定に向けて

目視外自律飛行の実現のために重要なデバイスとして DAA (Detect And Avoid) が挙げられる。これはカメラやレーダなどのセンサで、接近する他機を検出するものである。小型 UAV の典型的な最高速度は 60 ~ 100km/h 程度であり^{※10}、自動車と同程度であることから、自動車分野で開発が先行しているセンサを用いて衝突危険性の検知を行う予防安全技術の活用も考えられる。そのためには自動車用予防安全技術の要素技術 (カメラ、ミリ波レーダ、レーザーレーダ、超音波センサなど) を UAV システムの DAA に適用する技術開発が必要である。

特許庁の平成 27 年度調査によると、自動車用予防安全

技術の要素技術では、日米欧中韓独への出願件数上位の出願人ランキングでは、世界トップ 10 の約半数が日本企業であり、日本は海外勢に比べて優位なポジションにある。同調査による自動車用予防安全技術の出願人国籍別出願件数 (技術区分別) を図 6 に示す。これによると、カメラ、ミリ波レーダ、レーザーレーダなどで、日本の特許出願が海外勢に比べて多く、優位にあることが分かる。

その他、UAV システムの安全性技術、目視外自律飛行に必要な、情報セキュリティ (暗号技術、認証技術)^{※11} や衛星測位システム (省電力化技術)^{※12} といった要素技術の特許出願においても、日本の特許出願は多く、優位にある。

