

応用研究論文

ローイング空撮のためのマルチコプタの開発とその課題

試験飛行から空撮実験まで

間所洋和¹, 三浦立¹, 嶋田浩², 寺田裕樹³, 佐藤和人¹¹ 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科² 秋田県立大学生物資源科学部アグリビジネス学科³ 秋田県立大学システム科学技術学部電子情報システム学科

本論文では、マルチコプタを用いた空撮技術を確立し、ローイングの安全支援への応用を目的とする。ボートを漕ぐスポーツであるローイングは水上で行われるため、監督やコーチはモータボートから漕手や舵手を観察し指導することになる。モータボートによる追跡は、引き波が発生するという問題に加えて、観測する視点が限られること、一度に追跡できるボートの数が限られること、燃料費や維持費を要することなど、様々な問題を含んでいる。また、舵手が乗らないボートは、漕手が後ろを振り向きながら進路を確認するが、常に後方（ボートの進行方向）を見ているわけではないため、他艇や障害物との接触や衝突といった事故が発生する可能性がある。近年、マルチコプタの普及が急速に進んでいる。マルチコプタとは、放射状に配置される複数のロータを回転させ、それにより生じる揚力を利用して飛行を行うラジオコントロールヘリコプタである。マルチコプタによる空撮は、従来の空撮手法と比較して低コストかつ容易に実現できるため、三次元計測やリモートセンシング等の研究用のみならず、商用やホビー用でも多用されている。本研究では、ボート体験会においてローイングの空撮実験を行った。子吉川での空撮実験では、マルチコプタの高度とカメラの角度を変更して、3パターンの構図からボートを撮影した。各構図で撮影された映像の特徴について考察を加えるとともに、ローイングにおける空撮の優位性やマルチコプタの安全性の向上に向けた今後の方向性について検討する。

キーワード：ローイング, マルチコプタ, 空撮, カメラ, ジンバル.

秋田県由利本荘市は、ボート競技（ローイング）の盛んな街である。毎年9月には市民ボート大会の子吉川レガッタが開催され、地域の企業や団体、病院、市役所、町内会などの仲間同士で結成された多数のクルーが出場し、地域に根ざしたスポーツとしてローイングを楽しんでいる。本学においても2008年からレガッタへの出漕を続けており、成年女子準優勝、壮年女子優勝、成年男子4位2回の成績を残している（間所, 2014）。

ローイングは水上で行われるため、監督やコーチは陸上から漕手を観察することになり、細かい動作や漕技姿勢を見るができない。漕手や舵手に装

着するウェアラブルカメラでは、映像の質が十分とは言えず、また運動の妨げになる。このため、通常はモータボートでローイングボートを追跡するが、引き波により走行の妨げになることに加えて、燃料費や機関の定期的なメンテナンスが必要となり、運用コストが増大する。また、ローイングボートは漕手が進行方向に背を向けた状態で走行するため、他艇や障害物を認識することが難しい。特に舵手が乗船しないスカル艇では、図1に示すように後方を振り返って進路の安全を確認しなければならない。

近年、マルチコプタのスポーツへの応用が注目されている。2014年の冬季オリンピックでは、スキ

一やスノーボードの競技中継用に、マルチコプタが利用された。マルチコプタは世界的に普及してきており、従来のシングルロータ式ヘリコプタに比べて低コストで高品質な映像を撮影可能な点が注目を集めている。その反面、未熟な操縦者による暴走や墜落事故が増加している。2014年11月3日の第9回湘南国際マラソンでは、スタート地点を空撮中のマルチコプタが墜落し、大会を運営していたスタッフが顔に軽い怪我を負った。また、2015年1月26日にアメリカの大統領官邸、2015年4月22日に日本の首相官邸で、マルチコプタの墜落機体が発見された。大統領や首相の身を守る警備の目をすり抜けて、官邸内に不正侵入したことに対して衝撃が走り、メディアでも大きく取り上げられた。今後の厳しい法整備も懸念されているが、基本的には操縦者に機体の整備や調整、電波環境の確認等の安全な運用に向けた知識と経験が求められる。

本研究では、マルチコプタを用いて、ローイングの空撮を行うことを目的とする。特に、3次元空間を自由に移動できるマルチコプタの視点による映像から、ローイングにおける空撮の優位性について考察する。また、マルチコプタの製作を通じて技術情報を体系的に蓄積するとともに、運用に必要な情報をまとめ、安全性の確保と向上を目指す。



図1 ローイングボート（シングルスカル艇）

関連研究

通常のラジコンヘリコプタは、水平方向に取り付けられたメインロータと、垂直方向に取り付けられたテールロータから構成されている。機体上部のメインロータから揚力を発生し、後方のテールロータが機体の回転を抑制する。玩具としてのラジコンヘリコプタは、グローエンジンやガソリンエンジンで

ロータを駆動する。内燃機関は小型でも高出力が得られるものの、微妙な回転制御が難しい。このため、操縦には指先のマジックと呼ばれる程の、高度な技術が求められる。かつてのシングルロータ式ラジコンヘリコプタと言えば、ホバリングをさせるだけでも長い経験と絶妙な操作技術が求められた。したがってラジコンヘリコプタは、ラジコン界では最も敷居が高く、最高峰の趣味であった。

