特集A

新
映像
音響
体験

第1章：UAVによる空撮

第2章：全天周撮影

第3章：タイムラプス/微速度撮影

第4章：全天周視聴覚併用複合現実空間 X-Media Galaxy

第5章：路面の振動を再現するVRスケートボード "VibroSkate"

「映像を鑑賞する」と言えば、家庭でテレビを見たり映画館で映画を鑑賞したりすること、あるいはスマートフォンで動画配信を楽しむことを頭に思い浮かべる方が多いでしょう。また「音楽を楽しむ」と言えば、レコードやCDに始まり、携帯型音楽プレーヤーやスマートフォンでいつでもどこでもMP3などを聴ける環境を指しています。通勤通学時に音楽を聴き、空いた時間にオンラインで配信される動画を見る、という読者の方も多いと思います。

しかし、スマートフォンやタブレットの登場により、いつでもどこでも映像や音楽を楽しむことができるようになっただけでなく、一人一人がクリエイターとなってコンテンツを制作・配信できるようにもなりました。センサ情報が簡単に取得でき、カメラやマイクの性能が向上した結果、従来の概念には囚われない斬新なアイデアやテクニックを用いて高品位なコンテンツを制作し、今までにない映像と音楽が創り出せるようになっています。

今回は、このようなコンテンツ制作やコンテンツ視聴の場に起きている進化に着目し、5つのトピックで特集を企画しました。各分野の専門家や第一人者の方に、使用機材、制作技法、制作現場の様子等について解説していただきます。

今回は、誌面の都合により5つのトピックに限定しました。しかし、コンテンツの制作や視聴における進化はこれだけにとどまりません。今後、この特集記事の枠にはとらわれない新たな映像音響体験が生み出されることを期待しています。

本特集の企画は、佐々木久幸、青木工太両編集幹事ならびに私が担当しました。

前編集幹事 高橋修一

特集A 新映像音響体験

1章 UAVによる空撮

野波 健蔵†

キーワード：小型無人航空機（UAV）、ドローン、空撮、自律飛行

1. まえがき

今、世界中で急速に利活用が拡大しているUAV¹⁾はマルチロータヘリコプタと呼ばれる回転翼型UAVで、ドローンとも呼ばれている。2010年に第1次ドローンブームが到来し、スマートホンで制御できるカメラ付きのフランス製ARドローンが登場したことに始まる。第2次ブームは2012年に始まり、中国製PHATOMシリーズのドローンでGPS電波を受信して自律飛行ができる空撮用高性能ドローンが爆発的に広がり、すでに世界で100万機が普及していると言われている。そして2015年は産業応用ドローン元年と呼ばれ、これまでのホビー用から業務用に転換してドローンがさまざまなビジネス分野に導入されていくと言われ、ドローンの進化は近い将来、物流システムを変えると予測されている²⁾。自動車、コンピュータ、インターネットと新しい技術の誕生で私達のライフスタイルは劇的に変わってきた。そして、次の技術革新はドローンと言われている。これから10年の間に飛躍的進化を遂げて、ドローンは社会に根付き、さまざまな分野でドローンが活用され、その究極は宅配をドローンが行ったり、人もドローンタクシーが搬送する時代がやってくることも予測されている。

マルチロータヘリのドローンの技術的特徴は、強力なブラシレスモータの性能によって機体重量の正味2倍程度の荷物を運ぶことができること、構造が対称であることから風外乱に対する強いロバスト性を有すること、バッテリー・モータ駆動により高効率であるため応答性が優れていることなどであり、従来型のシングルロータヘリを越える優れた利点がある。一方で、飛行時間が短いこと、飛行速度が遅いこと、搭載可能荷物の重量であるペイロードが小さいこと、騒音が大きいことなどの欠点もある。これらの諸問題は、自動車の進化がそうであったように、この10年間の進化でほとんどが解決されていくと思われる。本稿では、まず自律飛行型UAVミニサーベイヤーの飛行原理をはじめとしてその仕組みを紹介する。ミニサーベイヤーのコア

