

ONLINE ISSN: 2188-9023 PRINT ISSN: 0919-2948

Volume 57, Number 4, Page 181-190

Category: Paper

Received date: 2 April 2021

Accepted date: 11 September 2021

J-STAGE Advance publication date: 28 October 2021

Publication date: 5 April 2022

Corresponding author: Jonghyun AHN (E-mail address: j.ahn.h2@it-hiroshima.ac.jp)

DOI: 10.14953/jsde.2021.2931

Copyright©2022 Japan Society for Design Engineering

小型クラゲ駆除を目的とした自律型水中ロボットの開発および 駆除装置の性能評価

Development of Autonomous Underwater Vehicle for Small-size Jellyfish Extermination and its Evaluation

安 鍾賢*¹, 筑紫 彰太*², 安川 真輔*³, 園田 隆*⁴

(Jonghyun AHN) (Shota CHIKUSHI) (Shinsuke YASUKAWA) (Takashi SONODA)

Abstract

In recent years, extermination work has been carried out due to the increase in the number of jellyfish. In this research, we design and develop an AUV (Autonomous Underwater Vehicle) and conduct a jellyfish crushing experiment for the purpose of automating jellyfish extermination work. In the design and development of an AUV, electronic parts to operate autonomously were selected, and each electronic part was placed inside the hull to create a system diagram of them. Regarding the jellyfish extermination device, we designed and developed a device that sucks and crushes jellyfish together with water from the suction port. In this experiment, a jellyfish extermination device was mounted on developed AUV, and a crushing experiment was conducted using a jellyfish sample which is made by water and gelatin. As a result, it was confirmed that a jellyfish sample with a diameter of about 7 cm and a height of about 11 cm could be crushed to small pieces, which has average of volume 2885.6 mm³, during less in about 8 seconds.

Key words

robot design, ocean engineering, autonomous underwater vehicle, jellyfish, jellyfish extermination device

* 1 正会員, 広島工業大学工学部(〒731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1)

* 2 非会員, 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 文京区本郷7-3-1)

* 3 非会員, 九州工業大学生命体工学研究科(〒808-0196 北九州市若松区ひびきの2-4)

* 4 非会員, 西日本工業大学工学部(〒800-0394 京都郡苅田町新津1-11)

1 緒言

近年クラゲの増加により観光業、水産・養殖業、社会インフラ分野など人間の活動に大きく被害を与えている¹⁾。このようなクラゲの増加には地球温暖化による海水温の上昇、海洋汚染によるウミガメなどの天敵数の減少などが原因とされている。クラゲ数の増加の問題は、日本のみならず中国、韓国を含む東アジアの海で多く発生しており²⁾、被害を減らすために駆除作業が行われている。国内での駆除作業では漁網を用いて発生したクラゲを捕獲し、1匹ずつひっかけて網から出し船の船外機を用いて粉碎している³⁾。しかし、このような駆除方法では多くの時間と労働力が必要とされ、漁業就業者数が毎年減少傾向にある現状では負担となっている。特にミズクラゲに関しては海水温の上昇により大量発生する頻度が多くなっているため、USV (Unmanned Surface Vehicle)を用いた海水面付近のクラゲの駆除システムが研究されている^{4),5)}。USVを利用したシステムでは、広域のミズクラゲを駆除できるが、対象が海水面から深く潜った場合は駆除ができなくなる。ミズクラゲは深度0m~1250mで分布されているため⁶⁾、海水面付近だけでなく海中の駆除も必要とされる。

近年、国内で多様な自律型水中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle, 以下 AUV)が開発されている。AUVは、各種センサ、CPU、バッテリーを搭載しており、センサによってAUV本体の情報と周辺環境の情報を取得し、センサ情報をCPUへ処理をして自動で作業を行う水中ロボットである⁷⁾。AUVは無線で広い海域での作業が可能なロボットであり、水産資源の自動観測^{8),9)}や海底生物の自動採取^{10),11)}などの海洋作業でも利用されている。

