



ドローン技術の現状と課題および ビジネス最前線

State of the art and issue of drone technology and business frontier

野波 健蔵^{1, 2}

NONAMI Kenzo^{1, 2}

1 千葉大学

1 Chiba University

2 株式会社自律制御システム研究所

2 Autonomous Control Systems Laboratory, Ltd.

本稿では、ドローン産業が高揚期に入ってきたことを述べた後、現状の技術的課題に触れ、量産型国産ドローンであるミニサーバイバーの最新モデルを紹介する。また同機に搭載された非GPS環境下での自律飛行が可能なSLAM技術について紹介していく。そして、完全自律制御飛行のコアとなる3技術（GNC：ガイダンス・ナビゲーション・制御）を説明し、ガイダンスのないナビゲーションと制御のみで飛行している問題点も指摘する。さらに農業、インフラ点検、測量、警備、災害対応の5つの分野で先行してドローンが利活用され、物流分野から始まる空の産業革命など、ビジネスの最前線について述べる。最後に、既存の千葉市ドローン宅配プロジェクトの現状と課題について言及する。

ドローン、ミニサーバイバー、完全自律制御飛行、自律飛行、非GPS環境、SLAM技術、ガイダンス、ナビゲーション、制御システム、国家戦略特区

原稿受理（2016-12-06）

情報管理. 2017, vol. 59, no. 11, p. 755-763. doi: <http://doi.org/10.1241/johokanri.59.755>

1. はじめに

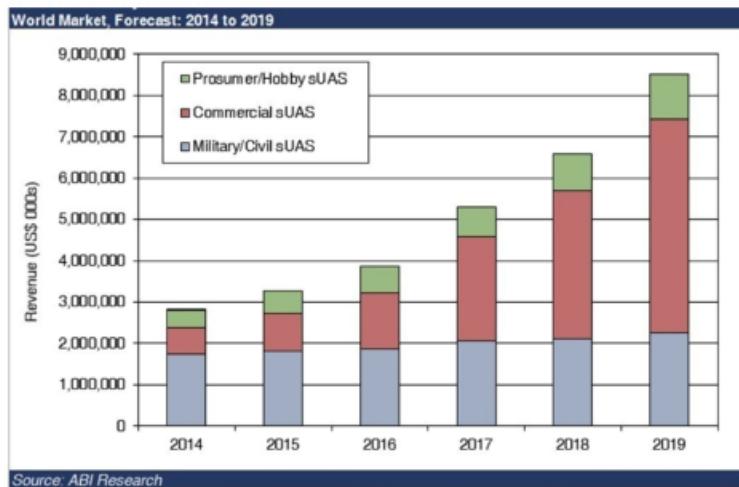
現在、小型無人航空機（ドローン）はホビー用から産業用へと応用分野を拡大しながら、新産業創出として世界的な高揚期に入っている。世界のドローン市場は急速に成長しており、調査会社ABI Researchは、2016年の39億ドルが2019年には90億ドルに達すると予測している¹⁾（図1）。またドイツのDrone Industry Insights社の2016年調査によれば、全世界でドローン産業にかかるベンチャー企業の数は711社（北米54%，ヨーロッパ30%，アジア9%，オセアニアと中東・アフリカが各3%，南米が1%）で、企業規模は平均年数6.5年、従業員数8.3人である。同社は、ドローン産業はこうしたベンチャー企業によって牽引されていると報告している²⁾。

このようなドローンへの期待の高まりには、先進国を中心とする少子高齢化社会における慢性的な労働力不足、そして、人件費高騰による省力化・無人

化の促進と低コスト化、サービスの向上が急務となってきた社会的背景がある。特に、運送系や測量・建設・土木系の分野においては求人倍率が高く深刻な状況に陥っている。こういった背景から、宅配ドローンや3次元測量、インフラ点検、i-Construction^{注1)}などドローンを活用した取り組みが活発になってきた。さらに、3次元空間を自在に飛べない人間にとつて、分身としてのドローンに託すあこがれも小さくない。人が行けない場所での災害調査、生育調査などの精密農業、漁場探索などの漁業分野などにおけるリモートセンシングとしての役割を託すという側面もあり、また、将来は消火活動や高所危険作業などへの応用も期待できる。飛行ロボット・ドローンは無限の可能性を秘めている。

