

自律型アオコ除去システム

荒井 研一^{1,a)} 中島 良太¹ 今井 哲郎¹ 小林 透¹

受付日 2019年6月16日, 採録日 2019年11月29日

概要: 地球温暖化の影響で、湖沼などの環境悪化をもたらすアオコの増殖が問題となっている。アオコ除去装置はこれまでいくつか開発されてきているが、これらの装置は、使用に手間がかかる点、作業者に危険がともなう点、作業範囲に限られる点が問題となっていた。本研究では、ドローンと自走型アオコ除去ロボット、クラウドサーバを連携させることで、アオコの発生場所を自動で検知し、自律的にアオコを除去する自律型アオコ除去システムを提案する。本システムの特徴は、タブレット PC を用いてドローンと自走型アオコ除去ロボット、クラウドサーバを連携させることで、アオコの発生場所を自動で検知し、自律的にアオコを除去できる点である。本システムではアオコの発生場所を自動で検知する必要があるため、アオコの有無を判定するアオコ判定システムの精度評価を行うことは、本システムを評価するうえで重要である。本論文では、アオコ判定システムにおけるアオコ判定方法を提案し、その評価結果を示す。

キーワード: IoT, ドローン, 自走型アオコ除去ロボット, アオコ判定手法, CNN, RGB 画像, 近赤外線画像

Independent Algal Bloom Removal System

KENICHI ARAI^{1,a)} RYOTA NAKASHIMA¹ TETSUO IMAI¹ TORU KOBAYASHI¹

Received: June 16, 2019, Accepted: November 29, 2019

Abstract: Due to the impact of global warming, increase of algal bloom, which causes deterioration of environment of lakes and marshes, is becoming a problem. Several algal bloom removal devices have been developed. However, these devices have problems with troublesome usage of removal devices, dangerous work process, and limited operation area. In this study, we propose an independent algal bloom removal system that can remove algal bloom independently through automatic detection of where they are occurring by coordinating a drone, an automated algal bloom removal robot, and a cloud server. The characteristic aspect of this system is the fact that it can detect where algal bloom is occurring automatically by using a tablet PC to coordinate a drone, an automated algal bloom removal robot, and a cloud server in order to independently remove algal bloom. As this system requires automatic detection of where algal bloom is occurring, it is extremely important for the evaluation of this system to assess the performance of the algal bloom determination system which determines if there are algal bloom or not. In this paper, we propose a method for algal bloom determination in the algal bloom determination system and show the evaluation results.

Keywords: IoT, drone, automated algal bloom removal robot, algal bloom determination method, CNN, RGB image, near infrared image

1. はじめに

地球温暖化の影響で、湖沼などの環境悪化をもたらすアオコの増殖が問題となっている。アオコとは、窒素やリン

によって富栄養化が進んだ湖沼において植物プランクトンの藍藻類（ミクロキスティスなど）が異常増殖して、水の表面が緑色の粉を吹いたような状態のことである。アオコが大量に発生すると、緑色のペンキに喩えられるほど色が濃くなり、湖沼の景観が損なわれてしまう。それだけではなく、湖沼の岸辺に吹き寄せられたアオコが腐って強烈な悪臭を放つ。さらに、水道水源の湖沼にアオコがあると、水

¹ 長崎大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagasaki University,
Nagasaki 852-8521, Japan
^{a)} k.arai@cis.nagasaki-u.ac.jp



図 1 自律型アオコ除去システムの概要

Fig. 1 Overview of independent algal bloom removal system.



図 2 自走型アオコ除去ロボットの稼働時の様子

Fig. 2 Automated algal bloom removal robot in operation.

中からゴミなどを除く過作業の障害となるため、浄水処理の効率が下がってしまう。実際に、アオコに含まれる毒素被害は世界的に発生しており、水道水源への影響による健康被害や生活用水制限が報告されているため、アオコ対策への取り組みは世界規模の重要な課題となっている [1]。

アオコ除去装置はこれまでいくつか開発されてきているが、これらの装置は、使用に手間がかかる点、作業者に危険がともなう点、作業範囲が限られる点が問題となっていた。そこで、本研究では、ドローンと自走型アオコ除去ロボット、クラウドサーバを連携させることで、アオコの発生場所を自動で検知し、自律的にアオコを除去する自律型アオコ除去システムを提案する。本システムの特徴は、タブレット PC を用いてドローンと自走型アオコ除去ロボット、クラウドサーバを連携させることで、アオコの発生場所を自動で検知し、自律的にアオコを除去できる点である (図 1)。自走型アオコ除去ロボットの稼働時の様子を図 2 に示す。

本システムの実現により、アオコの発生場所を自動で探知し、自律的にアオコを除去できるため、従来のアオコ除

去装置では問題となっていた、使用に手間がかかる点、作業者に危険がともなう点、作業範囲が限られる点を解決することができる。

本システムはアオコの発生場所を自動で検知する必要があるため、アオコの有無を判定するアオコ判定システムの精度評価を行うことは、本システムを評価するうえで重要である。そこで、本論文では、アオコ判定システムにおけるアオコ判定方法を提案し、その評価結果を示す。

なお、本研究においては、アオコを除去 (掃除) することが目的であり、アオコであると目視ではっきりと確認できるアオコを除去対象としている。よって、本研究では、アオコであると目視ではっきりと確認できるものをアオコとする。具体的には、国立環境研究所によって提案された指標である「見た目アオコ指標レベル [2]」を参考に、アオコであると目視ではっきりと確認できるレベル 3 以上のものを「アオコ有り」としている。見た目アオコ指標レベルは、だれでも簡単にアオコの状況を目視で確認することができるため、近年、ダムや湖沼の管理者が日常巡視の中でアオコの状況を確認する方法として利用されている。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章では既存研究と本研究との違いを示す。3 章では本システムの詳細を示す。4 章ではアオコ判定システムにおけるアオコ判定方法およびその評価結果について示す。5 章ではまとめを述べる。

2. 既存研究

これまでに、アオコ除去装置として MIZUMORI (熊本大学) [3] が開発されている。しかしながら、この従来装置には、いくつかの問題点があった。

第 1 に、従来装置の使用には手間がかかる点である。従来装置はアオコの発生場所へ作業者が直接ボートに乗って運搬・設置・回収しなければならないため、従来装置の使用には手間がかかるといった問題があった。さらに、従来装置は大型であるため、従来装置の使用に人的稼働を必要としていた。

第 2 に、従来装置は作業者に危険がともなう点である。作業者はボートに乗って作業しなければならないため、作業中にボートが転覆する危険がある。アオコには毒素が含まれることがあるため、作業者が湖沼に転落してしまい、誤って水を飲んでしまうと健康被害をもたらす可能性があった。