そこで本研究では、USVと比較して海中のクラゲまで接近することが容易なAUVを用いたクラゲ駆除システムを提案し、このためのAUVとクラゲ駆除装置の設計・開発を行う。AUVの設計に関しては、小型の漁船などを用いた運用を想定しており、少ない作業員で運用可能な小型AUVを設計・開発する。クラゲ駆除装置に関しては、小型AUVへ搭載可能かつミズクラゲを粉碎できる装置を設計・開発する。開発した装置はゼラチンで製作したクラゲサンプルを用いて粉碎実験を行い、装置の性能を評価する。

2 提案するクラゲ駆除 AUV の運用

提案するクラゲ駆除 AUV の運用方法を図 1 に示す。

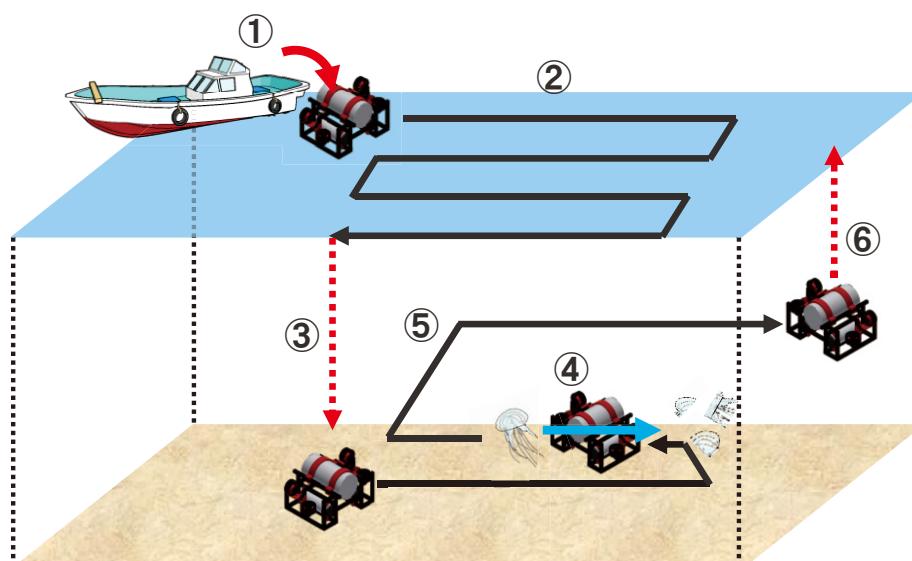


Fig. 1 Proposed operation method for jellyfish extermination work using AUV

図 1①では、船に AUV を載せてクラゲが発生している海域まで移動し、AUV を投入する。投入後、AUV にクラゲ駆除作業開始の命令を送る。図 1②では、AUV があらかじめ設定された経路を移動しながらクラゲを探索する。探索が終わったら AUV が潜り深度を変えて再度経路を移動しながらクラゲの探索を行う (図 1③)。クラゲが発見されたら AUV がクラゲを吸引して図 1④のように粉碎することで駆除を行う。駆除後は設定された経路に従い、図 1⑤のように探索を続ける。海域の調査が終了したら図 1⑥のように浮上して船で回収を行う。AUV を回収した後は、また海域を変えて再度運用する。

3 AUV とクラゲ駆除装置の設計と開発

提案した運用方法を実現するためには、以下の項目を満たす必要がある。

- (i) AUV は船上で 2 名が運用できるように設計する
- (ii) 自律移動のためのセンサとスラスターを搭載する
- (iii) クラゲの自動認識のためのセンサとコンピューターを搭載する

(i) に関しては、船上作業の際に進められる最低人員が 2 名であるため、2 名で投入を回収できる重量と寸法で AUV を設計する必要がある。しかし、AUV には運用作業員数、重量、寸法などに対する大型や小型などのスケールの明確な規定がない状況である。このため、国際 AUV 競技会である RoboSub¹²⁾と SACVC¹³⁾、国内の AUV 競技会である沖縄海洋ロボコン¹⁴⁾での規定を参考にする。各大会では参加者または大会実行員により AUV を水槽または海へ投入・回収を行うため、船上で 2 名が投入・回収作業を行うことと類似した条件で AUV を運用している。各大会での参加可能な AUV の寸法と重量の仕様を表 1 に示す。

