

マルチコプター型ドローンの超音波距離センサー数削減

山下 明 博

Reduction of the Number of Ultrasonic Sensors on Multicopter Drones

Akihiro YAMASHITA

要 旨

マルチコプター型ドローンの軽量化のために、障害物との衝突を避けるための超音波センサーの数を削減する方式について研究した。通常、マルチコプター型ドローンでは、反トルクを打ち消すために、半数のモーターを逆回転させる方式が採用されている。それに対し、本研究の方式では、全モーターを順方向に回転させることにより、マルチコプター型ドローンの飛行時には、機体が反トルクにより水平面で回転し、障害物検知のために5個必要であった超音波距離センサーの数を、2個に削減することができた。

キーワード：ドローン，超音波距離センサー，反トルク，マルチコプター

はじめに

無人航空機は、急速に普及が進んでいる。特に、複数のプロペラを持つマルチコプター型ドローンは、ローターの角度を操作するといった複雑な機構を持つヘリコプターとは異なり、複数のモーターだけという単純な機構を採用しているために、低価格化が進み、多くのユーザを獲得するようになった。

本論文は、一般的なマルチコプター型ドローンでは不要とされる反トルクを発生させることにより機体を回転させ、障害物検知のために5個必要であった超音波距離センサーの数を、2個に削減する方式について論じるものである。

I. ヘリコプターとマルチコプター型ドローン

1. ヘリコプター

マルチコプター型ドローンは、ヘリコプターの技術を受け継ぐ無人航空機である。

ヘリコプターは、固定翼航空機に分類される。ローターと呼ばれる回転翼にエンジン(Engine)の動力を接続し、翼を回転させることにより揚力を発生させ飛行する航空機のことである。

写真1に、世界で初めて開発されたヘリコプターであるフォッケウルフFocke-Wulf Fw61を示す。ハインリッヒ・フォッケ(Henrich Focke)により開発され、初飛行を行ったFw61は、160

馬力のエンジンを積んでおり、エwald・ロールフス（Ewald Rohlfs）の操縦により、1937年6月25日、高度2,439m、滞空時間1時間20分49秒を飛行した¹⁾。



写真1 フォッケウルフFw61²⁾

しかし、Fw61の実用性は皆無であった。その後、回転翼航空機の開発が進化したのは、第2次世界大戦がきっかけであった。長大な滑走路を使うことなく離着陸を行ったり、空中のある地点で停止できるという回転翼航空機の特徴は、固定翼航空機では達成できない軍事目的を実現できるという意味において極めて有用であり、こちらにも多額の開発費が注がれ、多くの技術者が動員されることにより、実用化と信頼性の向上が行われた。現在のヘリコプターの主流である、反トルクテールローター（Anti Torque Tail Rotor）形式を採用したVS-300が1939年に初飛行し、その発展型が第二次世界大戦末期に米軍で用いられ、その後の朝鮮戦争、ベトナム戦争でも、軍事目的の実現のために多用されていった。回転翼航空機が、遭難者の救助などの民事目的に利用されるようになるのは、1979年に6月に、アメリカ沿岸警備隊に採用された、アエロスパシアル（Aerospatiale）社HH-65A以降のことである。

反トルクテールローター形式は、現在の主流であるシングルローター式ヘリコプターの多くが採用する方式である。シングルローター式とは、揚力を発生させるための回転翼が1つしかない方式であり、機体の小型化と構造の簡素化を実現することができる。しかし、回転翼が1つしかないため、回転翼の回転によりトルクというモーメントが発生し、図1のように、機体自体が直進せず回転し続ける。