第 3 に、従来装置は作業範囲が限られる点である。従来装置の作業範囲は装置周囲のみであるため、作業範囲が限られるといった問題があった。よって、アオコが所々に発生している場合には、アオコの発生場所に合わせて装置を移動させる必要があった。

また、その他の従来装置としてアルジー・ハンター (エビスマリン株式会社) [4] が開発されている。しかしなが

ら、アルジー・ハンターは、固定型かつ大型の装置であるため、そもそも装置が移動できない。よって、作業範囲が限られるといった問題があった。

本システムでは、ドローンと自走型アオコ除去ロボット、クラウドサーバを連携させることで、アオコの発生場所を自動で探知し、自律的にアオコを除去できるため、従来装置では問題となっていた、使用に手間がかかる点、作業者に危険がともなう点、作業範囲が限られる点を解決することができる。

一方、画像からアオコの発生場所を検出することを目的とした研究がある。たとえば、デジタル画像を用いた「見えた目アオコ指標」の自動判定の試み [5] では、デジタル画像の RGB 値を用いて、撮影地点に発生しているアオコの見た目アオコ指標に基づくアオコレベルを自動判定する仕組みを提案している。しかしながら、RGB 値によるアオコ検出では、アオコの緑色とその他の植物や湖沼の底にある腐敗層の緑色との区別がつきにくいといった問題があった。本研究では、デジタル画像としてドローンに付属しているカメラの RGB 画像と赤外線カメラを装着した Raspberry Pi をドローンに装着して撮影した近赤外線画像の 2 種類を併用することでこの問題を解決している。

さらに、リモートセンシングによる釧路 3 湖沼の富栄養化状態の把握 [6] では、人工衛星によるリモートセンシングによって湖沼のアオコが発生しやすい条件となる富栄養化状態を調査する手法を示している。しかしながら、衛星画像ではアオコが発生している状況をリアルタイムに把握することは困難である。また、解像度の点からもアオコの発生場所を細かく確認することは困難である。本研究では、ドローンを用いてリモートセンシングを行うことでこれらの問題を解決している。

3. 自律型アオコ除去システム

3.1 システム要件

本システムを実現するための要件を以下に示す。

- 要件 1: ドローンを用いてアオコの発生場所を自動で検知できる。
- 要件 2: 自走型アオコ除去ロボットがアオコの発生場所へ自動で移動できる。
- 要件 3: 自走型アオコ除去ロボットがホームポジションへ自動で帰還できる。
- 要件 4: 自走型アオコ除去ロボットを遠隔から操作・監視できる。

本研究では、要件 1 を満たすために「ドローンアプリケーション」と「アオコ判定システム」を開発し、要件 3 および要件 4 を満たすために「自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステム」を開発した。要件 2 については、ドローンアプリケーションとアオコ判定システムによりアオコの発生場所を自動で検知し、アオコの発生場所を

自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステムに送信することで、自走型アオコ除去ロボットがアオコの発生場所へ自動で移動できる仕組みを実現している。すなわち、ドローンアプリケーション、アオコ判定システムと自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステムを連携させることで、要件 2 を満たすシステムを開発している。なお、ドローンアプリケーションは、Android OS 用アプリケーションとして開発しており、その開発には DJI Mobile SDK [7] を用いている。

また、本研究では、自走型アオコ除去ロボットとして、長崎大学とエビスマリン株式会社とで共同開発したものを採用している [8]。この自走型アオコ除去ロボットは、「タブレット PC を用いてアオコの発生場所を手動で指定し、そこまでの移動経路を手動で設定可能な遠隔操作システム」、「障害物を検知し、自動で衝突を回避する障害物検知・回避システム」、「アオコに超音波を照射することでアオコ内の気泡を破壊し、浮遊機能を低下させ沈降させることでアオコを除去するアオコ処理システム」、「水面に浮遊するゴミなどの絡み防止を考慮したひれ型推進システム」、「太陽光発電による電源システム」を備えている。この自走型アオコ除去ロボットは、アオコの発生場所を目視で確認し、タブレット PC を用いてアオコの発生場所を手動で指定する必要があった。そこで、本論文では、タブレット PC を用いてこの自走型アオコ除去ロボットとドローン、クラウドサーバを連携させることで、アオコの発生場所を目視する必要がなく、アオコの発生場所を自動で検知できる自律型アオコ除去システムを提案する。

3.2 基本システム構成

本システムは、ドローンと自走型アオコ除去ロボット、クラウドサーバとそれらを連携させるタブレット PC から構成されている。タブレット PC、クラウドサーバ、自走型アオコ除去ロボットには、それぞれ著者らが開発したドローンアプリケーション、アオコ判定システム、自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステムが実装されている。なお、自走型アオコ除去ロボットには、シングルボードコンピュータの Raspberry Pi が搭載されており、その Raspberry Pi 上でナビゲーションシステムが実装されている。

本システムでは、タブレット PC 上でドローンによる撮影範囲を設定し、その撮影範囲をドローンが自動で飛行することで、上空からアオコの発生状況を撮影する。撮影された航空写真は、その撮影地点の位置情報とともにタブレット PC を経由してクラウドサーバに送信される。クラウドサーバでは CNN (Convolutional Neural Network) [9] を用いて画像認識を行い、アオコの発生地点を特定する。特定されたアオコの発生地点は、タブレット PC を経由して自走型アオコ除去ロボットに送信される。自走型アオコ