技術であるオートパイロットは純国産で、かつ、現在量産化を行っている。つぎに、GPS環境下での空撮および3次元マッピングについて述べる。とくに、ここでは埼玉県秩父市にある浦山ダムの空撮による3次元復元図を紹介する。

2. マルチロータヘリ・量産機ミニサーベイヤーについて

千葉大発ベンチャー企業の自律制御システム研究所で量産化している純国産オートパイロットのミニサーベイヤー機体MS-06LAを図1に示す。機体は6個のモータ・プロペラを有している。マルチロータは4枚プロペラが一般的には最小で、6枚、8枚とプロペラ数は多くなる。同一平面配置を考えるとプロペラ数が増えるほどその分、機体直径は大きくなるが、一方で、プロペラが破損しても残りのプロペラで飛行が継続できる。筆者らはサイズを小さくして、かつ、冗長性を有する6枚プロペラを量産している。プロペラを含んだ最大直径は100 cm、機体重量は3 kg、ペイロードは6 kgで飛行時間は15分～30分で搭載ペイロードや風外乱などで影響を受ける。

筆者は、マニュアル操縦が極めて難しい小型ラジコンヘリを、人が一切操縦する必要のない完全自律型ヘリに進化

図1 純国産量産機ミニサーベイヤーMS-06LA

† 千葉大学/株式会社自律制御システム研究所
"Aerial Photos by Means of UAV" by Kenzo Nonami (Chiba University/
Autonomous Control Systems Laboratory, Chiba)

1. UAVによる空撮

図2 自律制御系の基本構造

図4 マルチロータヘリのエルロン・ラダー・エレベータと姿勢制御

図3 航空機のエルロン・ラダー・エレベータ

させるための研究を始めて約20年ほどになる。2001年に小型RCヘリであるシングルロータヘリの自律制御に成功した後、2005年頃からマルチロータヘリの自律制御の研究を開始した。マルチロータヘリの研究開発が本格的に始まったのは世界的にはほぼ同時期で、2004年～2005年頃である。

マルチロータヘリの自律制御の仕組みを述べる。図2は基本構造である。通常ラジコンヘリと呼ばれる機体は図2の下位制御系のみが実装された機体で、ジャイロセンサを介してロール、ピッチ、ヨーの3軸ジャイロフィードバックと呼ばれる角速度フィードバックが構成されている。このジャイロフィードバックがなければマニュアル飛行さえできなくなる。プロポからの無線操縦コマンドをRCレシーバで受信して、図3の航空機の操縦用語であるエルロン（ロール）、エレベータ（ピッチ）、ラダー（ヨー）、という操縦を、プロペラの回転数の増減で姿勢制御している。図4はマルチロータヘリに適用した場合の回転数制御の状態を示す。図で矢印の大きさは回転数の大きさを意味している。人の操縦は機体の傾きを目で見ながら制御するが、自律制御は慣性センサのIMUから得られる3軸姿勢角度から、目標値に追従する制御コマンドをマイコンが演算する。マルチロータヘリはモータにプロペラが直接固定されて、回転数の制御の

図5 ミニサーベイヤーのオートパイロット

みで姿勢を変化させる。このようにシングルロータヘリが可変ピッチに対して、マルチロータヘリのプロペラピッチ角は変化しない固定ピッチである。IMUを中心に姿勢演算されたデータを用いて姿勢制御が自律的になされる場合、このモードを姿勢アシスト型マニュアルモード（姿勢自律型）と呼ぶ。また、図4(d)はロータの回転方向が三つは時計方向、残り三つは反時計方向とすることで、回転モーメントを打ち消している。このことで従来型ヘリのテールロータをなくしてサイズを小さくしている。

一方、GPS信号により機体の位置や速度が得られる場合はウェイポイント飛行型自律モード（完全自律型）と呼ぶ。ただし、GPSの鉛直方向は水平方向と比べて精度が劣化しているため、精度向上のために気圧計を用いる。図5は純国産ミニサーベイヤーのオートパイロットを示している。