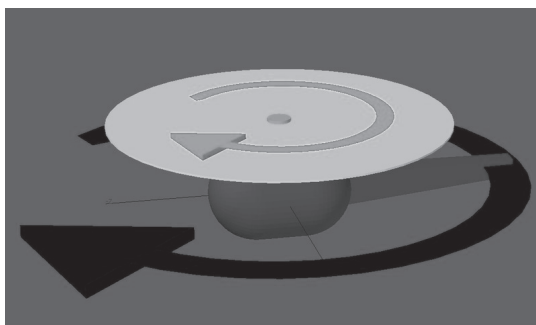


図1 シングルローター式のヘリコプター

このトルクを打ち消すために、反トルクテールローター形式では、図2のように、補助的な回転翼を機体の尾部に設け、機体を直進させる。

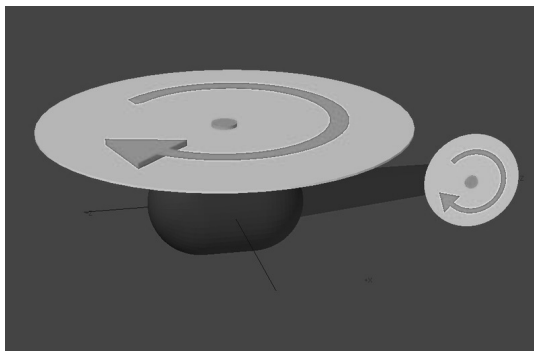


図2 反トルクテールローター形式のヘリコプター

反トルクテールローター形式のヘリコプターは、機体も比較的小型にできるし、構造も簡素にすることができるため、多くの種類が開発された。しかし、姿勢を制御する機構は複雑であり、ローターが回転しているときに、連続的にローターの角度を変えることによって、姿勢を制御する必要がある。

2. マルチコプター型ドローン

マルチコプター型ドローンは、垂直方向に3個以上のローターを備えたヘリコプターである。複数のローターを備えることにより、姿勢制御のためにローターの角度を変更するといった複雑な機構が不要になり、代わりに、各ローターの回転数を、搭載された傾きセンサーで検出した機体の傾きによって増減することで姿勢を制御できるようになった。

なお、マルチコプター型ドローンでは、ホバリングが容易であることが、その大きな特徴である。

II. マルチコプター型ドローンの問題と法規制

マルチコプター型ドローンは、反トルクテールローター形式のヘリコプターに比べ、構造を非常に簡単にできることと、取り扱いが容易であるなどの理由により、急激に開発が進み、低価格化が進んだ。そして、多くのユーザを獲得し、空撮した映像がSNS上に公開されるなど、「ドローン」は社会現象になった。

しかし、日本においては、2014年頃から、マルチコプター型ドローンによる問題が続々と発生するようになった。

例えば、2014年4月9日に、名古屋市の繁華街でドローンが墜落する事故が発生し、操縦者が逮捕された³⁾。また、2014年11月3日に神奈川県で開催された「湘南国際マラソン」において、協賛社の依頼で飛ばした空撮会社のドローンがコース上に落下し、女性スタッフが負傷した⁴⁾。さらに、2015年4月22日には、日本の首相官邸屋上に降下したマルチコプター型ドローンが発見

された⁵⁾。その機体に取り付けられていたプラスチック製の容器付近から、セシウムが検出されたことから、マルチコプター型ドローンをテロ行為に使用する可能性が指摘された。

2015年5月9日には、長野県善光寺の御開帳行事中に少年が操縦していたドローンが落下した⁶⁾。その後も、2015年9月19日、世界遺産・姫路城の大手守にドローンが衝突し、窓枠に傷がつく事件が発生した⁷⁾。

これらの問題を受けて、改正航空法が2015年12月10日より施行され、その中で、マルチコプター型ドローンに対し、様々な規制が加わるようになった。

具体的には、航空機との衝突を避けるため、空港等周辺に設定された進入表面等の上空の空域、地表から150m以上の高さの空域での飛行禁止、落下の危険を避けるため、人口集中地区上空や多数の者の集合する催しが行われている場所の上空での飛行禁止、機体からの物件投下の禁止、危険行為を防止するため、火薬類、高压ガス、引火性液体、凶器などの危険物の輸送の禁止等が行われた。

ただし、200g未満のドローンは規制外となった。

Ⅲ. 仮想現実実装環境BIVRの開発

1. マルチコプター型ドローンのカメラによる障害物回避

2015年までに販売されたマルチコプター型ドローンは、飛行させる際に、樹木や建物の壁といった障害物に近づいても、自動でドローンを停止させたり、障害物を回避したりする機能は搭載されておらず、障害物に激突して墜落する事例が多く発生していた。