現状の世界のドローンは人に例えると大脳がない小脳のみで飛行しているにすぎないといつても過言ではない。つまり、平衡感覚や運動機能は十分に優れているものの、認識と知能や学習・意思決定能力

世界市場の動向



出典：ABI Researchが公開している2014～2019年までの全世界のドローンマーケット

図1 世界のドローン市場の動向¹⁾

が著しく欠如した状態にあるということである。次世代ドローンは大脳の機能を持った賢いドローンとなるべきであり、こうした進化を遂げて初めて大都会の上空を鳥のように飛行できるものとなる。このためには搭載するコンピューターの処理速度が今の10倍以上になる必要がある。この段階でようやく生物型飛行と呼ぶことができ、本格的なフォーメーション飛行（編隊飛行）、スワーム飛行（群れ飛行）、ビジョンベース飛行（画像処理に基づく飛行）などが自在に実現可能となる。

2. 現状の技術的課題

ドローン自体の現在の技術課題は3つある。1つは非GPS環境下の自律制御という課題で、GPS電波が取れない環境でどのように自律飛行（コンピューター制御された小型無人航空機の飛行）を実現するかである。2つ目は衝突回避、すなわちSense & Avoidという課題で、時速数十kmで高速飛行中、障害物を瞬時に検出して衝突を回避しながら目的地まで飛べるかということである。3つ目は着陸、すなわちピンポイント着陸という課題で、数cmの誤差でどの場所でも着陸可能とする技術が研究されている。これら3つの機能が完全に実装されれば、宅配ドローンをはじめ、現在検討されているドローンアプリケー

ションの技術的課題は、ほぼ解消すると思われる。

ドローン周辺の技術的課題としては、通信技術と飛行管制システム、そして、法律を含むルール策定がある。所管する空域で飛行しているドローンすべてを地上で認識して安全確保を図ることは当然として、第三者の上空での飛行や機体の登録制、免許制の整備など、ドローンを社会実装するための課題が多い。プライバシーの保護や低空飛行時の騒音問題もある。新しい技術の誕生には常にこうした問題が立ちふさがってきた。しかし、人間の英知はこうした課題を克服してきた歴史がある。ドローンもそうなることを確信している。

3. 量産型国産ドローン・ミニサーバイバー ACSL-PF1

2013年11月1日に創業した株式会社自律制御システム研究所（以下、自律研）は、現在、図2に示す産業用新型モデルのミニサーバイバー ACSL-PF1と呼ぶ機体を量産し販売している。この機体には図3に示す純国産の新型オートパイロット AP2を搭載しているが、これが自律研によるドローンの一番の特徴である。日本では自律研が唯一純国産のオートパイロット（自律飛行機能）をドローンに搭載している。ミニサーバイバーの量産体制は確立されており、特別なカス