技術の進歩は、高い敷居を、庶民がまたげる高さまで下げてくれる。マルチコプタの登場と普及により、誰もが気軽にラジコンヘリコプタの世界に仲間入りできるようになった。様々な技術革新に支えられているが、特にモータ、バッテリー、マイクロコンピュータ、そしてセンサ技術の進歩が大きい。まさにラジコン界のイノベーションである。また、デジタルカメラの小型軽量化と高解像度化が進み、マルチコプタによる空撮が容易になった。マルチコプタによる空撮は、様々な分野への応用が期待されている。例えば、自然災害調査のための空撮(井上, 2014)や福島第一原発事故の原子炉建屋内の環境モニタリング(野波, 2014)、テレビ番組用のハイビジョン空撮(稲葉, 2011)などが既に報告されている。また、橋やトンネルなどの大型構造物の外観検査などにも応用が期待されている(国土交通省, 2014)。

マルチコプタに関する研究では、用途に応じて複数機体を制御して協調動作を行う研究(久保, 2014)や協調探索の研究(伊藤, 2013)、3次元地図を作成する研究(小花和, 2014)、制御とデータ処理の専用基板の開発(此村, 2013)、自動化による低コスト化を目指した研究(久保, 2006)など、枚挙に暇がないほど多数の研究が実施され、雑誌や論文等で報告されている。このような技術革新に支えられて、空撮技術も日々向上している。

ローイングの空撮に関しては、滋賀県大津市の琵琶湖畔に本拠を置く特定非営利活動法人の瀬田漕艇倶楽部が2014年11月24日に開催したHead Of The Seta 2014において実施例がある。映像は、空撮を専門とする会社が委託業務として撮影し、動画配信サイトのYouTubeに公開されている。Head Of The Setaは、ボストンのチャールズ川で開催されるHead Of The Charlesを端に発する日本版のレガッタであ

り、瀬田川で開催されている長距離ボートレースである。公開されている映像を視聴する限り、レース全体の空撮を目的としており、ローイング中のボートには接近して撮影していないようである。

マルチコプタと空撮

マルチコプタの種類

マルチコプタとは、放射状に配置される複数のロータを回転させて、それらによって生じる揚力を利用して飛行するヘリコプタである。通常のシングルロータ式ヘリコプタに比べて機体の姿勢制御が容易であり、安定した飛行が可能である。一般にロータの枚数により名称が異なり、現状では4, 6, 8枚の機体が多い。ロータ数が少ないほど機体の運動性は高く、多くなるほど安定性が高い。ロータ数による特徴を以下に示す。

4枚ロータのクアッドコプタは、軽量で運動性が高い反面、安定性が低い。モータ間の軸間は500mm以下の機体が多い。クアッドコプタは、何らかの不具合により1枚のロータが停止すると、直ちに制御不能となり墜落する。また、積載重量(ペイロード)が小さいため、大型のカメラや大容量のバッテリーを搭載することができない。

6枚ロータのヘキサコプタは、前述のクアッドコプタと後述のオクトコプタの中間の運動性と安定性を併せ持つ。軸間は500mmから1,000mm程度までと幅広い。軸間800mm以上の大型機体であれば十分なペイロードがあり、大型のカメラと大容量バッテリーを併用することで、長時間の空撮が可能となる。1枚のロータが停止した場合は旋回制御を失うが、クアッドコプタと違って飛行を続けることができる。その後の適切な操縦により、着陸へと導くことで、安全に回収できる。

8枚ロータのオクトコプタは、更に大きいペイロードと安定性がある。軸間が1,000mm以上の機体は大半がオクトコプタである。映画撮影などで用いられる本格的なカメラ機材を搭載して、高画質映像の撮影などに用いられる。また近年は、特殊なセンサを搭載して、大型建造物の外観検査などにも応用が広がっている。ロータ数が多いため、仮に飛行中に

1枚のロータが停止しても、飛行を続けることができる。一方、大型機体は、重量が増す分だけ、墜落時の危険性が大きくなる。

マルチコプタによる空撮

マルチコプタはここ数年で急速に普及した。マルチコプタ以外の空撮方法として、凧や気球は長時間飛行が容易であるものの、風の影響を受けやすく、撮影の自由度が低い。有人ヘリコプタは、悪天候でも飛行でき大型の機材の運用も容易であるが、離着陸場所やコストで大きな制限が生じる。ラジコン固定翼機は比較的安価で、自由度の高い撮影が可能である。一方、操縦には熟練した技術が求められる。また、初心者が被写体を正確に捉えることは非常に困難なうえ、飛行速度も速いため安全性に欠ける。一方、マルチコプタはGPS(Global Positioning System)による位置制御、加速度センサやジャイロスコープによる精密で安定した姿勢制御、フライトコントローラによる自動航行システムにより、初心者でも容易かつ低コストで質の高い空撮が実現できる。なお、これらのセンサは、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術により小型基板上に一体実装されている。

空撮用カメラ

マルチコプタに搭載する空撮用カメラには、高画質に加えて、ペイロードとの関係から軽量なものが求められる。本研究ではGoPro社のHERO3を使用した。カメラの外観を図2(a)に示す。カメラのサイズは、幅59mm、高さ40.5mm、奥行30mmで、本体重量は74gである。解像度1,920×1,080 pixelsのハイビジョン映像が、最大60fpsのフレームレートで取得できる。なお最新モデルのHERO4では、4K解像度の映像が30fpsで取得できる。

