解 説

エンジンドローンの開発

Development of Combustion-Engine-Driven Drones

中 村 幹 男^{*1} 大 橋 俊 夫^{*2*3} 市 川 純 章^{*3*4} 喜 多 一^{*3*5} 岩 瀬 将 美^{*6}^{*1}中村クリエイティブエンジニアリング ^{*2}インダストリーネットワーク (株) ^{*3}諏訪産業集積研究センター ^{*4}諏訪東京理科大 ^{*5}京都大学 ^{*6}東京電機大学Mikio Nakamura^{*1}, Toshio Ohashi^{*2*3}, Sumiaki Ichikawa^{*3*4}, Hajime Kita^{*3*5} and Masami Iwase^{*6}^{*1}Nakamura Create Engineering ^{*2}Industry Network Co. Ltd. ^{*3}SIARC (Suwa Industry Accumulation Research Center)^{*4}Tokyo University of Science, SUWA ^{*5}Kyoto University ^{*6}Tokyo Denki University

1. は じ め に

近年, 4 軸式電動ドローンの有効性やビジネスや産業面での様々な可能性が話題となり世界的なブームとなっている。誰もが簡単に購入でき操縦も簡単になるなどして個人のホビーだけではなく産業界にも影響を広く及ぼし始めている反面, 犯罪など様々な問題も起きている。しかし欧米や中国を中心とした産業化, ビジネス化への流れは今後も衰えることなく進んでいくであろう。また, 軍事用等を中心とした無人機や無人ヘリにおいては, イスラエルやカナダ, アメリカ, 欧州が潤沢な軍事開発費用を背景にして, 大小様々でエンジンや電動など機能も多様な多くの機体を開発しており, 自国以外の市場に対しても軍事や防災・レスキュー等の需要に向けて販売している。

一方日本においては, この4軸式電動ドローンの産業化・ビジネス化の流れには多少乗り遅れてしまった感はある。しかし, 例えば20年以上前からヤマハ発動機が農業散布用のヘリコプタを開発し[1], すでに国内を中心に数千機が実用に供されており, ホビー用ラジコンヘリの分野では国際的にみても実に多くの機体が開発, 販売されている。最近でこそホビー用ラジコンヘリの分野では台湾や中国の製品が世界の市場をとっており, 特に4軸式電動ドローンにおいては中国製とアメリカ製が世界的に市場を席巻しているが, 産業用分野を中心として実は日本も無人航空機分野での開発や販売では海外に劣らない実績を持っている。

2. 電動ドローンの普及と課題

これら無人機がホビーや産業, 軍事用等にここ数年で急速に市場を拡大した理由は, 主としてリチウムポリマー電池やモータの小型高性能化, それらの制御技術のイノベーションにあるといえる。鉛蓄電池に比べ長時間飛行できかつ軽量の機体を可能とするリチウムポリマー電池とそれを使った小型モータの登場で, これまではエンジンによる機体でないで飛行できないと思われていたこれらの小型無人機がいくとも簡単に飛行できるようになった。これらの部品の多くが中国・アジアで生産され安価に入手できるようになったのも大きな理由の一つである。

さらに制御に関しても近年, Arduino など安価で高性能なマイコンの登場があり, その制御においてもアルドコプター (ArduCopter [2]) と言われるオープンソースの制御ソフトにより, 機体の制御と飛行に必要なプログラムを無料に近い状態で入手できる。このように日々技術進化するなどが理由に挙げられる。これらの制御系は, 主に欧米で発展・進化しており現在はこの欧米を中心としたオープンソースプログラムと, 中国のあるメーカーがほぼ単独で担っている独自プログラムが世界のこの手の無人機の制御をほぼ独占していると言ってよい。

これらの制御系が簡単に入手でき, 制御に必要なハードウェアもベンチャー企業が開発, ネット販売を行っていることから, 4 軸 (多軸) 電動ドローンの機体そのものは, モータとバッテリーと当該の制御用ハードおよびソフトを入手し, それらを搭載する簡易なフレームさえ作ればよく, 製造販売ビジネスへは比較的簡単に参入できる状況にある。この数年でも世界各国から4軸 (多軸) 電動ドローンの製造販売メーカーが雨後の筈のごとく登場し, 最近では乱立といえるほどの様相を呈している。

そのため今に至るまで電動モータやリチウムポリマー電池を搭載しオープンソースの制御系やハード, あるいは中国製の制御装置を搭載した4軸 (多軸) 電動ドローンというよくある形式に大きな変化は見られず, さほど大きな性能上の進化や発展も起きていない。たくさん生まれ出た4