図2 新型ミニサーバイバー ACSL-PF1



図3 自律研 新型オートパイロット AP2

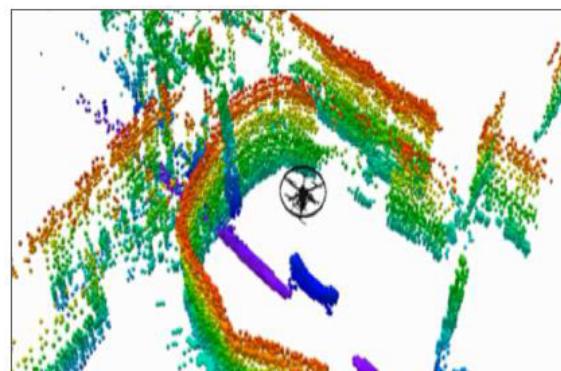
タム化がなければ受注後約1週間で納品可能である。

3.1 非GPS環境下における自律飛行を可能とする技術「SLAM」

現在、世界中の自律飛行型ドローンのほとんどは、GPSに頼って飛行している。しかし、自律研では、GPSが使えない場所でも自律飛行ができる自己位置推定と3次元地図作成技術「SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)」を確立した。非GPS環境下で自律飛行ができるSLAMは世界トップレベルの技術であり、自律研が最も売りとする技術の一つでもある。SLAMを実装したミニサーバイバーは原発事故で人が立ち入れない原子炉建屋内での調査飛行や橋の点検、トンネルの点検、インフラ設備の点検、樹木が生い茂った樹林の中の放射線計測など、さまざまな応用分野で使用可能である。図4はミニサーバイバーが、福島第一原子力発電所5号機内を、機体に搭載したレーザーセンサーから得られる情報を用いたSLAM技術によって、3次元地図を作製しながら調査目的で自律飛行する様子を示している³⁾。機体にはプロペラガードが取り付けられており、図4には、水平スキャナと鉛直スキャンの2つのレーザースキャナーによる3次元地図が描画されている。なお鉛直スキャンによる描画は、ヨー回転がないため鮮明には見えていない。

3.2 機体について

図2に示した新型ミニサーバイバー ACSL-PF1は、正味重量が3.5kgで推奨ペイロード（積載可能重量）が3kgである。飛行時間は10分から25分、水平飛行速

図4 原子炉建屋内の非GPS環境下の自律飛行³⁾

度は10m/秒で、時速36km程度、耐風速は最大15m/秒である（実績値）。6発ローターにしている理由は、基本的にこうした回転翼飛行体は、ロール（エルロン：aileron）、ピッチ（エレベーター：elevator）、ヨー（ラダー：rudder）という3つの角度（角速度）とスロットル（throttle）という上下運動の4つの入力があれば基本的に3次元空間を任意に移動できるからである。したがって、独立したモーターは4つで必要かつ十分である。3つの場合は不可能ではないが、複雑なアルゴリズムが必要となる。モーターが5つあれば1つ止ましても理論的には残りの4つで飛行可能であり、6つあれば2つ止ましても飛行可能であるので、それだけ信頼性が高くなるということである。基本的にこの飛行原理は、プロペラの回転数だけで決まる。従来のヘリコプターは、可変ピッチで、回転中にプロペラのピッチ角を傾けるために非常に複雑なサーボという機構が入っている。最近のドローンは単にモーターにプロペラを付けただけで、減速機も一切使ってないので、瞬発性がある。モーターに電流を流せば一瞬ですぐに高速回転するので、強い風にも突

風にも耐えられるのが特色である。

4. ドローン応用の可能性

しかし、なんといってもドローンの一番の特色は、パワーエレクトロニクスの進化の恩恵により、自身の重量相当のものを運べることである。従来のガソリンエンジンのヘリコプターには不可能だった。乗用車でも自分の重量の2倍のものを運ぶのは大変である。また無人であることから、たとえばAmazonのドローンによる宅配、Prime Airによる試算では、従来8ドルかかったところが1ドルになり、宅配時間も2分の1～4分の1に短縮されるという経済効果が予測されている⁴⁾。

これから人口爆発して発展を遂げるであろうアフリカやインドでは、道路などが未整備でインフラ設備はほとんどない。こうした発展途上の国・地域にとってこそ、ドローンは、インフラを作る必要がなく、地球に優しい低炭素社会に最もふさわしい技術になるだろう。

また、人を運ぶことができるドローンの誕生も時間の問題だといわれている。バッテリーの進化も著しく、1時間飛行可能なものもできてきていている。一方、燃料電池を搭載して飛べば2時間以上飛べることがわかっており、自律研でも高性能ドローン用燃料電池を開発中である。

5. 完全自律制御飛行のための技術 (GNC) の現状と課題

近年、ドローンへの期待と無限の可能性がいっそう拡大しており、ハードウェアやソフトウェアの性能向上も劇的に改善している。特に、飛行前方の障害物を迅速に認識して衝突回避を自律的に行ったり、複雑な環境を認識して飛行経路を自ら生成しながら自律飛行したりするためには、ガイダンス (G)、ナビゲーション (N) および制御システム (C) が重要な役割を果たす。この3要素 (GNC) はドローンの完全自律制御飛行のためのコアソフトウェア技術であり、ドローンの自律飛行における頭脳部として今後急速に進化を遂げていくものと思われる。特に、物流・宅配ドローンにみられるように自律制御飛行のレベルが高度化して目視外飛行かつ長距離飛行となると、GNCが決定的にドローンの性能を決めることがある。以下、GNCの3要素について図5を用いて説明する⁵⁾。図5はガイダンス、ナビゲーションおよび制御システムの関係を模式的に示したものである。