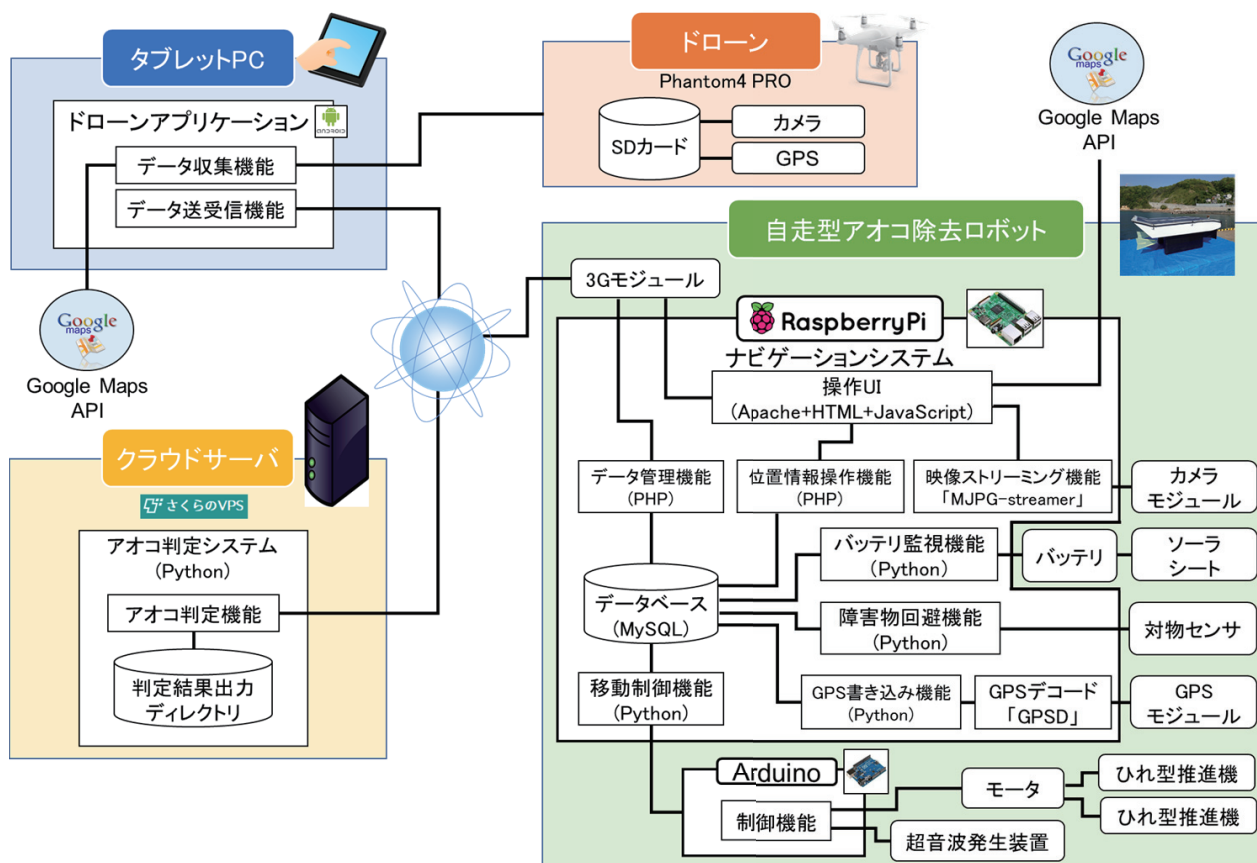


図 3 プロトタイプシステムのシステム構成
Fig. 3 System configuration of prototype system.

表 1 プロトタイプシステムのハードウェアとソフトウェア仕様
Table 1 Specifications of hardware and software of prototype system.

	タブレットPC	ドローン	クラウドサーバ	自走型アオコ除去ロボット
ハードウェア	• HTC Nexus 9	• DJI Phantom 4 PRO	• CPU: Intel® Xeon® CPU E5-2640 0 @ 2.50GHz • Memory: 4G	• Raspberry Pi 2 Model B
ソフトウェア	• Android 7.1.1 • DJI Mobile SDK for Android 4.7 • Android Studio 2.3.3		• CentOS 6.9 • Python 3.6.6	• Raspbian GNU/Linux 7.8 (wheezy) • Python 3.2.3 • PHP 5.4.45 • Apache 2.2.22 • MySQL 5.5.46

除去ロボットは、アオコの発生地点に基づき自律的にアオコを除去する。アオコの除去が完了後、自走型アオコ除去ロボットは自動でホームポジションへ帰還する。

3.3 プロトタイプシステム

自律型アオコ除去システムのプロトタイプシステムにおけるシステム構成を図 3 に示す。次に、プロトタイプシステムのハードウェアとソフトウェア仕様を表 1 に示す。

3.3.1 タブレット PC

タブレット PC (Nexus 9) には、ドローンアプリケーションが実装されている。本システムでは、タブレット PC 上のドローンアプリケーションを操作するだけで、ド

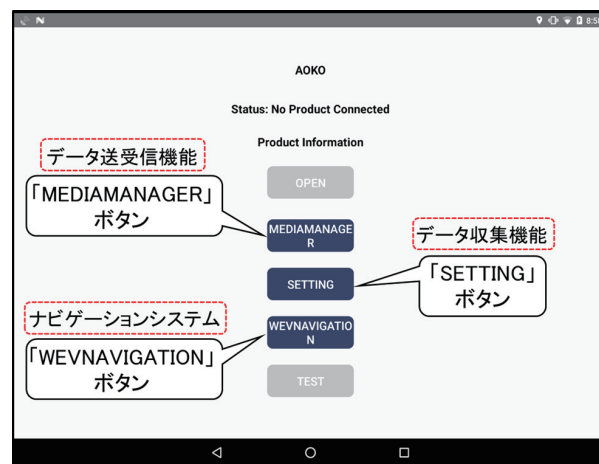


図 4 ドローンアプリケーション (トップ画面)
Fig. 4 Drone application (top screen).

ローンと自走型アオコ除去ロボット、クラウドサーバ間の処理を連携させることができる。ドローンアプリケーションは、“データ収集機能”と“データ送受信機能”の 2 つの機能から構成される。ドローンアプリケーション上の「SETTING」ボタンをタップすることでデータ収集機能が利用でき、「MEDIAMANAGER」ボタンをタップすることでデータ送受信機能が利用できる (図 4)。なお、ドローンアプリケーション上の「WEVNAVIGATION」ボタンを



図 5 ドローンアプリケーション (データ収集機能)

Fig. 5 Drone application (data collection function).

タップすると自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステムが利用できる (図 4)。自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステムについての詳細は、3.3.3 項を参照されたい。データ収集機能とデータ送受信機能についての詳細を以下に示す。

● データ収集機能

ドローンアプリケーション (図 5) 上の「ホームポジション」ボタンをタップし、Google マップをタップするとドローンのホームポジションが設定される。ここで、Google マップの表示には、Google Maps Platform (旧 Google Maps API) [10] を用いている。次に、「ポイント追加」ボタンをタップし、Google マップをタップすると、その位置が中心点となり、自動で撮影範囲 (プロトタイプシステムでは $300\text{ m} \times 300\text{ m}$) が設定される。撮影範囲が設定されると自動で撮影地点の位置情報、すなわち飛行経路が計算され、その飛行経路を Google マップ上に表示する。続いて、「アップロード」ボタンをタップすると、その飛行経路がドローンに送信される。その後、「START」ボタンをタップすると、その飛行経路に基づいてドローンが自動飛行し、上空からアオコの発生状況を撮影する。ドローンで撮影された航空写真はドローン本体内の SD カードに保存される。なお、ドローン (Phantom4 PRO [11]) には GPS が搭載されているためドローンで撮影された航空写真には、撮影地点の位置 (緯度・経度) 情報が EXIF 情報として記録される。

また、「設定」ボタンをタップすることで、ドローンの飛行高度・間隔・速度、撮影サイズ・画角を設定することができ、「STOP」ボタンをタップすることで、自動飛行を停止することができ (緊急時に使用)、「CHECK」ボタンをタップすることで設定情報を保存することができ、「現在地」ボタンでドローンの現在地を表示することができる。

● データ送受信機能

ドローンアプリケーション (図 6) 上の「Auto」ボタンの下部にあるチェックボタンは、自動処理項目を示している。「Auto」ボタンをタップすることで、上から順番に処理が実行される。チェックを外すことにより、その処理をスキップすることができる。



図 6 ドローンアプリケーション (データ送受信機能)

Fig. 6 Drone application (data transmission and reception function).