GoPro社のカメラが空撮用に広く使われている理由には、軽量・高画質に加えて、タブレット用アプリケーションのGoPro Appや動画編集ソフトウェアGoPro Studioが無償で利用できる点にある。前者はWi-Fiを利用してカメラ操作を行うことができるため、空撮中のカメラの遠隔操作や撮影映像をリアルタイムで確認できる。ただし、Wi-Fiで使われる2.4

GHz 帯はプロポの周波数と同じ帯域のため、混信などの影響で伝送距離は実質 100 m 程度と短い。後者は撮影した動画を編集するためのソフトウェアであり、本研究では GoPro の魚眼特性を除去するために使用した。

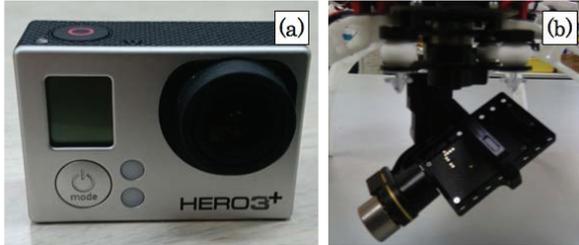


図2 空撮用のカメラシステム. (a)アクションカメラ GoPro HERO3, (b)3 軸ブラシレスジンバル

カメラジンバル

機体にカメラを直接固定すると、モータやロータの回転により発生する振動の影響を受け、映像の画質が落ちる。特に空撮では、画面が揺れるローリングシャッタ現象が生じる。さらにマルチコプタは移動の際に機体が傾くため、カメラが固定されていると、機体と同じだけカメラも傾くことになり、被写体を画面中心に収めることが困難になる。カメラジンバルはこれらの問題を改善する装置である。

本研究で使用したカメラジンバルを図 2 (b)に示す。ジンバル本体は、モータの振動を吸収するゴム製ダンパにより機体に接続されている。ジンバル内の加速度センサとジャイロスコープにより 6 軸方向での傾きと変位を計測し、ブラシレスモータの制御によってカメラの角度は一定に保たれる。制御軸数は 2 軸と 3 軸があり、後者であれば、横方向の動きにも対応できるため、より質の高い映像を撮影することができる。ただし、ジンバルは小型カメラ用でも 300 g 程度の重量があるため、使用の際には飛行時間や機体の重心位置への考慮が必要となる。

機体の製作

製作機体

本試作では、enRoute 社製の大型機である Zion Pro800 を製作した。製作機体の外観を図 3 に示す。

モータの対角間隔は 800 mm、フレームにはカーボンが使用されており、乾燥重量は 2.6 kg である。ロータは 15 インチ径を使用した。ペイロードはバッテリーを含めて約 5 kg である。飛行時間は 1,000mAh の LiPo バッテリーで 15 分程度となる。

本研究では調整済みの完成機体ではなく、フレームセットを購入して組み立てた。Zion Pro800 はねじ止めだけで製作できる。このとき、振動によるねじのゆるみを防ぐために、ねじロック剤を使用した。本製作では中強度のねじロック剤（ヘンケル製 LOCTITE 243）を使用した。中強度であれば、メンテナンス時に取り外すことができる。

モータの回転数は電流量で決まる。バッテリーから送られてくる電流量を制御する ESC (Electric Speed Controller) は、各モータに個別に取り付けた。最大容量は 40A で、フライトコントローラへの電源供給に対応する BEC (Battery Eliminator Circuit) 機能を備えた ESC を用いた。フライトコントローラには 3D Robotics 社製の APM 2.6 を用いた。前述の BEC は APM 2.6 の A0 端子に接続した。フライトコントローラは、飛行中に振動の影響を受けると、飛行制御に悪影響を与える。この対策として APM 2.6 の底部にスポンジシートを敷設した。

GPS はノイズの影響を受けやすく、不安定さや暴走の一因になる。このため、GPS はフライトコントローラから 10 mm 以上離して配置した。また、GPS のアンテナには方向性があり、機体の向きと一致した状態で取り付ける必要がある。ソフトウェア内で誤差を入力して補正することも可能であるが、詳細に調整できないため、製作の際に正確な取り付けが肝要となる。



図3 製作したヘキサコプタ (Zion Pro800)

機体の重心

機体の重心位置は、全てのモータから等しい距離で、かつモータと同じ高さが理想である。重心位置から各モータへの距離が不均等になる場合、重心に近いモータが過負荷となり、バッテリーの消耗が大きくなる。また、重心がモータより高い、あるいは低い位置にあると、機体が傾いた際の復元に要するモータの負荷が増える。

空撮に使用するマルチコプタは、視野範囲を確保するため前方にカメラを搭載する。このため、重心が機体前方に設定されやすい。この際、バッテリーの設置位置を前後に移動できる構造にすることで、使用するカメラの重量に合わせて重心が調整できる。本試作では、図4に示すレールシステムを採用することで、カメラやバッテリーの変更による重心位置の調整を簡素化した。



図4 カメラ取り付け用レールシステム

ブラシレスモータ

ブラシレスモータのメンテナンスは、機体の安定性にとって最重要である。ブラシレスモータはメンテナンスが不要といった情報も多いが、安定したフライトを行うためにはメンテナンスは必須である。本試作で使用したブラシレスモータを図5に示す。メンテナンスのために、モータ底部のEリングを外すことで分解できる。内部に砂などの異物が入っていると動作に悪影響を与える。また、新品でも異物が混入している場合もある。その際は、アルコール性のエアダストクリーナを使用して取り除く。