5.1 ガイダンスシステム

ドローンにおけるガイダンスシステム (GS) は人間に例えると大脳の役割に似ており、認識と知能・判断を担う。複雑な未知環境においても障害物を検出して衝突回避をしながらドローンのリアルタイムの目標軌道を決めて自律飛行する、いわゆるreal time path planning (実時間軌道計画) を実行する。もし機体に異常が発生した場合は、飛行継続が可能かどうか

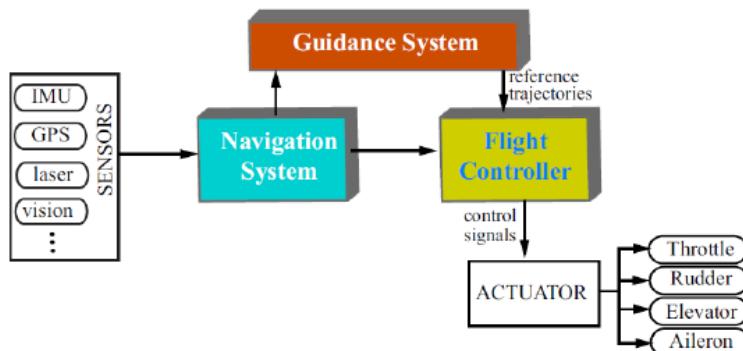


図5 ガイダンス、ナビゲーションおよび制御システムの関係⁵⁾



うかを判断し、困難という結論であれば、安全な場所を探査しながら地上に帰還するというミッションも含まれるため、このreal time path planningは高度で瞬時の判断を伴う中級から上級レベルの自律飛行に該当する。

図6はreal time path planningの一例を示している⁵⁾。図6は複雑な起伏のある斜面に沿って地表から一定距離を保持しながら飛行するミッションで、山岳地帯での遭難者捜索では必須となる飛行方法である。有人航空機ではパイロットが担う高度な技術であるが、ドローンではすべてコンピューターが逐次変化する3次元空間を認識して飛行経路と高度などを瞬時に決定していく必要がある。当然ながら3次元空間の認識はクラウド等のコンピューターの処理速度にも大きく依存するために、自律制御のレベルは制約を受けることになる。今後は人工知能（AI）なども実装されていくだろう。現在のドローンにおけるガイダンスはいまだ低レベルであるが、今後飛躍的に進化を遂げることが期待されている。

5.2 ナビゲーションシステム

ナビゲーションシステム（NS）は図5のようにIMU、GPS、レーザー、ビジョンなどのさまざまなセンサーデータからカルマンフィルター等を用いて自己位置推定を行い、そのデータを制御システム（Flight Controller）に伝える重要な役割を担っている。現在の多くの自律飛行可能なドローンは、ガイダンスシステムのない、ナビゲーションシステムと制御シ

ステムの2つのシステムにより、Waypoint飛行と呼ばれる、あらかじめ経路を設定した飛行計画に基づく初級・中級的な自律飛行を実現しているといえる。ガイダンスが人間の大脳であれば、ナビゲーションと制御は人間の小脳に相当し、平衡感覚や運動機能を担っている。回転翼ドローンが空中の1点に静止するホバリング制御は人が直立不動の姿勢を取ることと同レベルで、平衡感覚と運動機能を発揮した高精度姿勢制御と位置制御ということになる。先進的なナビゲーションシステムではレーザーライダー、レーザーレンジファインダー、超音波センサー、赤外線センサー、シングルカメラ、ステレオカメラ、3Dカメラ、ビジョンチップなどを搭載して冗長化させ、マッピングや障害物検出を行い、自己位置推定の精度を上げている。

5.3 制御システム

制御システムは、ガイダンスシステムから指示されるさまざまな目標値や命令と、ナビゲーションシステムから伝送される現在の機体の位置や飛行速度、姿勢などを基に、4つの制御信号を決めてロール（エルロン）、ピッチ（エレベーター）、ヨー（ラダー）それぞれの角速度、およびスロットルを制御する。制御システムにはモデルベース制御とモデルフリー制御があり、モデルベース制御では、古典制御はもちろん、現代制御、ロバスト制御、適応制御、非線形制御など高度な制御理論を実装して飛行性能を向上することが可能である。一方、モデルフリー制御