まず、「Auto」ボタンをタップすると、ドローン本体内の SD カードに保存された航空写真がタブレット PC に送信される。タブレット PC に送信後、SD カードに保存された航空写真は削除される。続いて、ドローンで撮影された航空写真をもとに CSV ファイルが作成される。その CSV ファイルには、航空写真のファイル名とその撮影地点の位置情報 (緯度、経度) が 1 行 1 地点の情報として保存される。その後、航空写真と CSV ファイルはクラウドサーバへ送信される。クラウドサーバに送信後、タブレット PC 内の航空写真は削除される。

航空写真と CSV ファイルをクラウドサーバに送信後、ドローンアプリケーションはクラウドサーバのアオコ判定システムを起動する。アオコ判定システムの詳細については、3.3.2 項を参照されたい。ドローンアプリケーションは、クラウドサーバのアオコ判定システムがアオコの発生地点を特定、すなわちアオコ判定結果ファイル (テキストファイル) が出力されるまで定周期でクラウドサーバの判定結果出力ディレクトリをチェックする。そのディレクトリにアオコ判定結果ファイルが出力されると、クラウドサーバからタブレット PC へアオコ判定結果ファイルが送信される。その後、タブレット PC から自走型アオコ除去ロボットへアオコ判定結果ファイルと CSV ファイルが送信される。

自走型アオコ除去ロボットへアオコ判定結果ファイルと CSV ファイルを送信後、ドローンアプリケーションは自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステムを起動する。自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステムの詳細は 3.3.3 項を参照されたい。なお、ドローンアプリケーション (図 6) 上のその他のボタン (「DELETE」, 「RELOAD」, 「DOWNLOAD」など) は、マニュアル操作用のボタンとなっている。

3.3.2 クラウドサーバ

クラウドサーバ (さくらの VPS) には、アオコ判定システムが実装されている。アオコ判定システムでは、CNN を用いて画像認識を行い、アオコの発生地点を特定する。アオコ判定システムの詳細を以下に示す。

アオコ判定システムは、まず、ドローンで撮影された各

航空写真を分割する．分割画像 1 枚あたりの大きさは，自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステムで自走型アオコ除去ロボットの移動可能領域を設定する際のメッシュの大きさ（プロトタイプシステムでは $5\text{m} \times 5\text{m}$ ）に相当する．なお，メッシュの大きさを $5\text{m} \times 5\text{m}$ にした理由は，自走型アオコ除去ロボットの旋回半径が約 2m であるため，真横への移動を考慮し余裕を持って 5m としている．次に，（航空写真のファイル名とその撮影地点の位置情報が保存された）CSV ファイルを用いて各分割画像の位置座標を算出し，その算出結果をテキストファイルに保存する．位置座標の算出方法についての詳細を以下に示す．

水面に対しての画角によって撮影範囲は変化するため，本システムではドローンのカメラを真下（水面に対して垂

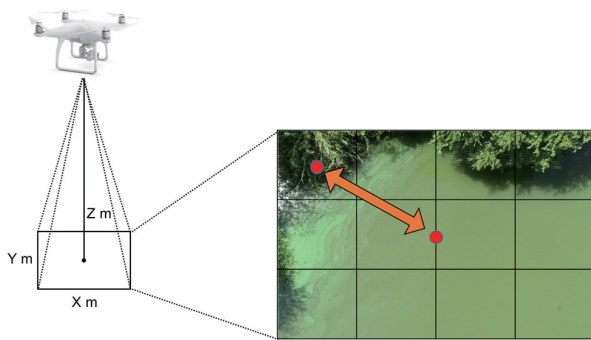


図 7 分割画像の位置座標算出イメージ

Fig. 7 Diagram for divided image location coordinate calculation.

直）に向けて撮影している．そのため，各航空写真の位置座標は航空写真の中心地点の座標に相当する．図 7 のように，航空写真の中心座標と相対的に各分割画像の位置座標を算出している．

続いて，アオコ判定システムは各分割画像に対して CNN を用いてアオコの有無判定を行う．CNN は畳み込み層やプーリング層を複数重ね合わせて計算するニューラルネットワークの 1 つである．判定方法についての詳細は 4 章を参照されたい．アオコ判定結果はテキストファイルに保存される．具体的には，そのアオコ判定結果ファイルには「アオコ有り」と判定された分割画像の位置座標が保存される．最終的に，クラウドサーバからタブレット PC へアオコ判定結果ファイルが送信される．タブレット PC に送信後，クラウドサーバのアオコ判定結果ファイルは削除される．

3.3.3 自走型アオコ除去ロボット

自走型アオコ除去ロボットには，シングルボードコンピュータの Raspberry Pi (Raspberry Pi 2 Model B) が搭載されており，その Raspberry Pi 上で自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステムが実装されている．図 8 は本ナビゲーションシステムのユーザインタフェースを示している．本ナビゲーションシステムは，Raspberry Pi 上に Web サーバを実装することで，Web アプリケーションとして構築している．さらに，Raspberry Pi には，カメラモジュール，GPS モジュール，バッテリー，対物センサ，3G モジュールが接続されているため，それらのセンサ情報を用いることで，自走型アオコ除去ロボットを遠隔から監視



図 8 自走型アオコ除去ロボット用ナビゲーションシステムのユーザインタフェース

Fig. 8 User interface of navigation system for automated algal bloom removal robot.