次に、モータを軽く手で回した際、他の物と比べて回転が固い場合や、1~2mm程度の遊びがある場合は、そのまま使用するとモータに負担がかかる。この調節には、シャフトを固定しているイモねじを緩め、適切な位置で再度固定する。なお、一部のモータはシャフトが固定されているため、前述の方法

で調整することができない。この場合は、モータの底部とEリングの間に入っているワッシャで、締め付け強さを調整する。このようにワッシャを交換し、厚さを変えることで、モータの遊びが調整できる。

ブラシレスモータにはベアリングが上下に1個ずつ、計2個入っている。これらはフライトを行うごとに劣化し、50~60時間ほどで交換が必要となる。ベアリングには、グリスまたはオイルを注油し、回転を滑らかにする。グリスまたはオイルの選定は、基本的にメーカーの指定油を使用するのが無難である。なお、オイルは回転の際の抵抗が少ないが、グリスよりも頻繁に注油しなければならない。



図5 ブラシレスモータ (Zion 4631-330KV)

飛行試験と墜落事故

飛行環境

マルチコプタの操縦に用いるプロポは、2.4 GHz帯の電波が使用されている。日本国内では、10 mW以下の出力であれば、免許不要で利用できるよう開放されている帯域である。同帯域は、無線LANでも利用されている。障害物や混信する電波がない場合、信号は1 km程度まで到達する。

通常、電波が一定時間途切れるとフェイルセーフモードが起動し、フライトコントローラに組み込まれたロジックにより、離陸地点に自動帰還する。ただし、断続的に電波が途切れる場合は最も危険である。フライトコントローラは、短い間隔で電波の切断と回復を繰り返すため、フェイルセーフモードが正常に動作せずに、手動による操作もできない状況に陥る。そして、最悪のシナリオとして、暴走を引き起こし、予期せぬ場所に墜落する。

電波塔の近辺では混信などの電波障害が発生しやすい。また、電源線や変圧器等のノイズ発生源の近辺でも同様に危険であるため、飛行前に周囲の電波環境を十分に確認しなければならない。なお、秋田県立大学本荘キャンパスの電波環境は極めて悪く、数メートルの飛行で通信不能となる事態が何度も発生した。本学に限らず、理工系の大学のキャンパスは、研究や実験用の様々な電波が飛び交っているため、マルチコプタの飛行には不向きと考えられる。なお、本学の大潟キャンパスは、電波環境が極めて良好で、常に安定した飛行が実現できている。

飛行試験

2014年9月21日、大潟キャンパス・アグリビジネス学科の研究施設棟に面する中庭において、図3に示す試作機の1回目の飛行試験を実施した。当時の天候は晴れで、風はなかった。飛行試験では以下の8項目を確認事項とした。

- ・離陸前のGPSの捕捉
- ・離陸時の垂直上昇特性
- ・操縦入力に対する機体の反応
- ・ホバリングの安定性
- ・急操作を繰り返した際の姿勢の安定性
- ・直進時のズレ量
- ・位置制御
- ・フェイルセーフ機能の確認

試作した機体は、ペイロードが5kgであったのに対して、カメラ等の機材を搭載せず飛行させたため、離陸後直ちにスロットル操作が不安定になった。具体的には、プロポのスティックを少し動かすだけで急上昇し、ホバリングで停止できない状態になった。これは機体の不具合ではないため、プロポ側でスロットルの最大値を調整することで対応した。また、目測で傾きが認められるモータが1個あった。フレームを分解してカーボンパイプの取り付け穴を確認したところ、本体とモータの取り付け穴に2度のズレが生じていた。メーカーに返送したが、許容範囲という回答であった。ただし、ホバリングの際に一定の位置で機体が停止せず、渦を描くような軌跡で飛行するという現象が発生した。このフレームの取り付け位置を変更して対処した。

墜落事故

GPS アンテナの取り付けを修正して、2回目の飛行試験を実施した。実施日は同年10月18日で、同キャンパスのフィールド教育センター内の圃場に場所を移して飛行試験を実施した。

離陸直後は、姿勢制御による高度2~3mでの安定したホバリングを確認した。また、1回目の飛行試験で生じたウォーターボール現象は発生しなかった。その後15m程度垂直に上昇させると、機体が右方向に流れ始めた。スロットルの制御もやや不安定で、一定高度に留まることができなかった。この時点で離陸地点から目測で300m程度離れていた。手動操縦での安全な回収が困難と判断したため、離陸地点に自動帰還するRTLモードを起動した。RTLモードに設定されている通りに、起動時に15mの上昇の後、自動飛行を開始したが、途中で進行方向が急に切り替わった。このとき、RTLモードの解除を入力したが、操作は復旧せず、数秒後に機体を見失った。時刻は、午後4時頃であった。見失った後、日没まで捜索を続けたが、機体を見出すことはできなかった。一夜明けて捜索を再開したが、発見できなかった。

墜落から5日後の10月23日、同圃場内で墜落機体を見つけた。機体は大破していた。発見時に撮影した機体を図6に示す。フレーム2本とスキッドが破損していた。発見に至るまで、雨天の日もあった。墜落時にバッテリーが外れていたことに加えて、機体の天地が逆になり、フライトコントローラに雨が直接当たっていないようであった。サビは発生していたが、モータやESC、APMは再使用可能な状態であったことが、不幸中の幸いであった。バッテリーは膨らみが発生しており、再使用は危険な状態であった。