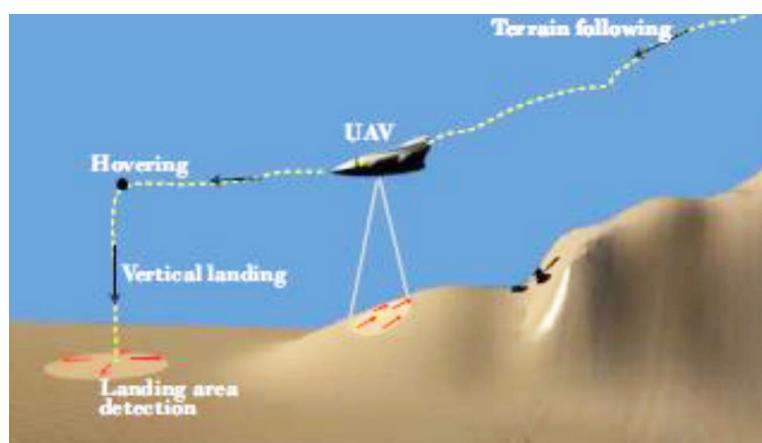


図6 real time path planning（実時間軌道計画）の自律飛行⁵⁾

はニューラルネットワークやファジー理論、そして、最近の人工知能まで、さまざまなアプローチがある。

6. ドローンビジネスの現状と千葉市ドローン宅配プロジェクト

では、日本における既存のドローンビジネス市場についてみていきたい。

6.1 精密農業への応用

既存市場には、ヤマハ発動機製ドローンのRMAXが活躍している農業がある。稲作はドローンで農薬散布されることが普通になりつつあるが、小型のマルチコプター型ドローンの登場で、いっそう普及が進むと考えられる。特に、図7に示すようにドローンにハイパースペクトルカメラ等を搭載して葉緑素比率、水分ストレスなどの生育調査および病害虫や雑草発生状況調査を行い、クラウドで管理することで、低コスト化、高品質化、収穫量増加を図るという先端的農業が実施されている。図7は新潟市、NTTドコモ、ベジタリア、自律研が国家戦略特区として取り組んでいる革新的農業プロジェクト（「水稻プロジェクト」（2016年9月21日～2018年3月31日予定）を図説したものである。さらに、畑作、畜産、果樹園、林業、水産業等の分野でもドローンが活用されていくと予

測されている。

6.2 インフラ点検および測量分野

そして、最も大きな市場になると期待されているのがインフラ点検と測量分野である。9名が亡くなった2012年の笹子トンネル天井板落下事故を契機として法律が改正され、70万橋の橋とトンネル1万本、これを5年に1回必ず点検して、国に報告書を提出することが義務づけられた。超高齢社会の日本において技術者不足が深刻になっている中で、国は成長戦略としてのドローンの社会実装を推進しようとしている。これが大きなモチベーションになって、ドローンが新たにインフラ点検で普及するのではないかと期待されている。さらに、道路に関しては高速道路総延長距離9万kmの点検、それから法面斜面の点検^{のりめん}33万か所、河川の点検は1級河川・109河川、2級河川・7,084河川が点検対象である⁶⁾。

インフラ以外の設備点検では、製鉄所がある。会社として4企業18製鉄所、100事業所で主に配管と煙突の点検を行っている。また、コンビナートの点検、液化天然ガス等のタンクの点検等がある。電力設備としての58発電所、ダムも3,000基、メガソーラー60GWの点検、携帯電話の基地局58万か所、将来的にはパトカー4万5,000台、消防車2万5,000台に1機ぐらいたずつ搭載することになると思われる。このよう



出典：新潟市革新的農業実践特区：日本農業の改革拠点へ <https://www.city.niigata.lg.jp/shisei/seisaku/kokkakotoku/tokku/index.files/tokku-pamohlet1.pdf>

図7 新潟市の革新的農業プロジェクト



に、インフラや非常に重要な設備の点検、あるいは安心安全、特に防災・減災への活用と警備への適用が、最も急がれているドローンの応用分野である。図8は以上述べた内容を国内市場動向としてまとめたものである。このように、今後は整備・点検、災害調査、測量、警備などの4つの分野が、新たな大きいドローン市場となることが期待されている。