することができる。なお、モータなどの制御には Arduino を用いている。本ナビゲーションシステムについての詳細を以下に示す。

本ナビゲーションシステムは、まず、(航空写真のファイル名とその撮影地点の位置情報が保存された) CSV ファイルをもとに算出した中心点座標の緯度・経度を中心として、ドローンの撮影範囲 (300 m × 300 m) をメッシュ (5 m × 5 m) に区切り、そのメッシュ領域を移動可能領域として設定し、本ナビゲーションシステムの Google マップ上にその移動可能領域を表示する。その移動可能領域を表示する際に、アオコ判定結果ファイルを用いてアオコの発生地点も表示する。さらに、自走型アオコ除去ロボットの現在地を取得し、その現在地をホームポジションに設定する。

次に、アオコ発生地点の表示をもとに手で掃除領域を設定し、必要に応じて手で進入禁止領域も設定する。その後、「判別」ボタン、「送信」ボタンの順番でタップすると、掃除領域 (または進入禁止領域) を覆う矩形領域が自動で生成され、その矩形領域とホームポジションの情報をを用いて移動経路が自動で作成される。ここで、移動経路の作成には、探索アルゴリズム A* [12] を用いている。続いて、「経路決定」ボタンをタップすることで、自走型アオコ除去ロボットはその移動経路に従って移動しながらアオコを除去し、最終的にホームポジションへ帰還する。

また、本ナビゲーションシステムは、手動モードも実装している。そのため、緊急時 (バッテリーの低下時など) には手動モードに切り替えることで、自走型アオコ除去ロボットを手動で操作することもできる。これにより、システム利用者は、タブレット PC 上で本ナビゲーションシステムを利用することで、自走型アオコ除去ロボットのすべての操作が可能である。

4. アオコ判定システムにおけるアオコ判定方法の提案およびその評価結果

4.1 RGB 画像と近赤外線画像を用いたアオコ判定システム

近赤外線とは、赤外線のうち、波長が短く 700~2,500 nm 程度の光線のことであり、植物に含まれる葉緑素 (クロロフィル) は、光合成の過程で可視光線を吸収するが近赤外線を反射する。そのため、近赤外線の波長領域は植物からの反射は強く、水面の反射はほとんどないため、植物と水面を明確に区別することができる。この特性は、様々なリモートセンシングの分野で活用されている。そこで、本研究では、近赤外線画像を用いたアオコ判定システムを提案する。具体的には、RGB 画像と赤外線画像を併用したアオコ判定システムを提案する。

本研究においては、Raspberry Pi 用の (IR カットフィルタレスの) 赤外線カメラモジュールである Pi NoIR カメ

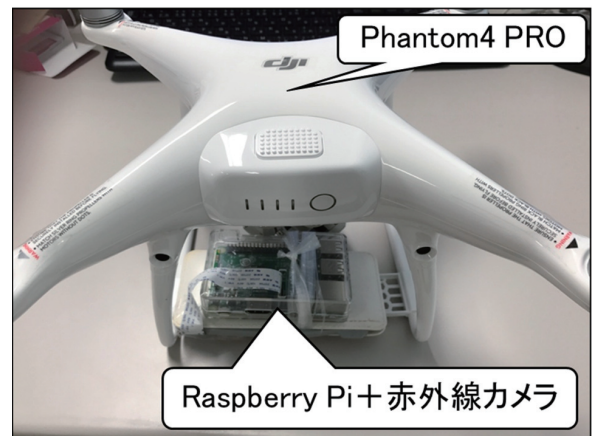


図 9 赤外線カメラを取り付けた Raspberry Pi を搭載したドローン
Fig. 9 Drone equipped with raspberry pi with infrared camera.

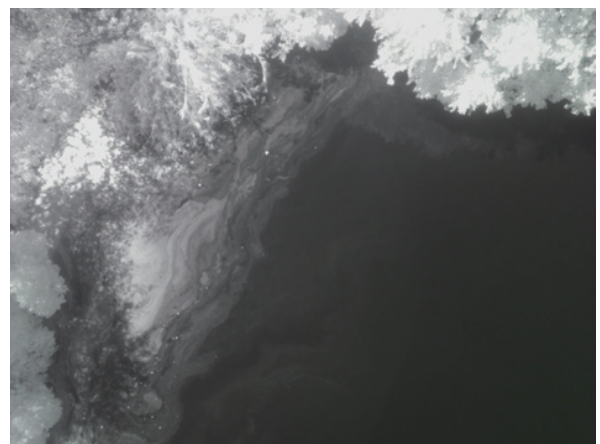


図 10 近赤外線画像
Fig. 10 Near infrared image.

ラモジュール V2 を用いる。なお、Pi NoIR カメラは赤外線に対して高感度であるが、可視光線も透過してしまう。よって、可視光線を吸収し、赤外線のみを透過させる IR フィルタを Pi NoIR カメラに取り付ける。IR フィルタには富士フイルム社の IR-76 (波長 760 nm より短波長光をカット) を使用した。

IR フィルタを取り付けた Pi NoIR カメラを Raspberry Pi (Raspberry Pi 3 Model B) に装着し、その Raspberry Pi を図 9 のようにドローンに装着して上空からアオコの発生状況を撮影することで、図 10 のような近赤外線画像 (以降、IR 画像) を取得できる。図 10 より、植生領域が近赤外線を反射して白くなっており、それ以外の水面部分は黒くなっていることが分かる。また、図 10 と同地点で撮影したドローン付属カメラの RGB 画像を図 11 に示す。RGB 画像よりも IR 画像の方が、水面とアオコ発生場所との違いがより明確になっていることが分かる。

本システムにおいては、Parrot Sequoia [13] といった可視光と近赤外線を同時に撮影できるドローン用のカメラの利用も考えられるが、プロトタイプシステムにおいて



図 11 RGB 画像
Fig. 11 RGB image.

は、Raspberry Pi 用の赤外線カメラを利用した。その理由は 2 つある。1 つ目の理由は、Raspberry Pi (赤外線カメラモジュールおよび IR フィルタ含む) は安価な点である。Parrot Sequoia と比べて Raspberry Pi 用の赤外線カメラは安価であるため、プロトタイプシステムにおいては、Raspberry Pi 用の赤外線カメラを選定した。2 つ目の理由は、本システムはできる限りの自動化を目指している点である。本システムにおいては、ドローンで撮影した航空写真 (RGB 画像) は、ドローンアプリケーションの「Auto」ボタンをタップすることで、自動的にタブレット PC に送信される。Raspberry Pi 用の赤外線カメラで撮影した近赤外線画像についても、プロトタイプシステムでは未実装であるが、Raspberry Pi に自動送信機能を実装することで、近赤外線画像を自動的にタブレット PC に送信することができる。しかしながら、Parrot Sequoia においては、Parrot Sequoia にアクセスして画像を移動させる必要があるため、自動化は困難である。よって、プロトタイプシステムにおいては、Raspberry Pi 用の赤外線カメラを選定した。