原稿受付 2016 年 1 月 12 日

キーワード: Drone, Multicopter, Variable-pitch Rotor

^{*1}〒399-4501 伊那市西箕輪 7200-23^{*2}〒394-0033 岡谷市南宮 1-1-15^{*3}〒394-0033 岡谷市南宮 1-1-15^{*4}〒391-0292 茅野市豊平 5000-1^{*5}〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町^{*6}〒120-8551 足立区千住旭町 5^{*1}Ina-shi, Nagano^{*2}Okaya-shi, Nagano^{*3}Okaya-shi, Nagano^{*4}Chino-shi, Nagano^{*5}Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto^{*6}Adachi-ku, Tokyo

図 1 4 軸エンジンヘリコプタ

軸（多軸）電動ドローンのベンチャー企業は他社との差別化に苦しんでおり、最近ではニーズ側を巻き込みながらアプリケーション開発を捉えることでプラットフォームを担うビジネスに変化しているようにも見える。今後も電池の飛躍的な性能の向上が見られない限りはこの状況は続くものとみられる。

3. インダストリーネットワーク社の取り組み

インダストリーネットワーク社（以下 IN 社）は中小製造業の集積地である長野県諏訪地域で新たな産業プラットフォームを実現すべく設立された会社であり、同地域での Web などの IT の利活用促進と、大学研究機関、企業などのためのロボットなどの開発試作を手掛けている。また同地域では、地域のシンクタンクの機能を担うべく諏訪産業集積研究センター（SIARC [3] [4]）という地域の中小企業と全国の大学研究機関等の識者らとで構成される産学連携のネットワークを形成している。

筆者らは、すでに 10 年以上前から特殊な 4 軸エンジンヘリコプタを開発してきた。数年前までそうであったが、当時もちろんまだ無人ヘリコプタの産業応用や有効性などは注目されておらず、電動ヘリコプタの登場もなかったもので特殊な 4 軸エンジンヘリコプタを開発してはいても注目もされず趣味人によるホビー用機体の開発としか認識されていなかった。

多大な時間と出費を重ねながらこの特殊 4 軸エンジンヘリコプタの開発を主導してきたのはエンジニアの中村氏であり、無人機を含む様々なロボット開発を進めている IN 社がこれに協力し、また SIARC を通じて大学の研究者らの助言を得る形で開発を進めてきた。中村氏は水難救助やビル火災などに際し、風雨・乱流のなかでも梯子や浮輪等必要な救助機器を当該の地点に確実に飛ばして救助に役立つはずであると認識し、エンジンヘリコプタの開発を進めてきている（図 1 参照）。

これまで同氏を中心にエンジンを動力として用いた以下の機体を開発してきた：

- (1) 同軸二重反転ヘリコプタ
- (2) 同軸二重反転ヘリコプタの変形型（図 2）
- (3) 4 軸式交差二重反転ヘリコプタ（大ロータ）（図 2）

図 2 同軸二重反転ヘリコプタ、4 軸交差二重反転ヘリコプタ（大ロータ）

図 3 4 軸交差二重反転ヘリコプタ（小ロータ）

(4) 4 軸式交差二重反転ヘリコプタ（小ロータ）（図 3）
これらは 10 年前から開発が行われてきたがすべて飛行に成功している。また最近ではエンジン式の 6 軸ヘリコプタも開発している。

特に、上記の (3)、(4) の 4 軸式交差二重反転ヘリコプターはその安定した飛行を実現する構造と制御の仕組みからすでに 10 年以上経過した現在でも機能と有効性の非常に高い機材としていまだに独創性を保っている。現在流行の 4 軸電動ドローンと機体四隅にロータを置くことでは同じ形式であることからその走りといってもいいであろう。

4. 4 軸エンジン式ヘリコプタの開発

本章では開発した 4 軸式交差二重反転ヘリコプタについて更に詳しく説明する。本機体の独創的な点としては

- エンジン機であること
- 4 軸式交差二重反転を用いていること

がある。

主駆動源としてエンジンを利用しているのは、開発に着手した当時はリチウムポリマー電池や高性能な小型モータが開発されておらず当然入手もできなかったためであり、その時点では模型用グローエンジンを用いるしかなかった。しかし、バッテリーに比べればグローエンジン用燃料（おもにはアルコール）はエネルギー密度が高く長時間運航に耐えられる。

最近では、グローエンジンではなく草刈機などに使用される小型 2 サイクルエンジンを使用し飛行に成功している。

将来、アジアや世界中でこの機体が使われる可能性が高まったときに世界中で使われている国産の草刈機と同じエンジンが使われていることは部品調達や修理の面で優位であることは間違いなく、また燃料もグローエンジン用アルコール燃料に比べ安価で調達しやすいガソリン燃料が使えることからより利便性を増している。採用しているガソリンエンジンとガソリン燃料によって、1~2時間は飛行可能である。これは現在の電動ドローンがリチウムポリマー電池の限界から実質 20 分ほどの飛行時間しか保てないことを考えれば大きなアドバンテージである。