オートパイロットはマルチロータヘリの最も重要な心臓部で、ラジコンヘリと自律型ヘリの大きな違いがこのオートパイロットにある。指定された軌道を自動離着陸も含め

図6 量産機ミニサーバイヤーMS-06LAの制御系構造

てまったく人が操縦することなく飛行できるという特徴がある。とくに標準機能として、バッテリー残量の低下、無線途絶、異常検知の際には自動帰還モードとなり離陸地点に戻る機能や、モータ駆動用ドライバであるESCの使用時間を積算して安全性を高めている機能、フライトレコーダですべての飛行データを記録するなど安全性に配慮した設計となっている。オートパイロットは3層からなっており、最下層が電源ボード、中間層がコンピュータボード、最上層がセンサボードである。

図6は下位制御系と上位制御系および完全自律系と姿勢自律系、さらに、エルロン、エレベータ、ラダー、スロットル等について説明している。図からジャイロフィードバックの角速度制御が最も内側のインナーループを構成して、その外側に姿勢制御系、速度制御系、位置制御系と合計4重のフィードバックループが構成されている。

以上から、マルチロータヘリへの制御入力にはエルロン、エレベータ、ラダー、スロットルの4つであるため、図6のミキサーによる演算で4つの制御入力に対する6つのモータへの回転数指令値の配分を決定している。4つのモータであれば、4つの制御入力と1対1に対応する。図から明らかなように、完全自律飛行時にはウェイトポイントマネージャで、飛行経路、飛行高度、飛行速度が与えられると、図6の信号流れ図にしたがって、位置制御器、速度制御器、姿勢制御器、角速度制御器の4つの目標値が自動的に決められ、さらに、ミキサーを介して6個のモータへの回転数目標値が決められていく構造になっている。そして、

与えられた目標値との誤差を4つの制御器で瞬時に修正してために、高精度な目標値追従制御が実現される。

3. 回転翼UAVによる空撮から3次元マッピングへ

マルチロータヘリが最も得意とするミッションはホバリングしながらの空撮であり、人が近づけない高所での目視点検に代わって近接距離からの空撮映像の取得と保存および地上への伝送である。さらに取得した写真から高精度な3次元立体図を作成することもビッグデータの管理に適している。機体には、2軸ジンバル、小型デジタル一眼カメラ、赤外線LED(制御装置からリモコン信号生成用)が搭載されている。図7はミニサーバイヤー機での空撮シャッタ信号のコマンドの流れを示す。ヘリ機体の揺動は

図7 空撮とカメラ撮影の信号流れ

1. UAVによる空撮

図10 浦山ダム上空から空撮した写真

図8 空撮のイメージ

図11 埼玉県秩父市浦山ダム遠景

図9 浦山ダム上空から空撮中のミニサーベイヤー

図12 3次元復元図のダム下流拡大図

すべて2軸ジンバルで補正し、カメラは常に水平を維持している。図8は空撮のイメージで高所点検用のミッションはこのようにして実施する。得られた写真データを写真解析ソフトにより3次元復元図を作成する。

図9は埼玉県浦山ダム上空180mを空撮飛行するミニサーベイヤーを、図10は空撮した写真の一部を示す。図11は浦山ダム全景で、図12は3次元復元図の拡大図である。図12の精度は5cm程度の誤差で、図13、図14は3次元復元図

の視点を任意の視点から自在に見ることができることを示している。このように空撮による測量と3次元復元は今後

図13 浦山ダム3次元復元全体図1

図15 空撮による浦山ダムのコンクリート壁面

図14 浦山ダム3次元復元全体図2

図16 図15の空撮壁面写真の損傷部を拡大

広く普及すると思われる。図15はこの浦山ダムのコンクリート壁面をミニサーバイヤーで撮影した写真で、図16は図15の壁面写真の損傷部を拡大した写真である。これは空撮した後に写真をズームで拡大したもので、損傷部を鮮明に見ることができる。図17は静岡県にある浜名大橋全景で、図18は上り線と下り線の間の奥まった空間をプロペラガード付きミニサーバイヤーが飛行しながら空撮をしている様子を示す。