事故原因の考察

今回の暴走と墜落には、2つの原因が考えられる。1つ目はソフトウェアのバグである。GPSを使用した飛行中に生じる「Loiter and RTL crashing bug」と呼ばれるバグが、インターネット上のコミュニティサイトに報告されていた。今回の事故は報告されている状況と類似しているが、本機体はこのバグに対応した最新のファームウェアに更新していた。した



図6 墜落した機体の発見時の様子

がって、このバグによる墜落とは断言できない。

2つ目はGPSの異常が疑われる。APM 2.6はGPSの電波が受信できない場合に、モータの安全装置が解除されないことがある。ただし、今回の暴走では、RTLモード起動時に離陸地点にまで戻ろうとしたことから、暴走の直前まではGPSが正確に動作していたと考えられる。一方、APM 2.6に残っていたフライトログは離陸地点の記録のみであり、それ以降のログはなかった。フライトログから判断する限り、暴走の原因はGPSの異常が考えられる。ただし、GPSの異常を引き起こした原因は不明である。

ローイング空撮実験

撮影対象

ローイングボートは、船底の形状によりシェル艇とナックル艇に大別される。シェル艇、ナックル艇という名称は船底の断面形状に由来し、前者が貝殻、後者が拳を形取っている。シェル艇の船底にはエッジがなく、同心円状であるため水の抵抗が少なく、ナックル艇より船速が高い。一方、ナックル艇は船底の中心にキールがあり、船側の喫水下に波切り用のチェーンが付いている。このチェーンが、ナックルである拳を連想させる。ナックル艇は、キールと左右のチェーンに入る3本のエッジにより水の抵抗が増えるものの、安定性が高まる。また、横幅が広くとられているため、シェル艇に比べてナックル艇

の船速は低い。

現在、国体やインターハイなどのボートの公式競技は、シェル艇のみの競漕となっており、ナックル艇は使われていない。ナックル艇による競漕は、国体は1990年、インターハイは1991年の正式種目から廃止になった。一方、市民レガッタの500mレースでは、今でもナックル艇が用いられている。秋田県由利本荘市では毎年9月に市民ボート大会の子吉川レガッタが開催されている。2015年は36回目の大会となり、毎年100クルー近くの参加がある。このため由利本荘市は多数のナックルフォア艇を保有しており、由利本荘市民もしくは市内に事業所を置く企業等の団体の従業員や職員であれば誰でも借艇できるため、気軽にローイングを楽しめる環境である。ただし、借艇には事前に団体登録が必要で、メンバーのうち1名以上の安全講習の受講が義務付けられている。

本研究では、ナックルフォア艇をマルチコプタによる空撮対象とした。ナックルフォア艇の外観を図7に示す。乗船定員は5名であるが、4名の漕手で漕ぐためフォアと呼ばれる。主要諸元を表1に示す。全長が10.77mに対して全幅は0.88mである。ただし、全長3m程度のオールが両舷に出るため、航行幅はオールのインボードを差し引いて6m程度となる。オールは、製造メーカーやインボードとアウトボードの比率設定によって長さが異なる。

艇の材質にはカーボンファイバが使われており、重量(排水量)は105kgである。本ナックル艇は、滋賀県大津市の琵琶湖湖畔に位置する桑野造船株式会社で製造された新艇である。現在、日本国内でナックル艇を製造するメーカーは、桑野造船株式会社とデルタ造船株式会社(埼玉県戸田市)の2社のみとなっている。なお、ナックル艇は日本独自の規格艇であるため、海外では見られない。



図7 ナックル艇の外観(陸揚げ状態)

表 1 ナックルフォア艇の主要諸元

全長	10.77 m
全幅	0.88 m
重量 (排水量)	105 kg
定員	5 名 (漕手 4 名, 舵手 1 名)

撮影条件

本実験では、表 2 に示す 3 パターンの構図で撮影実験を行った。パターン I の構図では、カメラを水平方向に固定して、水面から 1~2m の飛行高度を保ってローイングボートを追跡した。この視点は、コーチ用のモータボートからローイングボートを追跡して撮影する場合と同程度の高さになる。パターン II の構図では、パターン I より飛行高度を上げて、2~5 m の範囲で撮影した。カメラのチルト角は、被写体のボートが視野範囲内に入るように操縦者が操作した。操縦者の経験に基づいて目測で調整したが、概ね 45 度前後のチルト角となっていた。なお、カメラの無線 LAN 機能を使ってタブレット型コンピュータに映像を伝送して画角の調整を試みたが、2.4GHz の Wi-Fi では通信が安定せずに、映像がコマ切れになった。パターン III の構図では更に高度を上げて、5~10 m の高度から撮影した。カメラは鉛直下向きにして、ボート上空から撮影した。

撮影日は、2014 年 10 月 19 日 (日)、時間は午後 2 時から 5 時前まで、場所は子吉川ボートコース、天候は快晴・無風であった。子吉川ボートコースは子吉川の下流域に位置し、ボートコース沿いの河川敷は友水公園になっている。この公園から土手を挟んで、由利本荘市の河川利用総合レクリエーション施設として 1996 年にオープンしたアクアパル(秋田県由利本荘市北裏地 54-1) がある。撮影当日は、秋晴れが広がっていた。本学の薫風・満天フィールド交流塾が主催する秋のボート体験会に併せて本撮影を実施した。

前章で述べた通り当研究室で製作したマルチコプタは、前日に実施した試験飛行で墜落し損傷したため、本撮影では生物資源科学部アグリビジネス学科の生産システム工学研究室で所有するヘキサコプタの JABO H601G を用いた。H601G の外観を図 8 に示す。当該機は、同学部同学科において、圃場のリモ

