

飛行の基本メカニズム

藤原 大悟

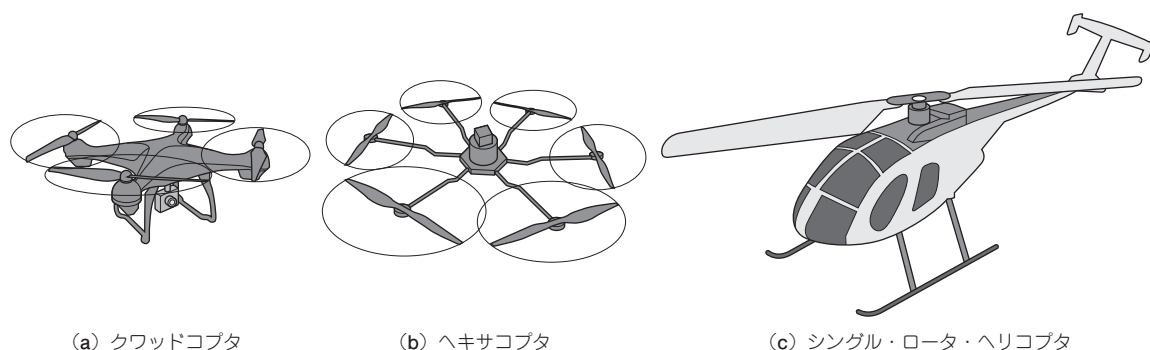


図1 ドローンは広い意味ではいろいろあるが本稿ではマルチコプタのことを指す

本誌の読者はおそらく、「ドローン」という言葉に対しておおまかなイメージは湧くと思います。現在のところ一般には、「複数の機体浮上用のプロペラを持つヘリコプタ型の無人飛行体」という意味で使われることが多く、このような飛行体の名称は複数のプロペラに由来してマルチコプタ（マルチロータ・ヘリコプタ）と呼ばれます。

プロペラの数4つの場合はクワッドコプタ（クワッド・ロータ・ヘリコプタ）、6つの場合はヘキサコプタ（ヘキサ・ロータ・ヘリコプタ）といった呼び方もあります（図1）。

一方、大きなロータ1つで機体を浮上させる従来型のヘリコプタは「シングル・ロータ・ヘリコプタ」と呼んで区別されます。広い意味ではこちらもドローンの一種です。

STEVAL-DRONE01（以降、ST-DRONEと略）は、4つのプロペラを持つマルチコプタです。以下では、ドローンをマルチコプタと同じ意味で用います。

機体が浮上する基本メカニズム

● 竹とんぼでイメージする

機体が浮上する仕組みは、竹とんぼをイメージすると分かりやすいと思います。竹とんぼは1つのプロペラと回転中心の軸から構成されます。プロペラは軸を

境に、進行方向前縁（空気が流入する側）が上向き、後縁が下向きとなるようねじれていて、軸を回転させると空気に対して迎え角が付きます（図2）。プロペラは、回転しながら空気をかきわけ下向きへ押し流し、その反力を受けて浮上に必要な上向きの力を発生させます。

浮上に寄与する回転軸方向の上向きの力を推力と呼び、下へ押し流される空気の流れを吹き下ろしと呼びます。

● 継続的にプロペラに動力を与える

プロペラは回転が止まる方向に空気抵抗を受け、これをプロペラのトルクと呼びます（図3）。通常、プロペラの回転が速いほど、推力/吹き下ろしトルクともに大きくなります。

竹とんぼを飛ばすときは、最初に両手で軸を支えてプロペラを十分速く回しておき、手を離すと推力を受けて上昇します。また、時間とともにプロペラは空気抵抗のトルクを受けて徐々に回転速度が落ち、推力が減って、重力に打ち勝てなくなると降下に転じ、落下します。竹とんぼは手から離れるとプロペラを回す動力がなくなるので短時間で落下しますが、ドローンの場合は継続的に動力をプロペラに与えることで、ある程度長い時間、飛行させ続けられるようにしています。