図10で取得した静止画をもとに3次元マッピングを行い、拡大した図が図12である。川面のさざ波まで細やかに再現されていることがわかる。また、図13、図14のような3次元復元図は図15、図16のコンクリート壁面点検画像の位置特定に用いられる。すなわち、図13や図14のコンクリート壁面を格子状に分割して番号を付し、取得した画像をこのナンバリングした場所に対応して番号化していくことで、ビッグデータの管理ができる。図17や図18も同様である。ただし、図18は非GPS環境下での自律飛行で

あるために、特殊な3D-SLAM (Simultaneous Localization and Mapping: 自己位置推定と3次元マッピング) 技術を適用している。図12で、高度180 mの高さから撮影した120枚程度の写真を特徴点マッチングの手法により、高精度に3次元復元を行い、再構築した図が見事に細やかな川面の波を再現していることは驚異的である。また、図16はコンクリート壁面から約10 m離れた位置から撮影した写真であるが、これも人の近接目視と同等であり、人に代わった点検手法として十分に活用できるものと考えられる。

筆者らは福島第一原発事故の原子炉建屋内を飛行ロボットで調査するため、3D-SLAM技術を実用レベルまで開発して、福島第一原子力発電所5号機で実証試験に成功した。飛行エリアはすべて非GPS環境下であるため、3D-SLAM飛行を行いながら、FPV (First Person View) による管制室からの遠隔操縦で建屋屋内を飛行した。この技術を図18の飛行では利用している。

1. UAVによる空撮

図17 ミニサーベイヤーで空撮した浜名大橋

図18 浜名大橋上り線と下り線間コンクリート壁面空撮

4. むすび

ラジコンヘリは飛行すること自体を楽しむものであるが、最近のドローンは空撮を楽しむことで、ホビーを中心に世界的に大ヒットしてきた。最初からカメラが搭載されているというのが最近のドローンの標準機である。そして、これまで撮影が難しいとされてきた映像や写真がドローンを介して容易に見ることができるようになった。これは1つのイノベーションである。今後はホビー用から業務用に大きく舵が切られて、飛躍的に普及するドローン時代幕開きの離陸寸前とも言われている。ドローンが今後どのように進化しようと、空撮を最も得意としていることに変わりはない。今後は空撮のみから「空撮＋X」となり、Xが無数の可能性を持っているというのがシンクタンク等の未来予測やビジネス分野から熱い注目を浴びている所以である。

一方、学術分野でも同様な指摘がなされている。IEEE Robotics & Automation Magazineに掲載された論文³⁾では、現存するロボットを複雑性と融通性という2つのキーワードで分析し、マルチロータヘリは複雑性について

は極めて単純構造で、融通性は最も適応力や多様な応用があるとして、最高レベルのロボットと位置づけている。現在、マルチロータヘリが世界で急速に広がりを見せているのは、このことが理由でもある。(2015年7月5日受付)

【文 献】

- 1) K. Nonami, et al: "Autonomous Flying Robots", Springer (2010)
- 2) AUVSI: "The Economic Impact of Unmanned Aircraft Systems Integration in the United States" (Mar. 2013)
- 3) C. Nie, X.P. Corch and M. Spenko: "Versatility and Complexity in Mobil Robot Locomotion", IEEE Robotics & Automation Magazine, 24, 4 (2013)

野波 健蔵 1979年、東京都立大学大学院博士課程修了。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。1998年から、ドローンの研究開発を開始し、2001年、日本で最初に小型無人ヘリの完全自律制御に成功。2012年、ミニサーベイヤーコンソーシアム会長。2013年、国際知的無人システム学会会長。2013年、大学発ベンチャー(株)自律制御システム研究所代表取締役。2014年、千葉大学特別教授となり、現在に至る。