表 1 のように各大会は参加可能な AUV の寸法と重量は異なるが、各大会の全長・全幅・全高・重量の中の各最小値を選択して設計することで、実環境で 2 名による運用が可能と判断した。このため本研究では、表 1 を参考にして全長 1.4m、全幅 0.91m、全高 0.7m 重量 45kg 以下の AUV を設計・開発する。

(ii) に関しては、海中環境で AUV の方位、姿勢、加速度、深度などの情報を取得するため、IMU と深度センサを搭載する。また、スラスターを搭載させることで、海中での移動ができるようにする。駆除対象であるミズクラゲは 13.6mm/sec 程度で移動するため¹⁵⁾、AUV の追従速度に関しては考慮せず、安定的な動作で AUV のスラスターとして多く利用されている Blue Robotics 社の T200 スラスター¹⁶⁾を搭載する。

(iii) に関しては、クラゲを認識するためのカメラと、画像情報からクラゲを認識するための画像処理が可能なコンピューターを搭載する。カメラに関しては、HD 750P で撮影が可能なカメラを選定し搭載する。また、コンピューターに関しては、HD 750P の画像処理が可能な Intel 第 8 世代 Core m3-8100Y の CPU を搭載した LattePanda alpha 864s¹⁷⁾を搭載する。LattePanda alpha 864s はスラスターを制御するための PWM 信号の出力が可能であるため、画像処理とモータの制御共通で行うことができる。

AUV の設計・開発では、AUV の構成する各部品の電気・通信の配線図の作成と 3D-CAD を用いて各部品のジグなどを設計する。クラゲ駆除装置の設計・開発では、3D-CAD を用いたクラゲ駆除装置の設計と AUV への搭載作業を行う。

Table 1 Maximum size and weight to participate each small size AUV competition

Competition name	Host country	Maximum			
		Length(m)	Width(m)	Height(m)	Weight(kg)
Underwater Robot Competition in Okinawa	Japan	2	1.5	0.7	45
Robosub	USA	1.83	0.91	0.91	56.7
Singapore AUV Challenge	Singapore	1.4	1	1	50

3.1 AUV の設計と開発

開発する AUV は, (i), (ii), (iii)の要件を満たすことができるように設計を行う。AUV の設計では, 円筒の亚克力を用いた水密容器 (以下, Hull) の内部に AUV の各部品を配置する。AUV のセンサとしては, IMU, 深度センサ, 前方カメラ, 後方カメラ, 下方カメラを搭載する。IMU では, AUV の方位と加速度の情報を出力する。深度センサでは, 海水面から AUV までの距離を測定する。前方カメラはクラゲを認識して吸引動作の信号を送るため使用される。後方カメラでは, クラゲが吸引されて粉碎される様子を確認するため使用する。下方カメラは, 海底面を観測することで, 海底との衝突を防ぐため使用される。AUV の移動に関してはスラスタを用いる。AUV は図 1 のような運用を想定しているため, Surge, Heave 方向への移動と Yaw 軸での回転が必要とされる。また, 対象のクラゲは水中環境で Surge, Heave, Sway 方向への移動が考えられるため, 開発する AUV には, Surge, Heave, Sway 方向への移動と Yaw 軸での回転ができるように設計する。設計した AUV の様子を図 2 に示す。

図 2 のように AUV は 5 個のスラスタと 5 個の Hull で構成される。スラスタに関しては, Surge 方向に 2 個, Heave 方向に 2 個, Sway 方向に 1 個のスラスタを搭載する。Surge 方向に搭載した 2 個のスラスタによって Yaw 軸の回転ができるように設計する。また, 潜水と浮上は AUV の水中環境での作業開始と AUV の回収に関わるため, Heave 方向へ 2 個のスラスタを搭載させる。また Sway 方向には 1 つのスラスタを配置させる。図 2 の Front Hull では, AUV を制御するためのコンピューターとモータードライバーなどを配置する。Back Hull では, AUV の各種センサと光通信モデムなどを搭載する。Bottom Camera Hull は下方カメラを搭載する。CPU Battery Hull と Thruster Battery Hull では, コンピューターに電力を供給するためのバッテリーとスラスタに電力を供給するためのバッテリーを配置する。電源部では, スラスタの方に大きい電流が流れ, コンピューターの方に流れる電流が足りなくなることを防ぐため, スラスタに流れる電源とコンピューターに流れる電源を分けて設計する。AUV の Roll, Pitch 姿勢の安定性を確保するため, AUV の重心と浮心は全高方向で離れるように設計する。図 2 で AUV の重心と浮心の位置を示しており, 重心は AUV の全長・全幅方向の中央, 全高の 130mm に, 浮心は AUV の全長・全幅方向の中央, 全高の 240mm 位置している。各 Hull とスラスタの電源と通信の配線設計図を図 3 に示す。