特集 飛行・走行・航行 ドローン&ロボ制御

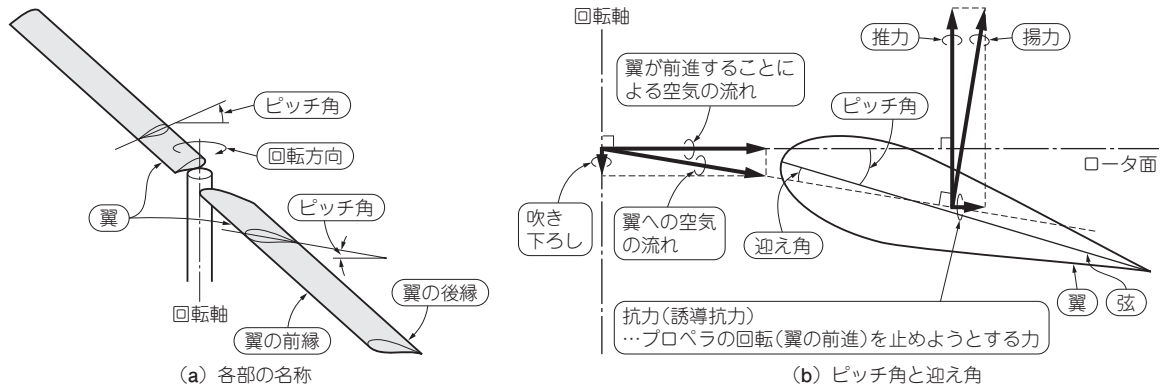


図2 機体が浮上する仕組みを竹とんぼでイメージする

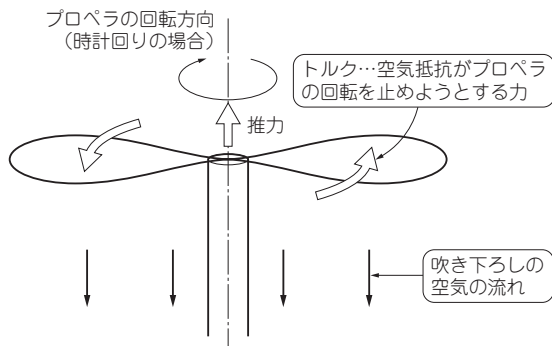


図3 プロペラの推力/トルク/吹き下ろし

自在に動き回るために

ここまでは機体を浮上させる推力を発生させる仕組みについて簡単に説明しましたが、実際にドローンを長い時間安定に、かつ、思い通りの速度や方向へ飛行させるには、機体の構造にさまざまな工夫をする必要があります。ドローンが複数のプロペラを有する理由にもつながります。

● 飛行時間を稼ぐ…小型で大容量のリチウム・ポリマ電池を利用する

まず、長時間飛行させるためには、空気抵抗に打ち勝ちプロペラを回し続ける動力源が必要となります。近年は小型軽量で大容量なリチウム・ポリマ電池 (Li-Po 電池) が普及しているので、これと電動モータを組み合わせて利用します。

機体に胴体構造を設け、そこに電池とモータおよび電気回路を固定し、モータの軸にプロペラを直結する構造がよく用いられ、ST-DRONE も同様です。

● プロペラ2つを1組にして胴体への反作用トルクを打ち消す

ここで、先ほど説明したプロペラのトルクについて、力のやりとりを考えてみましょう。モータは空気抵抗に打ち勝ちプロペラを回すわけですが、モータがプロペラを回そうとすると、逆に、モータはプロペラから空気抵抗に相当するトルクを受けることになります。

物理学の力学で習う「作用・反作用の法則」です。モータは胴体に固定されているので、胴体全体がこのトルクを受けることになります。従ってモータでプロペラを回そうとすると、胴体が逆方向に回ってしまい、空気(空間)に対するプロペラの回転速度を意図通りに制御できません [図4 (b)]。

そこでヘリコプタには、胴体に働くトルクを打ち消す何らかの手段を設ける必要があります。ドローンの場合は、2つ1組でプロペラの回転を逆方向にすることでトルクを打ち消します [図4 (a)]。そのため、通常ドローンのプロペラの数はいくつか偶数個になります。

詳細は省きますが、プロペラの回転で発生するジャイロ・モーメントも、逆回転のプロペラ同士で打ち消すことが可能です。また、組となっているプロペラの回転速度にあえて差をつけることにより、トルクのバランスを崩し、胴体の向きを回すことができます。水平面内の回転による機体の向きを「方向」あるいは「方位」と呼びます。

● 行きたい方向に進む…機体胴体を傾ける

胴体の回り止めのため複数のプロペラが必要になることが分かりました。しかし、まだこれだけではドローンは単に浮くだけです。行きたい方向に進むことも、風に流されないように抵抗することもできません。