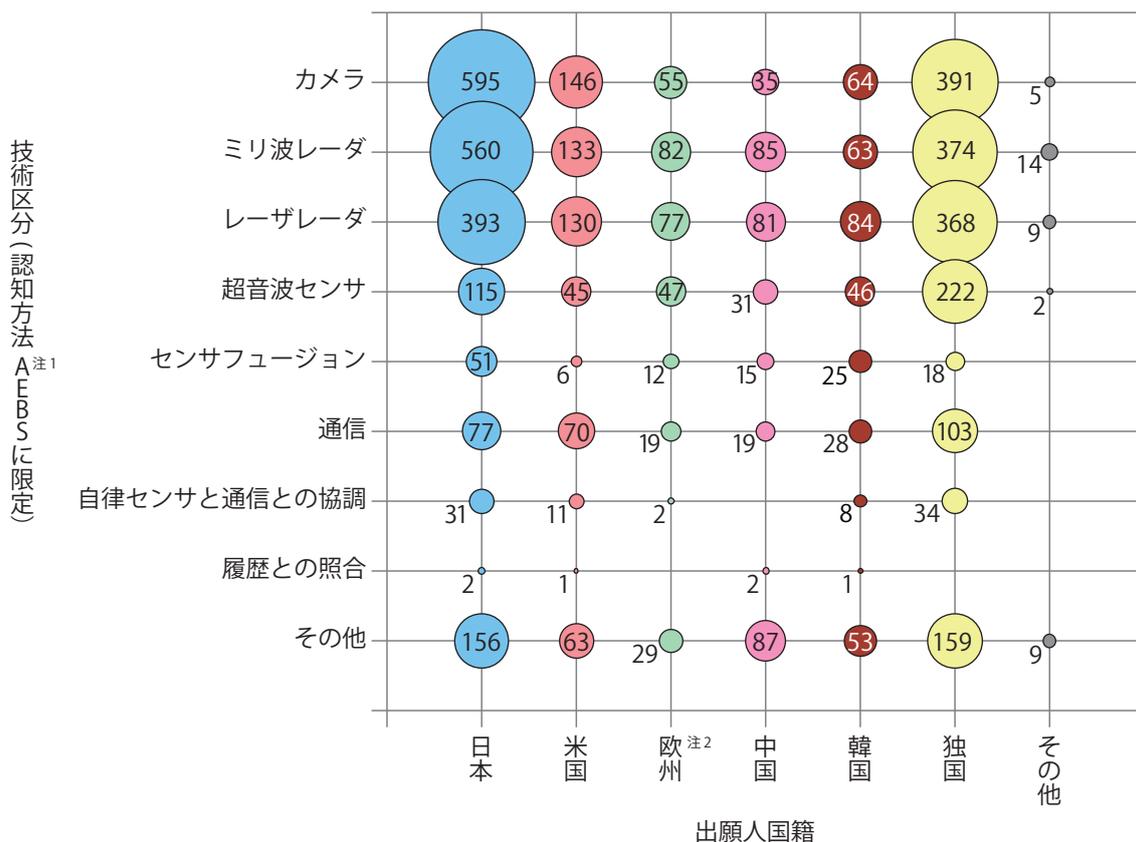


図 6 自動車用予防安全技術 (技術区分別) の出願人国籍別の出願件数

注 1 AEBs (Autonomous Emergency Breaking System : 衝突被害軽減制御装置)

注 2 欧州には独国を含まない。

出所 : 平成 27 年度特許出願技術動向調査報告書 (概要) (特許庁 2016)

※ 10 <https://www.dji.com/jp/matrice600/info#specs>
<http://www.dji.com/jp/inspire-2/info#specs>

※ 11 https://www.jpo.go.jp/shiryuu/pdf/gidou-houkoku/h27/27_20.pdf

※ 12 https://www.jpo.go.jp/shiryuu/pdf/gidou-houkoku/h27/27_01.pdf

無人航空機 (UAV) システム分野の技術戦略策定に向けて

(2) 論文件数の動向

UAV関連の論文件数の動向は、特許出願と同様に、近年急増している(図7)。国別では、日本の論文件数は少なく、米国や中国の論文件数が非常に多くなっている(表1)。

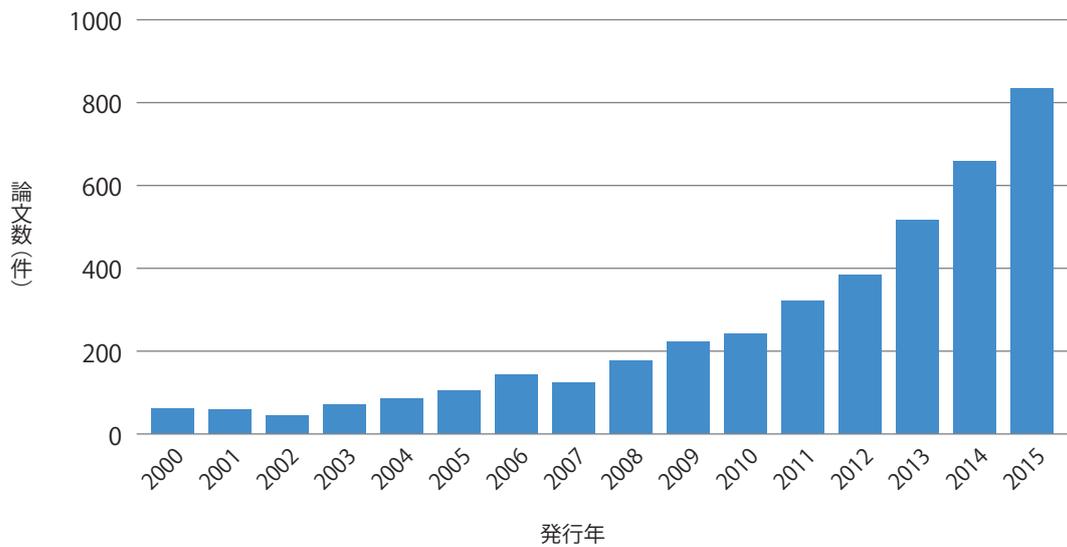


図7 UAV技術の論文件数の推移

出所：Web of Science™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

表1 UAV技術の論文発表件数の上位国(2000～2015年累計)

順位	国	論文数	順位	国	論文数
1	米国	1265	8	フランス	177
2	中国	445	9	イタリア	160
3	ドイツ	263	10	カナダ	155
4	英国	256	11	ブラジル	101
5	オーストラリア	234	12	ポーランド	81
6	韓国	211	13	日本	80
7	スペイン	188	14	トルコ	72

出所：Web of Science™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

3章 UAVシステム分野の技術課題

3-1 UAVシステムの技術体系及び課題

1章で述べたように、UAVシステムによる産業利用の本格化に向けて目視外自律飛行が期待されており、有人機の航空管制に相当する運航管理システム及び自動操縦・衝突回避の機能等が必要である。