4.2 CNN によるアオコ判定方法

本システムにおいては、分割した航空写真それぞれに対して、RGB 画像と IR 画像の 2 種類を対象にアオコ判定を行う。アオコ判定においては、「アオコ有り」と「アオコ無し」の 2 クラスに分類する。図 12 にアオコの判定イメージを示す。本システムでは、画像を分類する CNN モデルとして代表的な AlexNet [14] をベースにしてモデルを構成している。また、モデルの作成には Python 用のニューラルネットワークのライブラリである Keras [15] を用いている。

本論文において、RGB 画像を用いた判定方法を CNN-RGB、IR 画像を用いた判定方法を CNN-IR とする。なお、RGB 画像は RGB 値を持つ 3 チャンネルで構成されており、

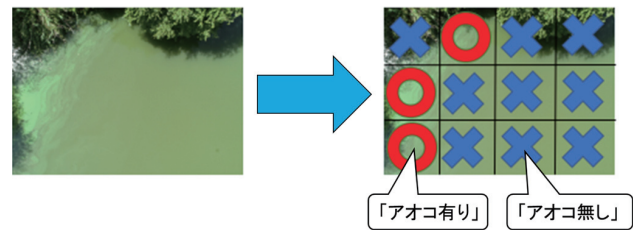


図 12 アオコ判定イメージ
Fig. 12 View of algal bloom determination.

IR 画像はグレースケール値を持つ 1 チャンネルで構成されている。よって、本論文では、同地点で撮影した RGB 画像 (3 チャンネル) と IR 画像 (1 チャンネル) の画素値を合成した計 4 チャンネルのデータを CNN に入力して学習させる判定方法を提案する。本手法を CNN-RGB-IR とする。

具体的には、RGB 画像内のある 1 点のピクセル座標でのピクセル値を (R, G, B)、IR 画像内のピクセル座標でのピクセル値を (GS) とすると、CNN-RGB では CNN に対して (R, G, B) を画像の総ピクセル分 (224×224) 入力し、CNN-IR では CNN に対して (GS) を画像の総ピクセル分 (224×224) 入力する。CNN-RGB-IR では CNN に対して同地点で撮影した同ピクセル座標の組合せ (R, G, B, GS) を画像の総ピクセル分 (224×224) 入力する。

4.3 データセットおよび評価実験

評価実験で使用する航空写真は、長崎県西彼杵郡時津町の久留里ダムで実際にドローンを飛行させて撮影した画像を用いる。ドローンの飛行高度は水面から 20 m で統一し、カメラは真下 (水面に対して垂直) に向けて撮影している。撮影地点はアオコ発生場所を中心にランダムに手動で移動させている。RGB 画像はドローンに付属しているカメラで撮影する。撮影後は同地点で 4 秒間ドローンをホバリングさせ、ドローンに装着した Raspberry Pi の Pi NoIR カメラで 2 秒おきに IR 画像を撮影する。このように撮影および次の地点へ移動することで、同地点で RGB 画像と IR 画像の両方を取得できるようにしている。

ここで、ドローンを飛行させて撮影した IR 画像 (図 10) と RGB 画像 (図 11) は、これらの画像を撮影したカメラの装着位置が異なるため、撮影範囲に差異、すなわち、位置ずれが発生している。よって、本論文では、RGB 画像と IR 画像の撮影範囲の違いを最小限にするため、IR 画像の撮影範囲に合わせるように RGB 画像に対して画像のトリミング処理を手動にて行っている。これはすなわち、評価実験においては、RGB 画像と IR 画像の撮影範囲の違いを最小限にした理想的な画像を利用していることを意味する。なお、プロトタイプシステムでは未実装であるが、Raspberry Pi には、カメラモジュールを 4 台搭載できる IVPort V2 Raspberry Pi Camera Module V2 Multiplexer があるため、Parrot Sequoia と同様に可視光と近赤外線を

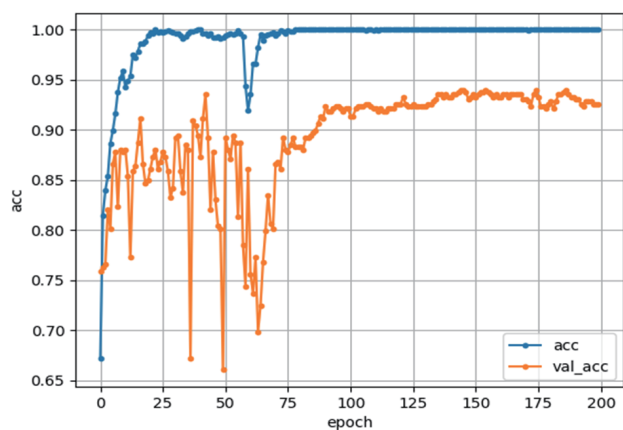


図 13 CNN-RGB のエポック数と正解率の変化

Fig. 13 Transition of epoch number and accuracy of CNN-RGB.

同時に撮影できるカメラも Raspberry Pi で実装可能である。このカメラを使用することで位置ずれが発生する状況を回避することができる。今後は、このカメラの利用も考慮していたため、本論文においては、理想的な画像を利用した評価実験を行った。

評価実験で使用するデータセットは、CNN-RGB と CNN-IR ではドローンで撮影された航空写真の元画像を縦 3 × 横 4 枚に分割した画像 108 枚（アオコ有り：39 枚、アオコ無し：69 枚）をデータ拡張によって 2,336 枚（アオコ有り：1,168 枚、アオコ無し：1,168 枚）に水増ししている。このデータ拡張においては、OpenCV [16] を用いて反転・回転・ガウス分布に基づくノイズの処理を行っている。また、CNN-RGB-IR においては、RGB 画像と IR 画像の両方を用いているため、同地点で撮影した RGB 画像と IR 画像を 1 ペア 1 枚としている。拡張した 2,336 枚のうち、70% を訓練データ、20% を検証データに分けて学習を行い、アオコの有無判定を行うための分類モデルを作成する。残りの 10% をテストデータとし、作成した分類モデルを用いた評価実験を行う。

4.4 評価方法および評価結果

アオコ判定の評価指標として、適合率 (Precision)、再現率 (Recall)、F 値 (F-value) を用いる。CNN への入力画像は AlexNet のモデルと同様に 224×224 にリサイズしている。バッチサイズは 256、最適化における学習率は 0.0001 で統一している。パラメータの最適化方法には、Adam [17] を用いた。