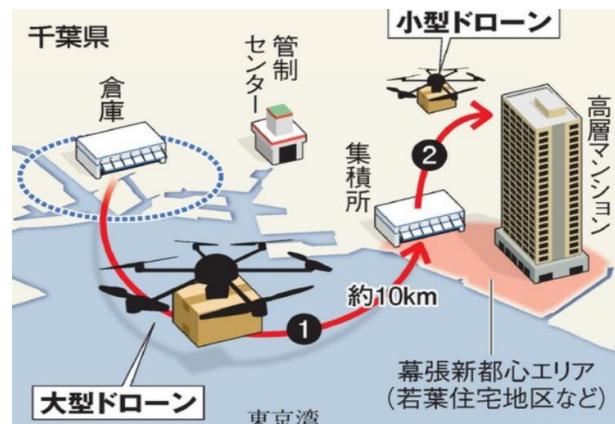
6.3 空の産業革命

さらに法整備がなされると、ドローンの応用分野はいよいよ運送や宅配の分野に広がっていき、「空の産業革命」といわれる時代が始まる。内閣府の国家戦略特区は現在10か所であるが、この内で内閣府内にドローン宅配等分科会が設置されているのは、千葉市の戦略特区のみである。本特区では都市部でのドローン宅配を想定して国が強力に支援しながら、遅くとも2019年ころには、世界に先駆けてドローンによる高層マンションのベランダへの宅配を実施する計画である。図9は千葉市が内閣府に提案した特区構想を示したもので、市川市にある物流拠点から千葉市美浜区若葉住宅地区（幕張新都心内）に完成予定の50階建て高層マンション6棟への宅配をドローンで行うというドローンシティ構想である。市川市から美浜区までは東京湾上空の飛行と花見川上空を遡上するため、安全上の問題は少なく、高層マンションエリアでは、飛行ルート下に人がいない緑地帯での飛行とする計画である。マンションにはドローン

ポーチが設置されており、離着陸ができる。ここでは千葉市幕張新都心に拠点を構えている自律研の国産ドローン・ミニサーバイバーが活躍する予定である。すでに千葉市、楽天、NTTドコモ、自律研を中心企業約20社と技術検討会を毎月実施し、実証試験を行っている。現在はスマートフォンによる注文システム、LTE通信網による楽天本社からの遠隔での飛行制御、複数機飛行用のドローン管制システムも完成している。表1に千葉市ドローン宅配等分科会技術検討会の研究開発ロードマップを示す。

6.4 実証試験で明るみになる諸課題

実証試験を進めていく中での課題も多い。特に最も大きな課題は「第三者上空の飛行許可」である。現状のルールでは航空法施行規則第236条の2によつて、飛行の禁止空域が指定されており、人口密集地

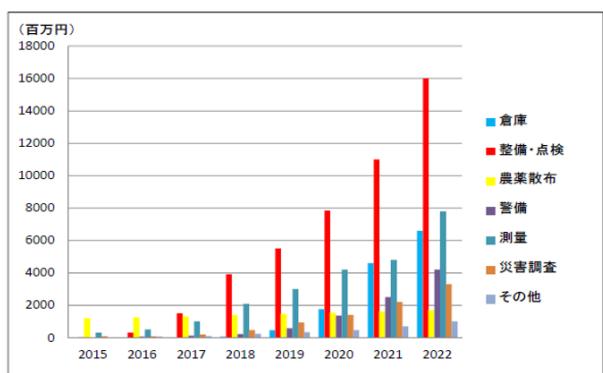


出典：朝日新聞社 2016年4月6日付 朝刊, p. 35 <http://www.asahi.com/shimbun/nie/kiji/20160421/>

図9 千葉市のドローン宅配構想（東京湾上空飛行）

表1 千葉市ドローン宅配等分科会技術検討会
研究開発ロードマップ

	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
システム起動レベル	1機飛行	長距離水平 短距離垂直 毎月1回			
システム展開レベル		同一方向 長距離水平 短距離垂直 毎月1回			
システム成熟レベル		多数機飛行	対面飛行 長距離水平 短距離垂直 ベランダ着	毎月1回	
システム完成レベル			毎月1回	多数機飛行 ベランダに荷物を下ろす試験	
システム普及レベル				ビジネス開始	