物体がある方向へ移動(加速)するには、物体に力

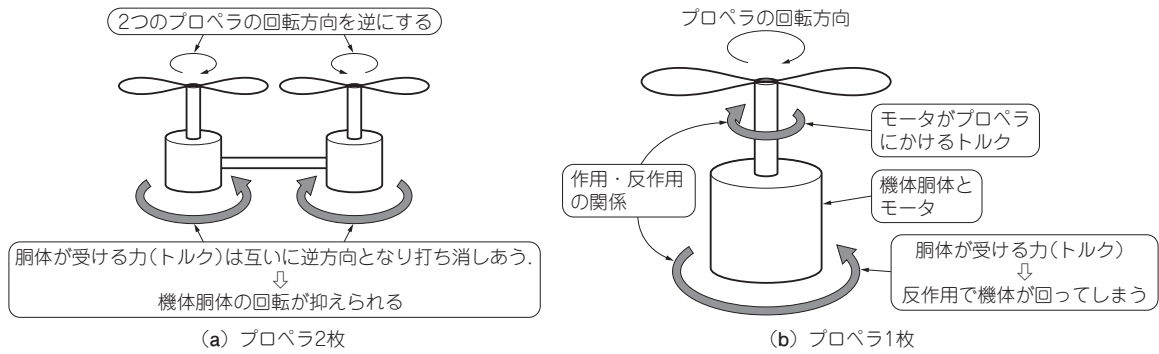


図4 複数のプロペラを用いた反作用トルクの打ち消し

を加える必要があります。ドローンが受ける力を大別すると、空気力と重力の2種類です。このうち重力はドローンの質量によって決まる鉛直下向きの力なので、自由に制御することはできません。

空気力は、トルクが打ち消されていて、風がないとした場合、残るは推力となります。推力はプロペラの回転速度に応じて大きさを増減させることができますが、方向はほぼ回転軸に平行、つまり胴体に対して上向きです。

ここで重力と推力の釣り合いを考えます。機体が空中で静止つまり「ホバリング」している状態では、機体胴体を受ける重力と推力のベクトルの総和はゼロとなります。この状態から機体胴体が傾くと、重力と推力のバランスが崩れ、力のベクトルの総和がゼロではなくなります。これにより発生する(ゼロではない)力の総和がドローンの加減速に利用され、ドローンは空中を自由に移動できます。

また、ドローンが横風を受けた場合、胴体は推力と重力に加え、風が胴体を押し流そうとする空気力も受けることとなりますが、風による力とバランスするように胴体上面を風上へ傾け、推力の大きさを調節すれば、風に流されないようにできます。このような水平面に対する胴体の傾きの角度を機体の「姿勢」と呼びます。

● 機体胴体を傾ける…4つのプロペラの回転速度を独立に制御する

では、胴体を傾けるにはどのようにしたらよいでしょうか。ここでもやはり、機体を傾けるための力を何らかの方法で作出す必要があります。とは言うっても、自由に制御できるのは推力なので、これを使うしかありません。そこで、プロペラごとに回転速度に差をつけて、推力を変えます。すると、推力の大きなプロペラは上昇し、推力の小さなプロペラは相対的に下降するため胴体が傾きます(図5)。

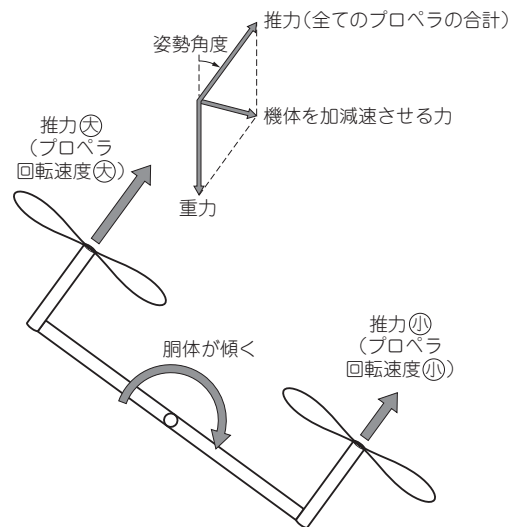


図5 機体胴体に働く力と姿勢の傾き

ここで、先ほど説明したように、プロペラの回転速度に差ができると、トルクのバランスが崩れ、胴体の向きが回転してしまうことがあります。実際には、全てのプロペラにわたってトルクの総和をゼロにするという拘束条件を設けた上でプロペラの回転速度に差をつけることで、胴体が回らないようにします。プロペラが4つのクワッドコプタの場合、独立に制御できるモータが4つあるので、ドローンの胴体の縦・横の姿勢と方向および上昇下降の4つの運動の自由度を独立に制御できます。このことから、多くのドローンはプロペラの数をも4つ以上としています。

ふじわら・だいご

入門

空ドローン制御

自走ロボ制御

水中ドローン制御