現状でも、PC上のアプリケーションで電子地図上に飛行コースを設定し、自律的に飛行を行い帰還することも可能ではあるが、GPS測位は高度測定に関して精度に改善の余地があること、電子地図には木(生育状況含む)や工事、建設現場などのリアルタイム情報が反映できていないこと等から、低空飛行時や離着陸時には操縦者の目視が必須となる。すなわち、現在の技術では、完全な目視外自律飛行は実質的に困難な状況であり、そのための技術開発が待たれている。

以下に、目視外自律飛行を可能にするために必要な技術課題を挙げる。

(1) アクチュエータ系

アクチュエータであるモータ、プロペラに関しては、今後、効率の向上が望まれる。バッテリーの主流となっているリチウムポリマー電池は、エネルギー密度が大きいことが特徴であり、小型UAVの実現の要でもあった。しかしながら、安全性の向上が課題となっている。

(2) センサ系

機体の3次元の挙動を計測するIMUは、UAVに搭載するセンサの中でも最も重要なものである。近年、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を用いたIMUの半導体チップ化が進展し、小型UAVの実現に大きく寄与した。今後も精度の向上が望まれる。

測位に関しては、衛星測位が用いられているが、精度がm(メートル)オーダーであるため、複数の衛星システム(GPS(米国)、GLONASS(ロシア)、準天頂衛星(日本))を組み合わせたマルチGNSS(Global Navigation Satellite System: 全球測位衛星システム)の測位デバイスの開発が進んでいる。マルチGNSS測位は、cm(センチメートル)オーダーの精度をもつ地上用の測量機器として実用化されているが、UAVに搭載するためには小型化・高速化が課題となる。

目視外自律飛行する際の安全性を向上するために非常に重要なのが、DAAのデバイスである。短距離での衝突回避は実現例がある^{*13}が、UAVの高速飛行時の衝突を避けるためには、自動車の予防安全技術を応用した小型、軽量デバイスの開発が期待される。

また、衛星測位が使用できない状況(谷やビル街の低空など)でも精度を確保するために、カメラで撮影した環境の動画像から移動距離を推定するビジュアルオドメトリや位置推定と地図作製を並行して行うSLAM(Simultaneous Localization And Mapping)などの技術についても、活用が期待される。

(3) 制御系

自動操縦に関しては、実用レベルであるが、悪天候や突風などでも安定して飛行可能とするには課題がある。さらに、空域共有時の安全性を高めるために、航法や自動操縦の性能を向上させることが課題である。

衝突回避のためには、運航管理システムからの指示で接近予防する技術と、機体に備えたDAAを使って他機や障害物を検知し回避する技術の二重構造により、安全性の向上をはかることが期待される。

また、これらの制御技術はソフトウェアで実現されるが、ソフトウェア開発プラットフォームの整備も必要である。DJIは独自開発のソフトウェア及びソフトウェア開発環境である

*13 DJI Inspire 2 (<http://www.dji.com/jp/inspire-2>)の「障害物認識・回避機能」の項参照。

無人航空機(UAV)システム分野の技術戦略策定に向けて

SDK (Software Development Kit) を提供しているが、他方で、Parrotや3D Roboticsでは、オープンソース戦略をとっており、オープンソースのプロジェクトとしては、ドローンコード(Dronecode)^{※14}が挙げられる。このプロジェクトには日本のUAVメーカーも参加している。

(4) 航法

目視外自律飛行のためには、離陸後、状況変化に応じて経路計画を変更できることが不可欠である。そのためのセンサや3Dマップ等からの情報をもとに、障害物や飛行禁止空域を回避し、バッテリー残量等を考慮した経路を算出する研究は行われているが、実装には至っていない。考慮すべき条件が複雑になると計算量が増えるため、計算資源の限られる機上には実装するには課題がある。そのため、下記の運航サポートシステムの支援を受けることも考えられる。