しかしながら、2016年には、複数のカメラを搭載し、飛行中、障害物を回避する種類のマルチコプター型ドローンが販売されるようになった。

例えば、DJI社のクワッドコプター Phantom4は、機体前面に2基、機体底面に2基の計4基のサブカメラと、機体に懸吊した1つのメインカメラを搭載し、周囲の物体を3Dで認識することによって、障害物を回避している。

しかし、5基のカメラを搭載した場合、重量が非常に重くなるという問題が存在する。また、5基のカメラの映像から、画像処理を行い障害物までの距離を計算するため、高性能のコンピュータで処理する必要がある。

2. マルチコプター型ドローンの距離センサーによる障害物回避

筆者は、マルチコプター型ドローンを軽量化するために、超音波を利用した距離センサー HC-SR04を搭載することにした。このセンサーは、非常に安価であり、しかも、単純な計算式で距離を求めることができるため、高性能でない制御コンピュータでも、処理することが可能である。

具体的には、HC-SR04は、40kHzの超音波を超音波スピーカーから8パルス送信し、障害物からの反射波のパルスを、超音波マイクロホンで受信する。そして、超音波を発信してから受信するまでの時間を計測することにより、距離を計算することができる。

厳密には、超音波の空気中の進行速度は、気温により変化する。しかし、障害物の存在の有無のみを判定する際には、気温の変化は無視できる。周波数が40kHzの場合、ほぼ正確に測定できる距離の範囲は、10cm ~ 2.0mである。

通常、マルチコプター型ドローンで障害物を検知するためには、図3のように、ドローンの下部に、計5基の距離センサーを搭載する必要がある。そして、それら5つの距離センサーを、マルチコプター型ドローンの進行方向に対して前方、右方、左方、後方、下方に向けることにより、マルチコプター型ドローンは障害物を検知し、それを避けて飛行することができる。

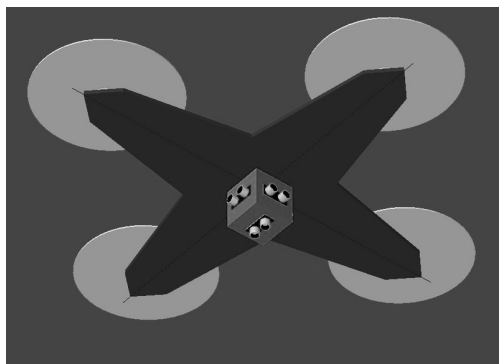


図3 5つの距離センサーを有するマルチコプター型ドローン

3. マルチコプター型ドローンの距離センサーの1基化

マルチコプター型ドローンに搭載する距離センサーが5基ある場合、重量が大きくなる。そのため、距離センサーの数を削減することにより、軽量化を図ることとする。

もともと、マルチコプター型ドローンに、距離センサーが5基必要な理由は、前方、右方、左方、後方、下方の障害物を検出するためである。

そこで、筆者は、マルチコプター型ドローンの前方、右方、左方、下方ばかりでなく、後方の障害物も、1基の距離センサーで検出する方法を考案した。

具体的には、図4のように、マルチコプター型ドローンの下面に、距離センサーを45°傾けて1基だけ配置し、マルチコプター型ドローンを遅速で回転させることにより、前方、右方、左方、下方、後方の障害物を検出する。

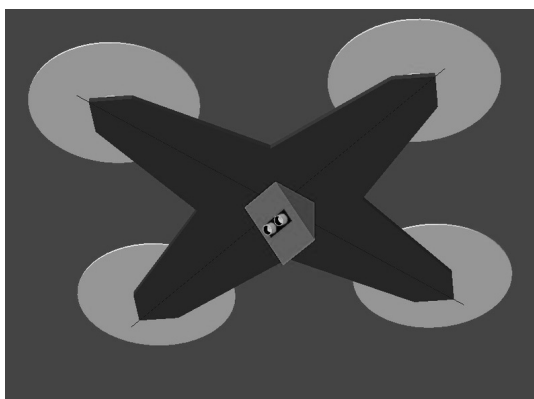


図4 1つの距離センサーを有するマルチコプター型ドローン

ただし、この方法を実現するためには、マルチコプター型ドローンを常に回転させ飛行させる必要がある。

通常、マルチコプター型ドローンは、図5のように、4基のエンジンのうち、2基は右回り、2基は左回りに回転させ、これによって、ドローンに発生する反トルクを打ち消し、機体が回転しないように制御している。