出典：産業無人機の現状と用途別市場動向、シードプランニング、2015年4月3日
※表示色については、Web版を参照されたい。

図8 新たなドローン利活用が期待される主要分野

域はもちろん、地上および水上の人および物件の安全が損なわれるおそれがある場合は国土交通大臣の許可が必要となっている。技術検討会では東京湾上空を飛行するにあたって、漁協をはじめ海上保安庁、大型船舶など関係団体の了解を取得して飛行しているのが実情である。しかし、この作業が毎回大変な状況になっているため、ドローン側にもパラシュートのような安全対策を実装することを条件に、「第三者上空の飛行許可」に関する規制の緩和を内閣府に依頼している。技術のハードルよりも法整備のハードルの方が高いというのが実情である。

7. おわりに

地上から300mまでの、いわば最後のフロンティア。この空間は鳥と電波しか飛んでいない未開のエリアであり、この領域にドローンが飛ぶことで、われわれのライフスタイルが革新的に変わろうとして

いる。近くで遠い世界であった最後の未開の空間をドローンにより有効活用することで、われわれの生活は真に3次元的生活様式に変遷する。地上には自動運転の車両が走行し、300m以上の空間は有人航空機が飛行し、そして、地上から150mまでの空間に多くのドローンが自律飛行する時代がもうそこまで来ている。myドローンで会社に出かける日もやって来るに違いない。

野波 健蔵 (のなみ けんぞう)

1979年東京都立大学大学院 工学研究科博士課程修了。1985年米航空宇宙局（NASA）研究員・シニア研究員、1994年千葉大学教授、2008年千葉大学理事・副学長（研究担当）を経て、2012年ミニサペイヤーコンソーシアム会長、2013年（株）自律制御システム研究所代表取締役CEO、2014年千葉大学特別教授。2010年「Autonomous Flying Robots」をSpringer社から出版。

本文の注

- 注1) 国土交通省では、「ICTの全面的な活用（ICT土工）」等の施策を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図っている。i-Construction：http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000028.html

参考文献

- 1) Thompson, Cadie. "Here's where the real money is in drones". CNBS. <http://www.cnbc.com/2015/05/13/heres-where-the-real-money-is-in-drones.html>, (accessed 2016-11-29).
- 2) "The drone market environment map 2016". DRONEII. COM. <https://www.droneii.com/drone-market-environment-map-2016>, (accessed 2016-11-29).
- 3) 株式会社自律制御システム研究所. パンフレット：空の産業革命を中核で担う. 2016.
- 4) Keeney, Tasha, "Amazon Drones Could Deliver a Package in Under Thirty Minutes for One Dollar". ARK INVEST, 2015-12-01. <https://ark-invest.com/research/amazon-drone-delivery>, (accessed 2017-01-05).
- 5) Nonami, Kenzo; Kendoul, Farid; Suzuki, Satoshi; Wang, Wei; Nakazawa, Daisuke. Autonomous Flying Robots. Springer, 2010, 329p.
- 6) "産業用無人飛行機・ヘリコプターの市場予測". 2015-04-15. SEED PLANNING. <https://www.seedplanning.co.jp/press/2015/2015041501.html>, (accessed 2016-11-29).



Author Abstract

We explain how drone market's been growing as well as its current technical problems. Then we introduce the newest model of Mini-surveyor along with SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), the autonomous control technology for non-GPS environment, loaded in this Mini-surveyor. We also describe the strengths of three technologies which enable flight management method of ultimate autonomous control as well as their weaknesses, the latter is that they can only help to fly with navigation and control system, with no guidance. We mention that drone technologies are antecedently applied in such five fields as the agriculture area, inspection of infrastructure, survey, security and the disaster area. We also analyse the business fields' landscape, siting the example that logistics field could initiate industrial revolution in the sky. We conclude this article by depicting the current status and the problem of Chiba Drone City project, the ongoing program of drone home delivery.

Key words

drones, Mini-surveyor, fully autonomous controlled flight, autonomous flight, non-GPS environment, SLAM technology, guidance, navigation, control system, national strategic economic zone