CNN-RGB と CNN-IR の正解率 (accuracy) の変化をそれぞれ、図 13、図 14 に示す。多クラス分類で用いられることの多い AlexNet の出力層には softmax 関数が用いられている。一般的に、2 値分類においては、出力層に sigmoid 関数が用いられることが多いため、本評価実験では AlexNet の出力層を sigmoid 関数に変更した CNN モデ

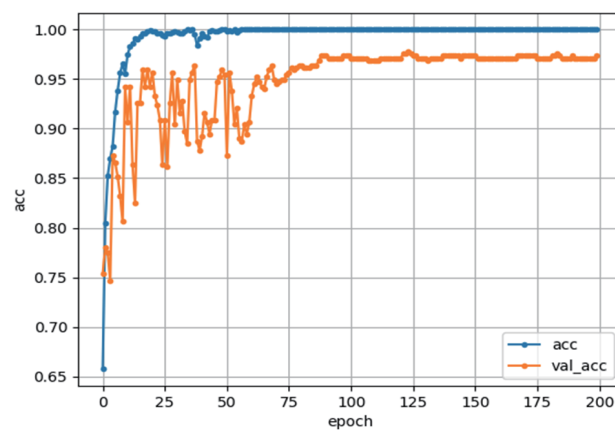


図 14 CNN-IR のエポック数と正解率の変化

Fig. 14 Transition of epoch number and accuracy of CNN-IR.

表 2 評価結果 (CNN-RGB, CNN-IR, CNN-RGB-IR)

Table 2 Evaluation results (CNN-RGB, CNN-IR, CNN-RGB-IR).

	適合率	再現率	F 値
CNN-RGB	0.78	0.75	0.76
CNN-IR	0.80	0.90	0.85
CNN-RGB-IR	0.92	0.93	0.92

ルを使用している。ここで、CNN の出力層の閾値は 0.5 としている。本論文におけるアオコ判定は、「アオコ有り」と「アオコ無し」の 2 クラスに分類しているため、CNN の出力層の閾値を 0.5 にすることが、最も単純かつ自然である。よって、「アオコ有り」の確率が 0.5 以上であれば「アオコ有り」と判定し、0.5 未満であれば「アオコ無し」と判定する。なお、エポック数は学習の正解率が収束した 100 回で評価を行い、モデル性能の評価とする。CNN-RGB, CNN-IR, CNN-RGB-IR の評価結果を表 2 に示す。

結果として、CNN-RGB は 0.76, CNN-IR は 0.85, CNN-RGB-IR は 0.92 の F 値を得られた。RGB 画像においては、植生領域以外の水面部分は緑色であることが多く、アオコの色と酷似している。一方で、IR 画像においては、植生領域以外の水面部分はほとんどの場合に黒くなり、アオコの色と大きく異なる。よって、この特徴が CNN-RGB よりも CNN-IR が高い F 値を示したことに繋がったと考えられる。また、CNN-RGB-IR が最も高い F 値を示したことから、CNN によるアオコ判定では、RGB 画像と IR 画像を併用することが有効であることが分かった。IR 画像においては、植生領域は近赤外線を反射して白くなるが、植物が枯れているなど色が緑色以外に変色している場合も、その植生領域は近赤外線を反射して白くなる。一方で、(IR 画像とペアとなる) RGB 画像においては、その植生領域が緑色以外に変色している場合は、アオコではないと判定できるため、RGB 画像と IR 画像を併用することが最も高い F 値を示したことに繋がったと考えられる。このことは、植物領域に限らず、近赤外線を反射して白くなる

対象物に対して、RGB 画像においては、その対象物が緑色以外だった場合、アオコではないと判定できると考えられる。

実際に、CNN-IR と CNN-RGB-IR の評価結果を比較すると、テストデータであるアオコ有り画像 115 枚およびアオコ無し画像 115 枚に対して、CNN-IR においては「アオコ有り画像に対してアオコがあると正しく判定 (TP)」が 104 枚、「アオコ無し画像に対してアオコがないと正しく判定 (TN)」が 90 枚、「アオコ有り画像に対してアオコがないと間違えて判定 (FN)」が 11 枚、「アオコ無し画像に対してアオコがあると間違えて判定 (FP)」が 25 枚となっており、CNN-RGB-IR においては「アオコ有り画像に対してアオコがあると正しく判定 (TP)」が 107 枚、「アオコ無し画像に対してアオコがないと正しく判定 (TN)」が 106 枚、「アオコ有り画像に対してアオコがないと間違えて判定 (FN)」が 8 枚、「アオコ無し画像に対してアオコがあると間違えて判定 (FP)」が 9 枚となっている。よって、アオコではないと判定できる画像が増加したことが、最も高い F 値を示したことに繋がったと考えられる。今後は、最適な CNN モデルやパラメータを検討し、さらなる精度向上を目指す。

5. おわりに

本論文では、タブレット PC を用いてドローンと自走型アオコ除去ロボット、クラウドサーバを連携させることで、アオコの発生場所を自動で検知し、自律的にアオコを除去できる自律型アオコ除去システムを提案した。

一方で、本システムはアオコの発生場所を自動で検知する必要があるため、アオコの有無を判定するアオコ判定システムの精度評価を行うことは、本システムを評価するうえで重要である。よって、本論文では、アオコ判定システムにおけるアオコ判定方法を提案し、その評価を行った。結果として、CNN-RGB は 0.76、CNN-IR は 0.85、CNN-RGB-IR は 0.92 の F 値を得られた。CNN-RGB-IR が最も高い F 値を示したことから、CNN によるアオコ判定では、RGB 画像と IR 画像を併用することが有効であることが分かった。

今後の課題としては、本システムのさらなる自動化があげられる。本システムにおいては、作業員への負担を減らすために、可能な限りの自動化を目指して開発を進めたが、一部の処理において手動操作（掃除領域、進入禁止領域の設定など）を必要としている。よって、今後はこれらの処理の自動化を進めていく。また、日中において、アオコの発生場所は周囲よりも水温が高くなる特徴がある。これは、アオコが光合成をすることにより熱を発するためである。よって、今後は、赤外線サーモグラフィカメラなどを用いて水温情報を取得し、水温情報も併用したアオコ判定システムを検討・提案する。これにより、アオコ判定システムのさらなる精度向上を目指す。さらに、アオコが発生して