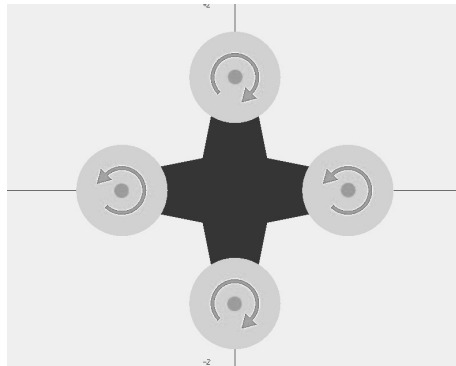


図5 反トルクを打ち消す制御を行うマルチコプター型ドローン

そのため、マルチコプター型ドローンに搭載した距離センサーを常に回転させたまま飛行させるためには、ヘリコプターのように、小型のティルトローターをさらに装備し、強制的にマルチコプター型ドローンを回転させる必要がある。

しかし、このような、ティルトローター装備の追加は、機体重量を増加させるばかりでなく、動作機構を複雑にする結果しかもたらさない。

そこで、筆者は、図6のように、マルチコプター型ドローンの4基のエンジンのうち、4基とも右回りに回転させる方式を考案した。この方式では、図7に示すように、ドローンに反トルクが発生し、ドローン本体が自然に右回りに回転する。この、反トルクによるマルチコプター型ドローンの機体回転を利用し、下面に45°傾けて搭載した1基だけの距離センサーを常に回転させたまま飛行させることにした。

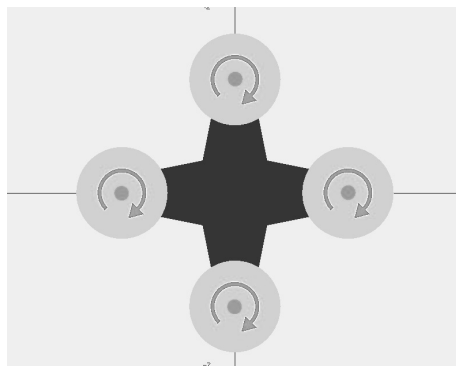


図6 反トルクを打ち消す制御を行わないマルチコプター型ドローン

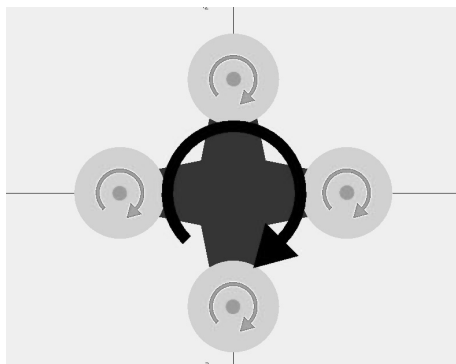


図7 マルチコプター型ドローンに発生する反トルク

これにより、マルチコプター型ドローンに搭載する距離センサー数を、5基から1基に削減することができる。

4. マルチコプター型ドローンの距離センサーの1基化の問題点

マルチコプター型ドローンに搭載する距離センサーを、下面に45°傾けて搭載した1基のみに削減し、試作を行った。しかし、この場合、正確な距離センサーが正確な距離を測定できず、壁に衝突する事例が発生した。

問題点の原因を探ったところ、下面に45°傾けて搭載した距離センサーから発射された超音波が、垂直な壁や水平な床といった障害物に対し、45°傾いて入射したため、ほとんど戻ってこないことが判明した。

5. マルチコプター型ドローンの距離センサーの2基化

このような、マルチコプター型ドローンに搭載する距離センサーを、下面に45°傾けて搭載することによる問題点を回避するために、図8のように、2基の距離センサーを搭載する方法を考案した。