図 3 の Front Hull は, CPU Battery Hull と Thruster Battery Hull からコンピューターとスラスタ制御のためのモータードライバーに電源が供給される。Front Hull からは 5 個のスラスタに電力供給し, 各センサが搭載されている Back Hull と USB serial で通信を行う。Back Hull は IMU, 深度センサ, 後方カメラなどのセンサ情報を USB serial 通信で Front Hull のコンピューターに情報を送信する。また, 光通信モデムを用いて使用者との有線通信ができるようにする。Bottom Camera Hull の下方カメラは Back Hull と USB serial で通信を行う。また, 多目的グリッパを搭載しており, Front Hull で制御を行う。

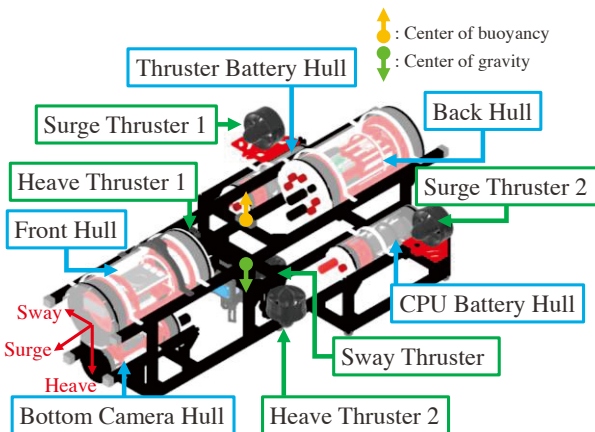


Fig. 2 Whole design of developed AUV

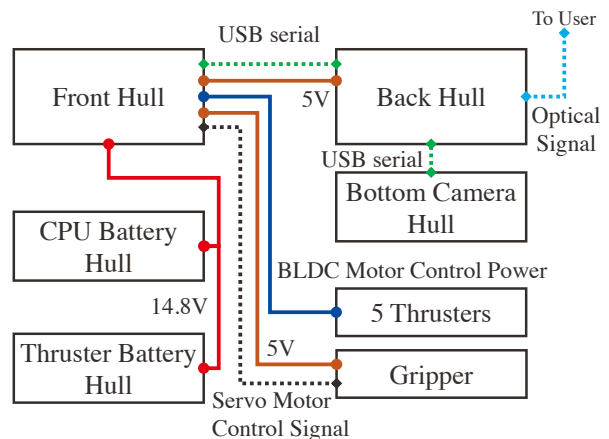


Fig. 3 Developed AUV system diagram

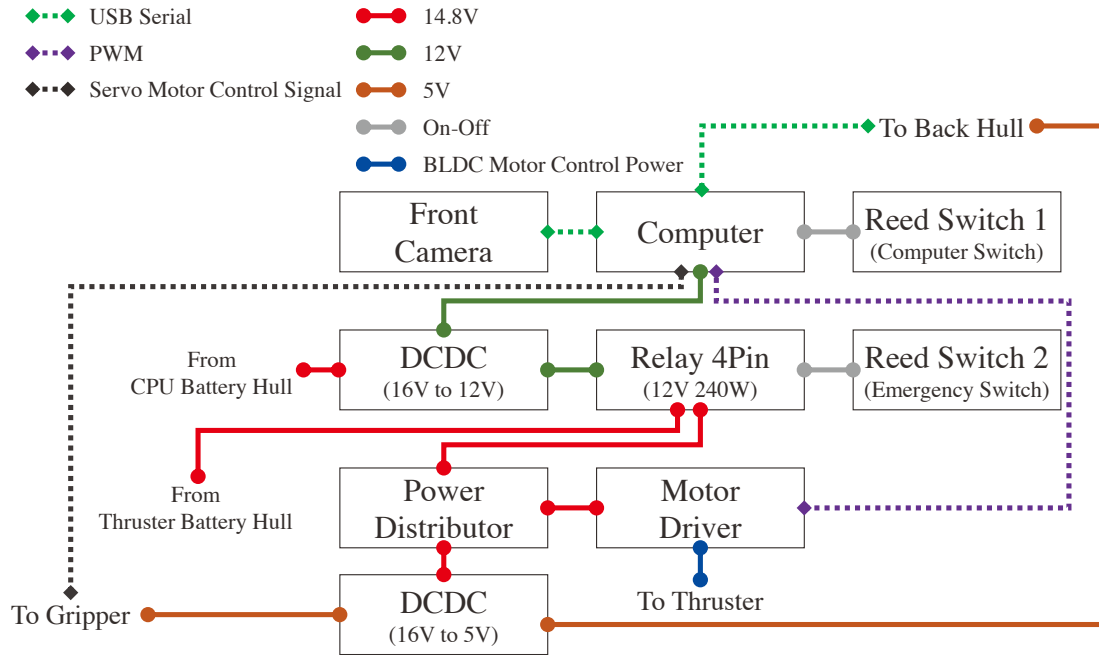


Fig. 4 Detail system diagram of front hull

3.1.1 Front Hull の設計

Front Hull では、AUV を制御するためのコンピューターとスラスタ制御のためのモータードライバーが搭載される。AUV の運用のためにはコンピューターの電源スイッチと AUV の緊急停止スイッチが必要とされる。このようなスイッチは機械式スイッチが使用されることが多いが、水中環境で動く AUV では磁気スイッチを使用する。このため、Front Hull では、コンピューターとモータードライバー以外でもリードスイッチとリレーなどが搭載される。Front Hull の詳細を図 4 に示す。