制御については 10 年前の開発当時は、現在のような制御装置は存在しておらず、ホビー用のコンベンショナルなエンジン式シングルロータヘリコプタに使われていたジャイロを用いていた。現在は、市販の 4 軸電動ドローンの制御装置を用いてより安定した飛行が可能になっている。

4 軸におけるロータのピッチの可変のメカニズムは、本機の一番独創的な部分である。4 軸電動ドローンでは四隅に配置されたプロペラに直結されたモータの回転数をそれぞれ制御することで姿勢と飛行制御を行っている。それに対し、エンジンを機体中央に一基だけ搭載した本機では、四隅のロータの回転制御は容易ではない。そこで、本機は機体中央のエンジンから機体前後に向けて駆動用シャフトを突き出し、その先端には駆動用のねじ歯車を装着し、その歯車に対して直角に配置された被駆動側のねじ歯車を駆動することで、エンジンから突き出た駆動用シャフトに対して直交したロータに向けて駆動力を伝えることができる（図 4 参照）。駆動用シャフトの左右の先端の駆動用のねじ歯車に被駆動側のねじ歯車を配置することでロータの回転軸を駆動することで交差二重反転ロータの前部、あるいは後部を構成することができる。

これら 4 軸それぞれにロータのピッチを変化させる可変ピッチ機構として、通常のヘリコプタに用いられるスワッシュプレートを用い、これをロータ軸の下部、ないし上部に配置したサーボモータで駆動している。4 軸のロータのピッチを独立して制御することで機体の姿勢制御や飛行の制御が行える。この 4 軸交差二重反転ロータのヘリコプタはこれまでのところ世界的にみても例をみない。

2 軸の交差二重反転式として、現代のヘリコプタにおいては米国のカマン・エアロスペース社の K-MAX 機 [5] があり、古くは戦前のドイツにおいてはフレットナーシステム [6] がそれにあたる。これらはエンジン出力から先にベベルギア等を使った二軸の交差反転システムを採用しているのが特徴である。

2 軸の交差二重反転式は、相互に反転する二軸のロータによって、通常のヘリコプタが必要とするテールロータを不要とする。一方で、2 軸の交差二重反転式特有のメインロータのピッチコントロールに非常に複雑なリンケージの仕組

図 4 4 軸交差二重反転ヘリコプタ、ねじ歯車による動力伝達機構

図 5 ロータのコレクティブピッチコントロール機構

みを必要とするのが難点である。すなわち、二軸のロータ軸が同期していることと同時に、前後の浮力調整を行わなければならない。左右のロータのピッチコントロールにコレクティブとサイクリックコントロールの二種のピッチコントロールが必要となるためである。

4 軸の交差二重反転ロータにおいては、四隅のロータがすべて同期していると同時に、前後左右のピッチコントロールによって姿勢と飛行の制御が可能となるため、それぞれのロータのピッチコントロールはコレクティブピッチコントロールのみでよく、一つの軸の制御としては非常に簡単で簡潔なものとなっている（図 5 参照）。ただし、四つのロータ軸それぞれは簡単ではあってもピッチコントロールのメカニズムが必要となるため部品総数としては増加傾向となる。しかし、4 軸にそれぞれピッチコントロールを分担した単純で完結なメカニズムと制御であることは、最近の電動ドローンと同様に非常に制御がしやすく安定的である。また、動力分配用ねじ歯車についても、考えていたより抵抗が少なく潤滑方式によって長時間飛行にも支障は生じていない。

このように、エンジンを動力源とすることで長時間の運用が可能となり、かつ 4 軸交差二重反転という特異なメカニズムによって機体制御の簡潔化かつ安定化を実現した本機体は、2012 年のシンガポール・エアショーで展示を行った際に、アジアを中心とする様々な航空機、エンジニアリングメーカーからも注目を浴び、その後多くの引き合いをいただくことができた。

しかしながら、それがあくまで産業用やレスキュー用と

して開発されたものであっても海外に輸出された際に軍事転用される可能性があることや、筆者らのような中小企業や個人のエンジニアからなるグループでは海外への輸出やビジネスの引き合いには慎重にならざるを得ず、これまでのところシンガポール・エアショーに展示したにもかかわらず、こうした引き合いには残念ながら応えきれていないのが現状である。