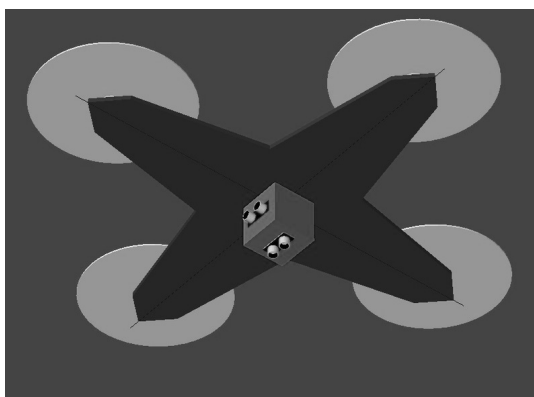


図8 2つの距離センサーを有するマルチコプター型ドローン

この場合、1基の距離センサーは下方に向け、もう1基の距離センサーを水平に向ける。そして、マルチコプター型ドローンの4基のエンジンのうち、4基とも右回りに回転させ、ドローンに反トルクを発生させることによりマルチコプター型ドローンの機体を回転させ、水平に向けて搭載した1基の距離センサーを常に回転させたまま飛行させる。これにより、垂直な壁といった障害物に対しては、発射した超音波の入射角が 90° のため、そのまま反射して戻ってくる。また、水平な床に対しては、もう1基の距離センサーから発射された超音波の入射角が 90° のため、そのまま反射して戻ってくる。

この方法により、マルチコプター型ドローンに搭載する距離センサー数を、5基から2基に削減することができる。

VI. 実機による評価

1. 2つの距離センサーを有するマルチコプター型ドローンの制作

マルチコプター型ドローンに発生する反トルクによる距離センサーの削減を検証するために、写真2のように実機を制作した。

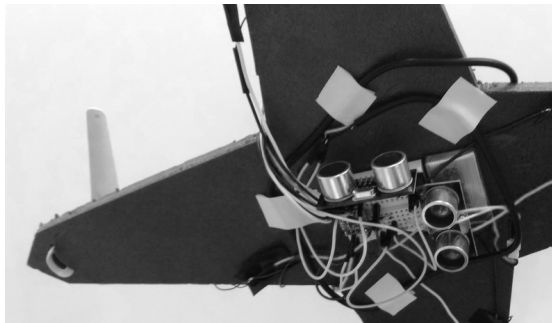


写真2 マルチコプター型ドローン実機下部

マルチコプター型ドローン実機の仕様は、以下の通りである。

(1) モーター

小型のブラシレスモーターを4基用意した。通常、マルチコプター型ドローンのモーターは、回転方向によってCW⁸⁾、CCW⁹⁾の2種類が存在し、クワッドコプター¹⁰⁾の場合、CW、CCWをそれぞれ2基ずつ使用するが、今回は、4基ともCWのモーターを使用した。

(2) ローター

モーターがCWであるので、ローターとしてCW用の2枚翼を4セット用意した。

(3) フレーム

フレームは、軽量化および部品固定の単純化のために、発泡ポリスチレンのボードを削り出した。

(4) バッテリー

4基のモーターを回転させるためのバッテリーと、制御コンピュータの電源用バッテリーを兼ねて、1セル当たり600mAh¹¹⁾で3.7Vの小型バッテリーを使用した。

(5) 9軸センサー

加速度センサー，ジャイロセンサー，地磁気センサーの姿勢制御用9軸センサーは，一体型のKP-9250を使用し，SPI (Serial Peripheral Interface)¹²⁾ モードで制御コンピュータと通信することにした。

(6) 距離センサー

距離センサーは，超音波方式のHC-SR04を複数使用し，SPIモードで制御コンピュータと通信することにした。

(7) 制御コンピュータ

制御コンピュータは，RaspberryPi3を使用し，センサーからの入力，SPIモードで通信することにした。

2. 反トルクによる回転速度

本機の特徴である，4基のローターを同じ方向に回転させることによる反トルクは，マルチコプター型ドローンの機体を，約1秒に1回転させる力を発生させた。この結果，横方向に取り付けた距離センサーは，約1秒ごとに，周囲の障害物を検知することができた。写真3に，マルチコプター型ドローン実機上部を示す。