図 4 のように Front Hull では、前方カメラ、コンピューター、DCDC コンバーター 2 個、リードスイッチ 2 個、電源分配器、モータードライバー、リレーを搭載する。リードスイッチ 1 はコンピューターの電源スイッチであり、リレーとリードスイッチ 2 は緊急停止スイッチである。両スイッチは磁石によりリードスイッチがオンになると各動作を行う。電源では、14.8V の Li-po バッテリーを使用している。しかし、コンバーターとリレーでは 12V が、グリッパと Back Hull のための電源供給では 5V が必要であるため、12V と 5V 変換のための DCDC コンバーターを搭載する。

3.1.2 Back Hull の設計

Back Hull では、AUV の各センサと Twisted Pair Cable からの Ethernet 信号を光信号に変換する光モデムなどを搭載する。Back Hull の詳細を図 5 に示す。

図 5 の USB ハブ 1 は、Front Hull のコンピューターと直接接続している。また、Front Hull の DCDC コンバーターにより 5V、3A が供給されている。IMU に関しては USB ハブ 2 を経由して USB serial で通信を行う。また、深度センサに関しては、深度情報を 0.0V から 5.0V のアナログ信号で出力するため、Arduino を用いて A/D 変換処理を行えるように設計する。USB Ethernet Port は、コンピューターと使用者間の通信を行うため利用する。AUV の運用では、水中環境で有線通信ケーブルの接続作業や取り外し作業を行うことが多い。しかし、Twisted Pair Cable からの Ethernet のような電気信号のケーブルの場合、水中で接続や取り外しを行うことは容易ではない。このため、電気的信号をファイバー上の光信号に変換する光モデムを使用することで、水中で接続や取り外し作業ができるように設計する。また、AUV の Back Hull に電力が供給されているかを確認するため、LED を 2 個配置する。