5. 今後の可能性と課題

諏訪地域では毎年秋に、製造業を営む地元中小企業の製品や技術をアピールする「諏訪圏工業メッセ」という展示会を開催している。2015年のメッセには、海外からも多くのバイヤーが訪れ、筆者らのブースは大変賑わった。特に、今年になって開発した小型ロータによって飛行する、電動ドローンのような形状のエンジン搭載機を展示したところ、その使いやすさや運用のしやすさがアピールでき、多くの注目を浴びた。

今後は、行政や国の各方面とも調整や意見交換など行いながら、海外への輸出の可能性も探って行っていく予定である。もちろん、国内でのレスキューや防災、農林業、漁業、資源探査など様々な用途に向けてアピールし、特に電動ドローンではなしえないような用途に向けて開発とビジネス化のチャンスを模索していきたいと考えている。

現在は、小型ロータの4軸ヘリの延長上で、先進的な6軸のヘリコプタを開発中であり、近いうちに国内はもとより広く海外に向けてもアピールしていきたいと考えている。

なお、開発を中心的に進めてきたエンジニアの中村は、4軸式交差二重反転ヘリコプタに関して二つの特許[7][8]を取得している。

謝 辞 本執筆にあたり、諏訪産業集積研究センター(SIARC)メンバーをはじめ、貴重な情報の提供、ご意見を頂戴した皆様に感謝致します。

参 考 文 献

- [1] 関口洋一：“農業における無人ヘリコプター利用の現状”，農業機械学会誌，vol.66, no.2, pp.4-7, 2004.
- [2] Drones, D.I.Y., Arducopter, 2013.
- [3] 柴山清彦：“外部経済を生み出す場としての自律的組織—地域産業再生のための「新たなコミュニティ」の生成”，日本政策金融公庫論集，vol.14, pp.1-24, 2012.
- [4] 喜多一：“デジタルファブリケーション時代の中小製造業の姿”，産学連携学，vol.11, no.1, pp.1.1-1.4, 2014.
- [5] Kaman K-MAX, https://en.wikipedia.org/wiki/Kaman_K-MAX, Retrieved Dec. 20, 2015.
- [6] Flettner Fl282, https://en.wikipedia.org/wiki/Flettner_Fl282, Retrieved Dec. 20, 2015.
- [7] 中村幹男：多軸型垂直離着陸機及びその操縦方法，特許第 3852023 号。
- [8] 中村幹男：多軸型垂直離着陸機，特許第 4441714 号。

中村幹男 (Mikio Nakamura)

中村クリエイティブエンジニアリング主宰。エンジン型ドローンの機体設計・製作、商品開発に従事。企業、大学、研究機関との産学連携を通じてエンジン型ドローンの発展、可能性の拡大を目指す。

大橋俊夫 (Toshio Ohashi)

インダストリーネットワーク株式会社代表取締役。工作機械工具販売の有限会社オオハシ代表取締役。SIARC（諏訪産業集積研究センター）副会長。ロボットや無人小型機、ICT関連機器等の試作開発、大学・研究機関との産学連携や試作開発の支援、新産業創生を目指す。

市川純章 (Sumiaki Ichikawa)

1998年東京理科大学工学部助手、2002年諏訪東京理科大学システム工学部講師、2006年同准教授、現在に至る。博士(工学)。知能ロボティクス・メカトロニクスを専門とし、ロボットの遠隔操縦の支援手法、皮膚センサの開発、介助用小型昇降機の開発、ロボットの自律学習、群ロボットの協調行動の研究などに従事する傍ら、ロボットの設計・製作・プログラミング手法などに関する教育指導を行う。諏訪産業集積研究センター(SIARC)設立メンバー、理事。(日本ロボット学会正会員)

喜多 一 (Hajime Kita)

1987年より京都大学工学部電気工学科助手。1997年より東京工業大学大学院理工学研究科知能システム科学専攻助教授。2000年より大学評価・学位授与機構教授。2003年より京都大学学術情報メディアセンター教授、現在に至る。工学博士。諏訪産業集積研究センター(SIARC)の設立メンバー、会長。システム工学を中心にその応用として学際的研究を多く手掛ける。進化的計算、エージェントベースの社会経済シミュレーションなどシステム工学的手法、情報教育・プログラミング教育や教育のための情報環境構成、中小企業と連携しての利用者参加のものづくりなど。

岩瀬将美 (Masami Iwase)

2001～2004年東京電機大学理工学部情報システム工学科助手。2004～2007年同講師。2007年より未来科学部ロボット・メカトロニクス学科准教授、現在に至る。2008～2009年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。博士(工学)。主な研究分野は、制御工学およびロボティクス、メカトロニクスへの応用。日本機械学会、電気学会、日本シミュレーション学会、SICE、IEEE等の会員。(日本ロボット学会正会員)