ートセンシング用に導入されたヘキサコプタである。軸間が 550 mm の中型機であり、モータのオーバホールや機体のリビルド、カーボン製のロータへの交換等、カスタマイズとメンテナンスが入念に行われている。加えて、同キャンパスの圃場において 400 回以上のフライト実績を有しており、安定した飛行が確保されている。本撮影は人に接近するという高度な操縦技術が求められることから、操縦は本論文の著書のひとりである嶋田浩が担当した。操縦は河川敷から行い、ローイングボートは目測で追跡した。

表 2 空撮実験における撮影構図

構図	カメラチルト角	飛行高度
パターン I	水平	1-2 m
パターン II	45 度前後	2-5 m
パターン III	鉛直下向き	5-10 m



図 8 空撮実験に用いたマルチロータ (H601G)

撮影結果

パターン I の構図での空撮画像を図 9 に示す。(a) は右舷後方からボートを捉えた画像である。下流側に向かって、川全体が見渡せている。左舷からの回り込みを経て、真横からボートを捉えた画像を(b)に示す。更にボートに接近した画像を(c)に示す。4 名の漕手と 1 名の舵手が視野範囲内に納まっている。なお、コーチ用のモータボートでこのような構図から撮影を試みた場合、引き波の影響が懸念される。このため、通常は真横まで接近しないが、マルチコプタにはこのような心配がなく、最接近して並走できる。少し高度を上げて、ボードに最接近した画像を(d)に示す。モータボートでは得られない視点の画像が撮影できており、漕姿やオール動きを全体的に確認することができる。右舷後方に回り込み、更に高度を上げて撮影した画像を(e)に示す。オール先

端のブレードが入水する直前のキャッチ動作が上空から撮影できている。

続いて、パターン II の構図での空撮画像を図 10 に示す。マルチコプタの高度を上げて、後方からローイングボートを追いかけた。ナックルフォア艇の最大速度は 15 km/h 程度であるのに対して、マルチコプタは最大 30 km/h 程度の飛行速度があるため、容易に追いつくことができる。ボートとの距離を縮めて、後方上空から撮影した画像を(a)に示す。舵手と漕手全員が画像内に入っており、更に進行方向にも視界が開けている。2 艇のボートを追跡した際の画像を(b)に示す。この後、川の内側を航行するボートが、岸側を航行するボートに接近した。内側のボートが左舷側に舵を切って接触を回避したが、その時の様子が(c)に映っている。ナックル艇の舵は、船尾に半没する形で取り付けられている。舵を切ることにより、水泡を含む水の流れが生じていることが、画像から確認できる。本来、最大舵角は 30 度程度であるが、慌てた舵手が舵を切り過ぎたようである。(d)に示す画像には、左下に映るボートに対して、画像の中央より少し右側に釣りをしているゴムボードが浮かんでいる。子吉川にはカヌーや釣り用のゴムボートなど、大小様々なボートが出ている。マルチコプタを用いて、高い視点からこれらのボートをいち早く発見して位置関係を把握することで、衝突や接触事故を防ぐことができると考えている。(e)は更に高度を上げて撮影した画像である。子吉川全体が広範囲に映っている。

最後に、パターン III の構図での空撮画像を図 11 に示す。カメラを鉛直下向きにし、パターン II から更に飛行高度を上げた。(a)では、画像の右側にナックル艇が映っている。ナックル艇の全長は、10.77 m であることから、目算によるおおよその視野範囲の縦横は縦 15 m×横 25 m である。更に高度を上げつつ、機体をナックル艇の真上に移動させて撮影した画像を(b)に示す。同様にナックル艇の大きさから目算して、縦 30m×横 45m 程度の視野範囲である。(c)では 2 艇のナックル艇が視野範囲内に含まれている。栈橋に向けて接岸中の画像を(d)に示す。(e)は栈橋の片側にナックル艇が接岸されており、その反対側に接岸を試みている画像である。更にもう 1 艇のナッ



図9 パターン I (チルト角：水平，高度：1~2 m) の構図で撮影した画像の例

クル艇が、接岸のために栈橋に近づいている。シーズン中の混み合う季節やボートの大会では、このような複数台のボートが栈橋を行き交うため、上空からの映像は、ローイングボートの安全性の向上に寄与できると考えている。

考察と今後の課題

3次元空間を自在に動けるマルチコプタを用いることにより、様々なアングルからローイングボート及びローイング中の漕手の映像を撮影できた。ただし今回の撮影では、水上を飛行するマルチコプタを、熟練した操作者が陸上から目視により操縦していた。ローイングボートが静止している場合は近距離まで接近して撮影できるが、航行中の接近は操縦が極めて難しい。航行中のローイングボートは、加減速を繰り返す。ブレードが入水し漕手がオールを通じて水を押し続けている時は、ボートは加速を続ける。一方、ブレードが水中から離れ、次の入水に向けて空中を移動している際は、ボートは減速を続ける。スクリーンで推進力を得るモータボートや、両舷に対して交互にパドルを入れて推進力を得るカヌーとは異なり、一定の周期で加減速を繰り返しながらの航行は、ローイングボートの特性のひとつである。このため、一定の速度でマルチコプタがローイングボートに接近した場合、両者の距離は微妙な変化を繰り返す。マルチコプタの運動能力からすると、このような一定周期の加減速は容易に実現できる。ローイングボートの運動特性を正確にセンシングし、マルチコプタに自動的にフィードバックし制御するメカニズムについて、更なる検討を加えたいと考えている。