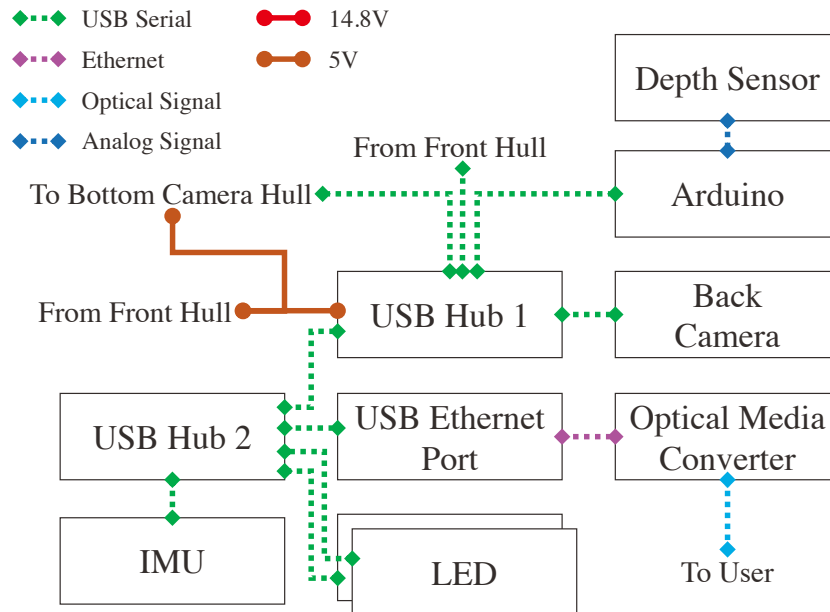


Fig. 5 Detail system diagram of back hull

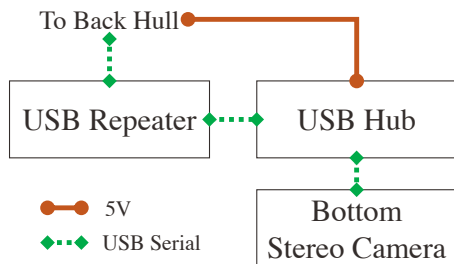


Fig. 6 Detail system diagram of bottom camera hull

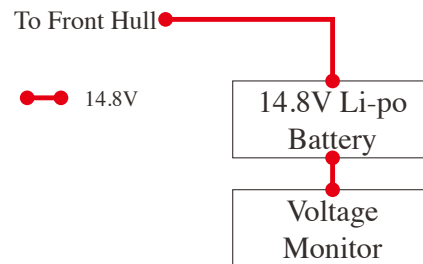


Fig. 7 Detail system diagram of battery hull

3.1.3 Bottom Camera Hull と Battery Hull の設計

下方カメラは、海底との衝突を防ぐためのセンサとして、Bottom Camera Hull に搭載されている。Bottom Camera Hull の詳細を図 6 に示す。

図 6 のように Bottom Camera Hull は Back Hull から 5V の電圧と USB serial で接続されている。下方カメラに関しては、ステレオカメラを利用して各カメラからの画像の視差により海底までの距離を計測する。

AUV の電源では、Li-po バッテリーを利用して、コンピューターとスラスターに電力を供給する。Battery Hull の詳細を図 7 に示す。

14.8V のバッテリーは Front Hull に電力を供給する。また、電圧計で各バッテリーの電圧を表示する。

3.1.4 開発した AUV の様子

開発した AUV の 5 個の Hull とスラスターはフレームと樹脂製のジグを用いて製作されている。開発した AUV の様子を図 7 に示す。また詳細を表 2 に示す。

開発した AUV は、全長 1.1m、全幅 0.7m、全高 0.32m、乾燥重量 28kg、最大深度は 50m である。また、スラスターは 16V で最大 5.25kgf の推力を出力することができる Blue Robotics 社の T200 スラスター¹³⁾を使用した。開発した AUV は、Surge, Sway, Heave, Roll, Yaw の移動が可能であり、内部のコンピューターに入力されたプログラムに従って動作ができる。

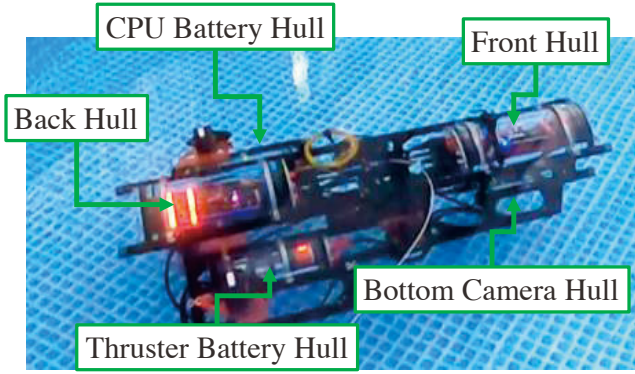


Fig. 7 Overview of developed AUV

Table 2 Specification of developed AUV

Dimensions	1.1 m x 0.7 m x 0.32 m
Dry weight	28 kg
Sensors	IMU, Depth, Camera x 3
Computer	LattePanda alpha 864s
Equipment	Thruster x 5, Gripper x 1
Battery	14.8 V Li-ion battery x 2
Maximum depth	50 m