(5) 運航サポートシステム

地上とUAV機体は無線通信により交信を行うが、電波法施行規則等の改正^{※15}により使用可能な周波数帯が増え、携帯電話網への接続も試験的に開始された。これらに対応した無線機器と電波チャンネル管理の手法の開発が今後の課題となる。また、地上機器はUAVの管理の他にも運航管理システムとの連携機能が必要となる。

運航管理システムは、UAV及び地上機器と連携し、UAVの機体位置情報をリアルタイムで収集し、衝突を予測し、回避指示を出すといったマネジメントを行う。また、電子地図や気象情報とも連携してUAVの運航情報を提供する。この分野で先行する米国では、NASAによりUTM(Unmanned Aircraft Systems Traffic Management: 無人航空機システム交通管理)の開発が進められている。また、世界UTM標準化グループ(Global UTM Association)が組織され、国際化の動きも始まっているが、UTMの設計はテストを繰り返しながら漸進的に進める方針であり、有人航空機の航空管制との関係や飛行ルールも含めて課題が多い。

UAVの目視外自律飛行には、3次元の情報を持った電子地図(3Dマップ)が必要となる。国内の地図に関しては、内閣府戦略的イノベーション推進プログラム(SIP)の一環で自動運転向けの精密な3Dマップが作製される予定である^{※16}。同様の技術を利用して、UAVの飛行に必要な送電線など上空のものに関する情報を加えて作製する。これについてはUAVによる測量などで補完することも考えられる。また、UAVにより、風速・風向や気温などの気象データを精密に測定し、情報提供するサービスも考えられる。これらは、気象予報に必要となる気象観測にも応用可能で波及効果が期待される。ここでは、3Dマップに関する共通規格の策定などが課題である。

※14 <https://www.dronecode.org>

※15 http://www.soumu.go.jp/main_content/000436330.pdf
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000251.html

<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/uav/>

※16 <http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/system/2kai/shiryos-1.pdf>

無人航空機(UAV)システム分野の技術戦略策定に向けて

3 -2 UAVシステムの社会実装に向けた規格・基準等の課題

UAVシステムの社会実装を進めるためには安全性とセキュリティが要求される。UAVが建物や人の上を飛行をする際の安全面における懸念が強まり、米国や欧州では法規制がかけられた。日本でも2015年12月施行の改正航空法により、空港等及び人口集中地区でのUAVの飛行には国土交通大臣の許可が必要となり、場所に関わらず日中、目視範囲内で人や物件から30m以上の距離を保って飛行させることとなっている^{*17}。また祭礼など多数の人が集まる催しの上空での飛行も禁止されている^{*18}。

一方、UAVを活用した産業の発展を見込んで、米国や欧州では、複雑な手続きなく飛行を可能にするためにルール作りが進められている。米国ではFAA (Federal Aviation Administration: アメリカ連邦航空局) がUAVの飛行許可ガイドラインを審議中であり^{*19}、欧州でもEASA (European Aviation Safety Agency: 欧州航空安全機関) が規則の制定に向けて議論を進めている。特に有人航空機との衝突、UAV同士の衝突、建造物等への衝突、バッテリー切れによる墜落など地上に被害を及ぼさないことが重要視されている^{*20}。日本では2015年12月に小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会^{*21}が設置され、UAVの産業用途拡大のために必要な技術開発や環境整備等の検討がなされている。

これら国内外の動きをもとに、整備すべきと考えられる基準・規格等を挙げた。

(1) 飛行ルール、空域設計の規格

有人航空機における飛行ルールと同様に、UAVにおいても飛行ルールの制定が求められる。回避行動の方法、機体間の間隔、緊急着陸等非常時の対応手法、運航管理システムとの通信手順、運航統制や排除に関する方法、ジオフェンス(進入禁止空域)の管理手法などを定める必要がある。

また、飛行する領域に関するルールとして、空域の設計も必要である。そのためには、シミュレータの利用や実機による実証などの研究開発や、各国の飛行ルール・空域設計との整合性を図る必要もある。

(2) 衝突回避システムの規格

運航管理システムと連携して衝突回避のための手法の一例として、有人航空機におけるADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) ^{*22}が挙げられる。これは自機の位置を定期的に無線で発信し、航空管制や機体間で情報共有するシステムである。同様の規格をUAV向けに検討する必要がある。ただし、有人航空機と異なり、UAVでは出力信号強度に限界があるため、運行管理システム経由で発信するなど独自方式を検討する必要がある。