モータボートとマルチコプタでローイングボートの追跡能力を比較した場合、実験結果で示したように、前者は追跡範囲に限られるものの、後者は様々な位置から追跡できる。ボートの真横のみならず、前方や真上にも回り込むことができる。このため、様々な視点の映像を撮影することができる。一方、モータボートは引き波が発生するため、ローイングボートの後方のみからの追跡に限られる。追跡対象のボートに対して引き波が当たらないように配慮しても、他の場所を航行するボートに対して引き波を



図10 パターンII (チルト角: 45度前後, 高度: 3~5 m) の構図で撮影した画像の例

当ててしまうこともある。双胴型のカタマラン艇を用いることにより引き波は軽減されるが、導入コストに加えて、滑走艇ではないため、トップスピードが低くなるというデメリットが生じる。一方、マルチコプタのデメリットは飛行時間である。マルチコプタにはエネルギー密度の高い LiPo バッテリーが使われているものの、機体の総重量に対してバッテリーの重量の占める割合は最も高くなっている。また、バッテリーの容量にも依存するが、飛行時間は 10~20 分程度に留まっている。飛行時間を伸ばすためにバッテリーの積載数を増やした場合、ペイロードが落ちるなどのデメリットを引き起こす。福島原発のような極限環境でのセンシングを目的とするマルチコプタには、バッテリーを自動交換するシステム（野波, 2014）も開発されているが、導入コストが極めて高いため、ローイングのような応用では現実的ではない。したがって、飛行時間を確保する現実的な方策としては、複数のマルチコプタによりシームレスに連続して撮影することが考えられる。

本実験では、各構図での撮影が実現できたが、画面の中央に被写体が入るのは数秒程度である。移動する被写体を正確に撮影するには熟練した操縦が必要となる。一方、水上を航行するボートを陸上から視認してマルチコプタで追従するには限界がある。このため、FPV (First Person View) のシステムを導入することで、マルチコプタの視点からリアルタイムでボートを追従することができると考えている。FPV の導入により、撮影における精度の大幅な改善が期待できる。ただし、FPV はモニター上での 2 次元映像となるため、距離感の把握が難しくなる。ステレオ視や Kinect のような深度センサを用いることで奥行き情報を得ることができるが、このようなカメラはサイズと重量においてマルチコプタへの搭載が難しい。したがって、指向性が高いためセンシング範囲は限られるが、超音波や赤外線による距離センサを用いて、被写体までの距離を計測するシステムの導入が現実的な解決策と考えている。

最後に安全性について考察する。マルチコプタの飛行は、墜落の危険性と常に背中合わせである。飛行前には機体と飛行環境を入念に点検するが、墜落のリスクが完全にゼロとなることはない。センサの