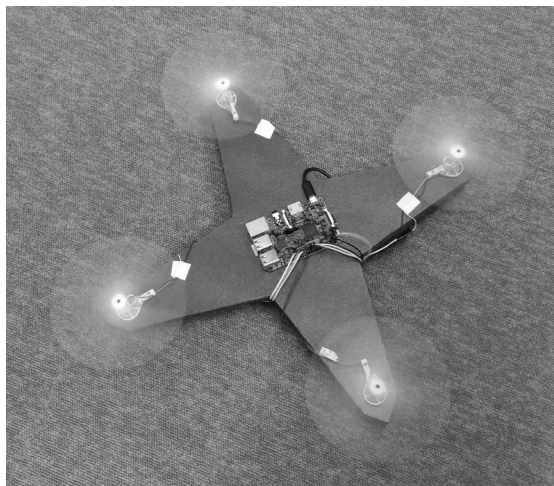


写真3 マルチコプター型ドローン実機上部

結 論

マルチコプター型ドローンは，低価格化が進み，多くのユーザを獲得する一方で，危険な使用方法により，航空法が改正される事態も発生した。そのような状況の下，改正航空法の規制外となる200g未満のドローンを開発するためには，マルチコプター型ドローンを軽量化することが必要であった。

筆者の提案する，マルチコプター型ドローンに，下方用の距離センサー1基，水平用の距離センサー1基を搭載し，エンジン4基を全て右回りに回転させることで，機体に反トルクを発生さ

せることによりマルチコプター型ドローンの機体を回転させ、障害物との距離を検出する方式は、ドローンの軽量化に大いに寄与することがわかった。

また、現在使用されているマルチコプター型ドローンのうち、クワッドコプターは4基のモーターとローターを備え、2基を右方向、2基を左方向に回転させることにより反トルクを打ち消している。また、ヘクトコプターでは6基のモーターとローター、オクトコプターでは8基のモーターとローターを備え、それぞれ、半数のモーターを反対方向に回転させることで、反トルクを打ち消している。このように、反トルクを打ち消すために、モーターとローターの数は偶数に限定されている。

これに対し、筆者の提案する方式では、反トルクを打ち消す必要がないため、モーターとローターの数を奇数にすることが可能である。軽量化を考えると、3基のモーターとローターを備えたマルチコプター型ドローンは実現可能ということになる。今後、飛行可能かを検証したいと考える。

注

- 1) 横森周信 (2000) 「年表世界航空史 第二巻」, 東京: (株)エアワールド, p.249参照。
- 2) 佐藤裕也他 (1991) 「ヘリコプター」, 新航空工学講座, 第5巻, 東京: 日本航空技術協会, p.2参照。
- 3) 朝日新聞2014年7月17日「小型無線ヘリ墜落, 愛知県警が書類送検 夜景を撮影」参照。
- 4) 日本経済新聞2015年4月22日「首相官邸にドローン落下 けが人はなし」参照。
- 5) 神戸新聞2015年11月13日「マラソン大会 ドローンを禁止? 活用?」参照。
- 6) 日本経済新聞2015年5月10日「ドローン, 横浜の15歳少年が飛ばす 長野・善光寺に落下」参照。
- 7) 朝日新聞2015年9月19日「世界遺産・姫路城の大天守にドローン衝突 窓枠に傷」参照。
- 8) CWは, 時計回りを意味する。
- 9) CCWは, 反時計回りを意味する。
- 10) クワッドコプターは, 4基のモーターとローターを備えたマルチコプターである。
- 11) 600mAhは, 0.6Aで1時間使えることを意味する単位である。
- 12) SPIモードは, モトローラ社が提唱した方式で, 3本または4本の線で通信したい機器を接続し, 数Mbpsの通信が可能である。

[2016. 9. 29 受理]

コントリビュータ: 染岡 慎一 教授 (造形デザイン学科)