いるダムなどで、本システムを用いて実際にアオコを除去する実験は行っていない。よって、今後は、その実験を行い、掃除効率の観点での評価も行っていく予定である。

さらに、今後の課題としては、水面の反射光や波の影響による画像の擾乱への対策があげられる。水面の反射光への対策としては、水面の反射を抑える PL フィルタの利用があげられる。しかしながら、PL フィルタは真下に向けた撮影の場合には、あまり効果がなく、本システムではドローンのカメラを真下（水面に対して垂直）に向けて撮影するため、有効な対策とはならない。一方で、神野らは、動画撮影と時間最小値フィルタを用いた水面反射軽減技術を提案している [18]。神野らはドローンをホバリングさせながら動画撮影を行っているため、本システムにおいてもドローンをホバリングさせながら動画撮影を行い、神野らの手法を参考にすることで水面の反射光への対策を行う。

また、波の影響についての対策としては、風の影響が少ない日に作業するといった作業環境条件の限定があげられる。しかしながら、作業環境条件の限定は、一定の有用性はあるものの作業効率の面においては非効率である。一方で、榎本は、波や風などの海面のゆらぎの影響を軽減する手法を提案している [19]。榎本は、ドローンをホバリングさせながら動画撮影を行い、ホバリング中は完全に動画位置は静止しているとの仮定のもと、時間方向の輝度値に注目し、輝度値が高い場合、鏡面反射成分を含むとし、時間方向で最も輝度値の低い値をその画素の輝度値とし描画することで、空間解像度の劣化は見られるものの、鏡面反射成分が低減できることを確認している。よって、この手法は海面や水面が映り込む航空画像に対して有効な手段であるとしている。本システムにおいてもドローンをホバリングさせながら動画撮影を行い、榎本の手法を参考にすることで波の影響への対策を行う。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP18K11267 の助成を受けたものです。また、評価実験にご協力いただいたエビスマリン株式会社の関係者各位に、謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 環境省：アオコってなに？、入手先 (<https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/gaiyou/pdf/aokobook120606.pdf>) (参照 2019-10-10)。
- [2] 国立環境研究所：見た目アオコ指標レベル、入手先 (http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000042117.pdf) (参照 2019-10-10)。
- [3] 国立大学法人熊本大学：MIZUMORI、入手先 (https://www.kumamoto-u.ac.jp/daigakujouhou/kouhou/pressrelease/2013_file/release130812.pdf) (参照 2019-10-10)。
- [4] エビスマリン株式会社：アルジー・ハンター、入手先 (<http://ebismarine.com/algae.html>) (参照 2019-10-10)。
- [5] 吉田拓司、岡本佳子、末廣富士代、小原和之、吉田武司、二瓶泰雄、片岡智哉：デジタル画像を用いた「見た目ア

- オコ指標」の自動判定の試み, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.I.823-I.828 (2018).
- [6] 加藤晃司, 渋谷直生, 中津川誠, 新庄 興: リモートセンシングによる釧路 3 湖沼の富栄養化状態の把握, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, Vol.17, pp.142-143 (2004).
- [7] DJI Mobile SDK, available from <https://developer.dji.com/mobile-sdk/> (accessed 2019-10-10).
- [8] 国立大学法人長崎大学: 自律型アオコ対策ロボット, 入手先 <http://www.nagasaki-u.ac.jp/ja/about/info/news/news2136.html> (参照 2019-10-10).
- [9] LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y. and Haffner, P.: Gradient-based learning applied to document recognition, *Proc. IEEE*, Vol.86, No.11, pp.2278-2324 (1998).
- [10] Google Maps Platform, available from <https://cloud.google.com/maps-platform/> (accessed 2019-10-10).
- [11] DJI Phantom4 PRO, available from <https://www.dji.com/phantom-4-pro> (accessed 2019-10-10).
- [12] Hart, P.E., Nilsson, N.J. and Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, *IEEE Trans. Systems Science and Cybernetics*, Vol.4, No.2, pp.100-107 (1968).
- [13] Parrot Sequoia, available from <https://www.parrot.com/jp/ye-wu-yong-soriyusiyon/parrot-sequoia> (accessed 2019-10-10).
- [14] Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G.E.: ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, *Proc. 25th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'12)*, Vol.1, pp.1097-1105 (2012).
- [15] Keras, available from <https://keras.io/ja/> (accessed 2019-10-10).
- [16] OpenCV, available from <http://opencv.jp> (accessed 2019-10-10).
- [17] Kingma, D.P. and Ba, J.L.: Adam: A Method for Stochastic Optimization, *Proc. 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015)*, pp.1-15 (2015), available from <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (accessed 2019-10-10).
- [18] 神野有生, 上田修靖, PARTAMA IGD Yudha, 赤松良久, 関根雅彦: UAV を用いた浅水底の写真測定のための水面反射軽減技術, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, IV-148, pp.295-296 (2017).
- [19] 榎本洸一郎: UAV を用いた海洋環境モニタリングのための環境推定手法, 科学研究費助成事業 (学術研究助成基金助成金) 若手研究 (B) 2017 年度 実施状況報告書 (2017), 入手先 <https://kaken.nii.ac.jp/ja/report/KAKENHI-PROJECT-16K16221/16K162212017hokoku/> (参照 2019-10-10).



荒井 研一 (正会員)

2004 年信州大学工学部情報工学科卒業. 2006 年同大学大学院工学系研究科博士前期課程修了. 2010 年同大学院総合工学系研究科博士課程修了. 博士 (工学). 以来, 情報セキュリティに関する研究に従事. 2011 年東京理科大学理工学部嘱託助教. 2015 年より長崎大学大学院工学研究科助教. 電子情報通信学会, 日本応用数理学会各会員.



中島 良太

2017 年長崎大学工学部工学科情報工学コース卒業. 2019 年同大学大学院工学研究科博士前期課程総合工学専攻修了. 現在, ネットワンシステムズ株式会社勤務.



今井 哲郎

2000 年北海道大学工学部情報工学科卒業. 2002 年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了. 同年 NEC 入社, 主に通信 NW に関する研究開発に従事. 2012 年山形大学大学院理工学研究科博士後期課程修了. 博士 (工学).

以来, 複雑ネットワークに関する研究に従事. 理化学研究所計算科学研究機構特別研究員, 東京情報大学助教, 同大学博士研究員を経て, 2018 年 9 月より長崎大学大学院工学研究科助教. 社会人向け学び直し講座「IT 先端技術習得講座」に関する業務を担当. 電子情報通信学会, IEEE, APS, 日本医療情報学会各会員.



小林 透 (正会員)

1985 年東北大学工学部精密機械工学科卒業. 1987 年同大学大学院工学研究科修士課程修了. 同年 NTT 入社. 以来, ソフトウェア生産技術, 情報セキュリティ, データマイニング, Web 技術等の研究開発に従事. 2013 年

から長崎大学大学院工学研究科教授. IEEE, 電子情報通信学会各シニア会員, 博士 (工学). 本会シニア会員.