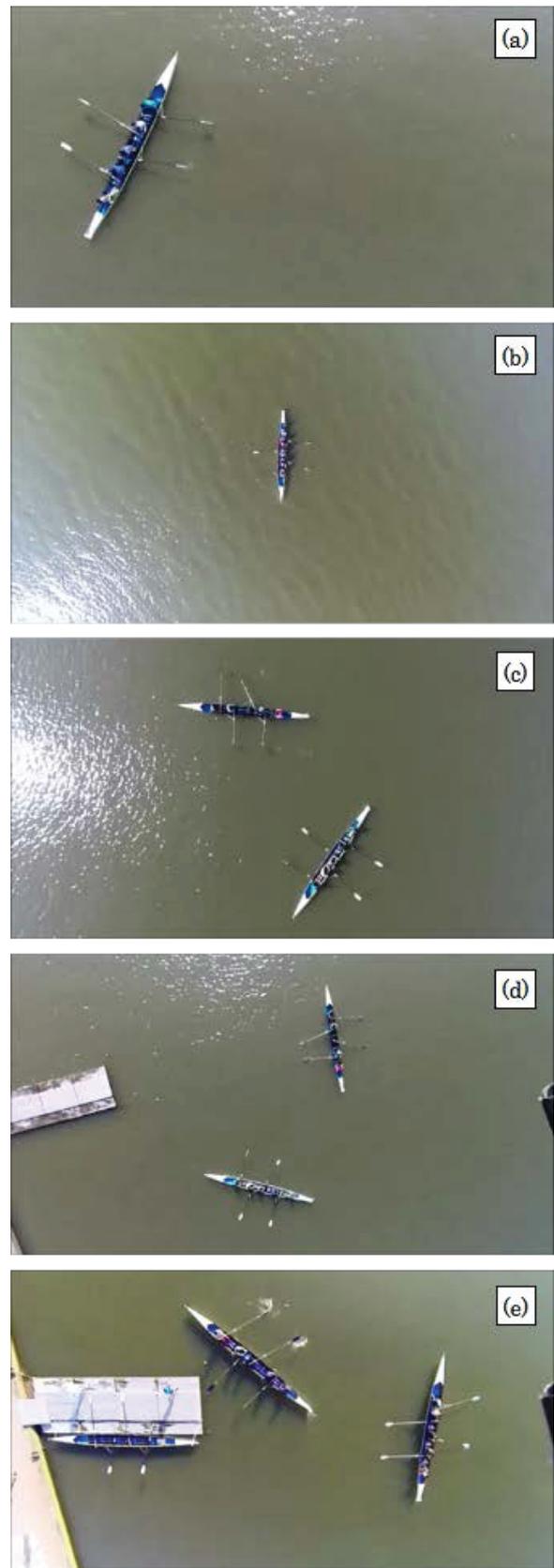


図 11 パターン III (チルト角:鉛直下向き, 高度: 5~10 m) の構図で撮影した画像の例

不良やバッテリーの突然死、妨害電波等、墜落の要因は枚挙に暇がない。墜落した際には機体の損傷のみならず、人物を被写体とするような撮影では、人間に衝突して危害を加える可能性もある。特に、大容量の電流を消費してブラシレスモータで高速に回転するロータが人体に接触した場合には非常に危険である。これに対しては、ガードを取り付けることにより、ロータへの接触による危険性が軽減できる。今回の撮影で用いたマルチコプタは、前述の通りリモートセンシングを主目的としているため、ロータガードは取り付けていない。ロータガードは安全性を確保するというメリットがあるものの、機体総重量が増すため、飛行時間が短くなるというデメリットを引き起こす。今後はロータガードが一体になったオリジナルの機体を設計し製作することを予定している。また、ローイングボートの追跡は水上での飛行となるため、ロータガードを発泡スチロール等の浮遊体で製作することにより、墜落時のマルチコプタの水没を回避できると考えている。

謝辞

秋のボート体験会は、薫風・満天フィールド交流塾の事業の一環として実施されました。子吉川での空撮実験において、被写体になって頂きました秋田県立大学本荘キャンパスの学生及び教職員の皆様に深く感謝申し上げます。本研究は、公益財団法人本荘由利産学振興財団によるベンチャー自主研究助成事業の助成を受けて実施されました。また、本研究は秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科の平成 26 年度卒業研究（三浦，2015）として実施されました。

文献

伊藤麻里，堀浩一（2013）。「複数小型 UAV による協調的空間探索」『人工知能学会全国大会論文集』27, 1-3.
 稲葉修二（2011）。「自律飛行可能なラジコン電動ヘリによる、番組用 HD 空撮の実現」『映像情報メディア学会技術報告』35(31), 41-44.

井上公，内山庄一郎，鈴木比奈子（2014）。「自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術」『防災科学技術研究所研究報告』81, 61-98.
 小花和宏之，早川裕弐，ゴメス・クリストファー（2014）。「UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング」『地形』35(3), 283-294.
 久保大輔（2014）。「複数 MAV 協調運用による複雑任務対応能力の研究：複数の小型無人航空機が協調して一つの任務を行う」『JAXA 航空マガジン』8-9.
 久保大輔，長坂直樹，小林琢也，バヨッド・ハビエル，初鳥陽一，巻俊宏，長谷川洋介，鈴木真二（2006）。「垂直上昇飛行ロボットを用いた低コスト空撮システムの提案」『交通・物流部門大会講演論文集』15, 371-374.
 国土交通省（2014）。「プレスリリース：平成 27 年度次世代社会インフラ用ロボット（橋梁維持管理）「現場検証対象技術」の決定」.
 此村領，堀浩一（2013）。「オンボード処理・超小型クアッドロータロボットのハードウェア・ソフトウェアの設計・製作」『人工知能学会全国大会論文集』27, 1-4.
 野波健蔵（2014）。「飛行ロボットによる調査」『日本機械学会誌』117(1151), 18-19.
 間所洋和，勝又健太郎，佐々木優，阿部陽子，小助川弘勝（2014）。「市民レガッタにおける漕艇理論とレース戦略：県大クルーの取り組みを通じて」『秋田県立大学ウェブジャーナル A（地域貢献部門）』1, 83-94.
 三浦立（2015）。「ローイングの安全を支援するマルチコプタの試作開発」『秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科平成 26 年度卒業研究』1-54.

〔平成 27 年 11 月 30 日受付〕
 〔平成 27 年 12 月 10 日受理〕

Development of Multirotor for Aerial Photography of Rowing: A Flight Test and Aerial Photography Experiment

Hirokazu. Madokoro¹, Tatsuru. Miura¹, Hiroshi. Shimada², Yuki. Terata³, Kazuhiro. Sato¹

¹ *Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

² *Department of Agribusiness, Faculty of Bioresource Sciences, Akita Prefectural University*

² *Department of Electronics and Information Systems, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

This paper presents technical information about aerial photography and the use of a multirotor. This study aims to support safety rowing as an application in a multirotor. Rowing is a water sport. Managers and coaches instruct rowers and a cox that observe from a motorboat. When using a motorboat for tracking, various problems occur such as pulling waves, limitation of viewpoints, a single tracking target, and fuel and maintenance costs. Cox-less rowing boats are at risk of crashing into other rowing boats, canoes, or obstacles. Recently, multirotors, which utilize lifting power generated from rotors arranged radially, have popularized very rapidly. Moreover, aerial photography that uses multirotors has spread widely not only for research purposes such as remote sensing but also for commercial and hobby uses. Multirotors can provide a low cost and easy realization of aerial photography when compared to conventional aerial techniques. For this study, we conducted aerial experiments at a rowing event in autumn. At the experiment, we took photos of rowing boats at angles of three patterns to change the height of the multirotor and the camera. We discussed the features of the images taken by each angle. Moreover, we examined the future direction towards the improvement of aerial photography and its superiority.

Keywords: rowing, multirotor, aerial photography, camera, gimbal