(3) 3Dマップの規格

現在利用されている電子地図システムを3次元化し、UAVでも利用可能な、3Dマップのデータ規格化の検討が必要である。これには地形・建造物等の静的情報や、工事現場などの動的情報などの取り扱いに関する規格、ユーザーやUAVとのインターフェース手法等が含まれる。またUAVを用いた高頻度での3Dマップの作製や更新の手法の規格化も考えられる。

*17 <http://www.mlit.go.jp/common/001109793.pdf>

*18 http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html

*19 https://www.faa.gov/regulations_policies/rulemaking/recently_published/media/2120-AJ60_NPRM_2-15-2015_joint_signature.pdf
概要は https://www.faa.gov/regulations_policies/rulemaking/media/021515_suas_summary.pdf

*20 <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/civil-drones-rpas>

*21 <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/>

*22 <http://www.faa.gov/nextgen/programs/adsb/>

(4) UAVの性能基準・規格

飛行性能評価のための技術を開発し、UAVが満たすべき安全性の基準や規格化の検討も必要である。また、米国FAAや欧州EASAのガイドライン・規則との整合性を保ち、国際標準化の検討も求められる。

(5) セキュリティ基準・識別・認証の規格

セキュリティ上のリスクとしては、遠隔操縦における乗っ取り、運航管理におけるなりすまし、センサ情報の漏洩といった問題が想定される。この問題に対処するためには機上の計算機のサイバーセキュリティの強化が必要である。

また、なりすましや飛行規制に違反する運行防止のために、機体の識別や、機体と地上機器や運航管理システム間の認証に関する標準化の検討が必要である。

(6) その他

前述の通り、使用可能な周波数帯が増えたため、電波資源の有効活用のための手法の規格化も必要である。また、事故などのリスクに対応するために保険制度を設立し、対人・対物の損害賠償が保障される制度を作ることなど、義務化なども含めて検討されることを期待する。

無人航空機 (UAV) システム分野の技術戦略策定に向けて

3 目視外自律飛行の実現に向けた UAV システムの構造

3-1、3-2のまとめとして、図8に目視外自律飛行の実現に向けたUAVシステムの構造を示す。技術・機能的な側面を青色の枠で、規格・基準的な側面を赤色の枠で囲んだ。

目視外自律飛行の実現に必要な **技術・機能**、**規格・基準等**

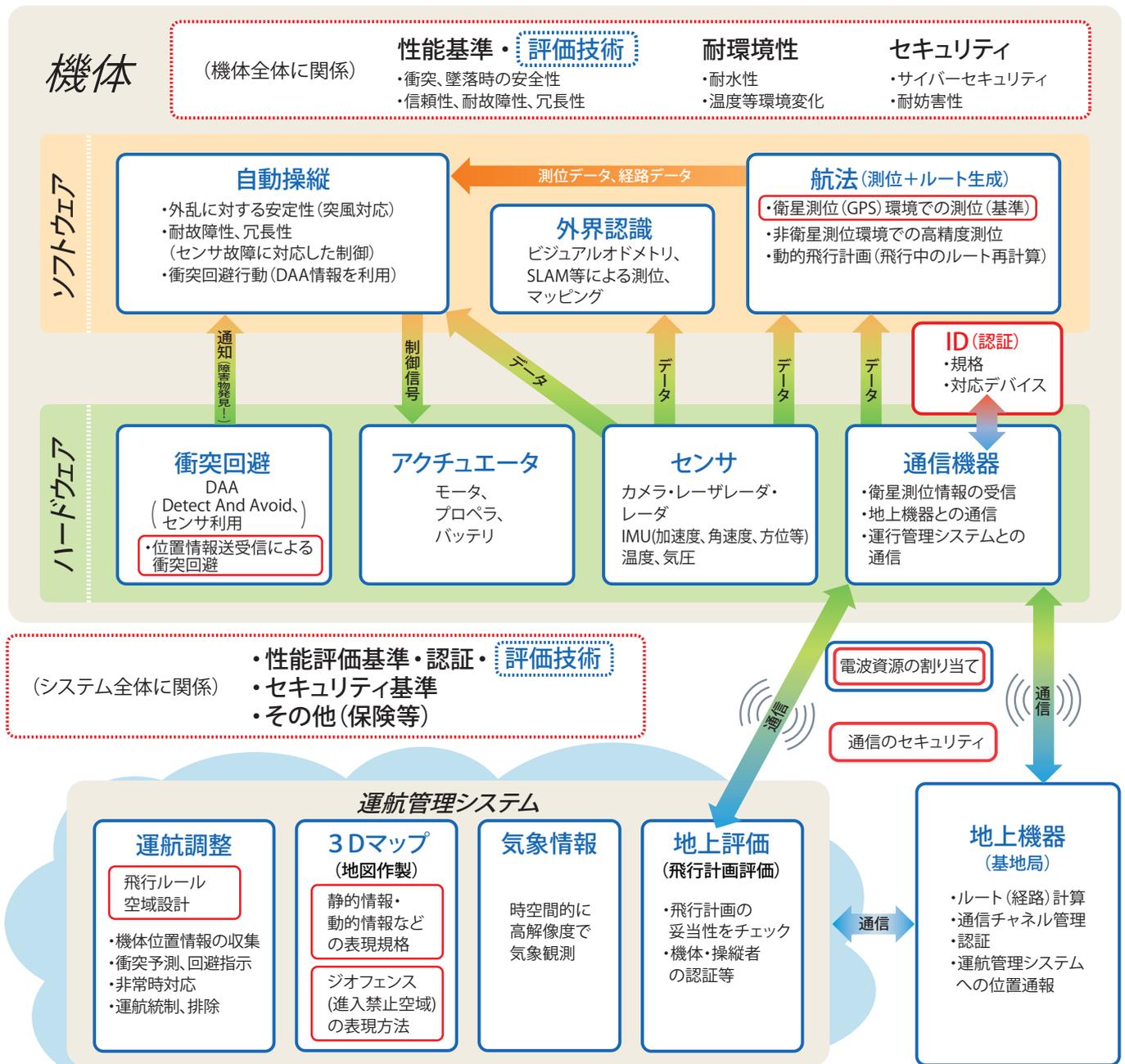


図8 目視外自律飛行の実現に向けた UAV システムの構造

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

4章 おわりに

UAVシステムの産業利用を円滑に進めるためには、目視外自律飛行技術の確立と基準等の環境整備が必要である。

機体側では、アクチュエータ、センサ、制御の各種要素技術を開発するとともに、地上側では、運航管理システム及び安全運航をサポートする3Dマップや気象情報システムを開発する必要がある。また、基準等では、飛行ルールの制定、衝突回避の規格等、安全を担保する環境整備が求められる。

今後、拡大が期待されるサービス市場を発展させるためには、その運用をサポートする基盤システムの開発も必要である。IoT (Internet of Things) や空間情報サービス等と連携することで、さらに効果的なサービス拡大も期待される。

例えば、農業分野においては、すでに市場として存在する農薬散布の用途に加え、作物の生育状況のモニタリング、3次元での気象観測による天候予測、霧や霜などの予測などが考えられる。また、長期的には、サプライチェーンの一部にUAVを用いた効率的な物流システムといったソリューションへの展開により、大きな市場の獲得につながることも期待される。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.17

無人航空機(UAV)システム分野の技術戦略策定に向けて

2017年2月10日発行

TSC Foresight Vol.17 無人航空機(UAV)システム分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター (TSC)

■ センター長 川合 知二

■ センター次長 矢島 秀浩

■ 新領域・融合ユニット

・ユニット長 平井 成興

・統括研究員 松田 成正

・主任研究員 御代川知加大

・研究員 山本 知幸

渡邊 奈月

鎌田 久美

林 茂彦

・フェロー 中島 秀之

東京大学大学院
先端人工知能学教育寄付講座 特任教授
はこだて未来大学 名誉学長

● 本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

● 本書は以下URLよりダウンロードできます。
<http://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。