3.2 クラゲ駆除装置の設計と開発

クラゲ駆除装置は、吸引口からクラゲを吸引してスラスタで粉碎を行う装置を開発する。設計したクラゲ駆除装置を図 8 に示す。吸引口は図 8 のように曲げることが可能なホースを用いて製作することで吸引口の位置調整が容易になる。ホースの後方では透明なアクリルパイプを使用することで粉碎の様子を確認できるように設計する。また、クラゲ以外の固いものなどを吸引した際、スラスタのプロペラが破損されないように、鉄網でフィルターを搭載する。開発したクラゲ駆除装置を図 9 に、詳細を表 3 に示す。

吸引口は図 9 のように曲げることが可能なホースで製作されており、伸縮も可能であるため、吸引口の位置を調整が容易にできる。表 3 ようにホースの伸縮によって装置の長さが 0.7m から最大 1.2m まで調整することが可能である。また、スラスタの前に配置しているフィルターはステンレス製の網（穴のサイズ 15mm x 15mm）を使用しており、大きい石などがプロペラを破損させることを防ぐ役割をする。

AUV にクラゲ駆除装置を配置の様子を図 10 に、クラゲ駆除装置を搭載した AUV の様子を図 11 に示す。図 10 のように、開発したクラゲ駆除装置は AUV の上部に取り付けるように配置する。また、図 11 で確認できるように AUV は前方カメラで対象を確認してクラゲ駆除装置で粉碎できるように配置をした。

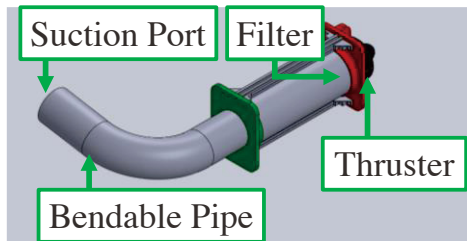


Fig. 8 Design of jellyfish extermination device

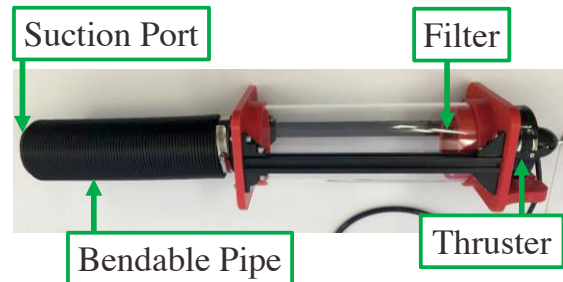


Fig. 9 Developed jellyfish extermination device

Table 3 Specification of developed jellyfish extermination device

Dimensions	Dry weight	Suction port diameter	Filter size
0.7 m to 1.2m x 0.17 m x 0.13 m	4.3 kg	90 mm	15 mm x 15 mm
Thruster	Thrust	Propeller diameter	Propeller material
T200 thruster ¹⁶⁾	Up to 5.25 kgf at 16 V	76.2 mm	Polycarbonate

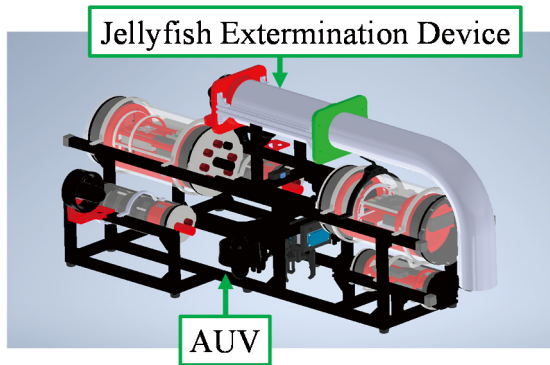


Fig. 10 Design of AUV equipped with jellyfish extermination device

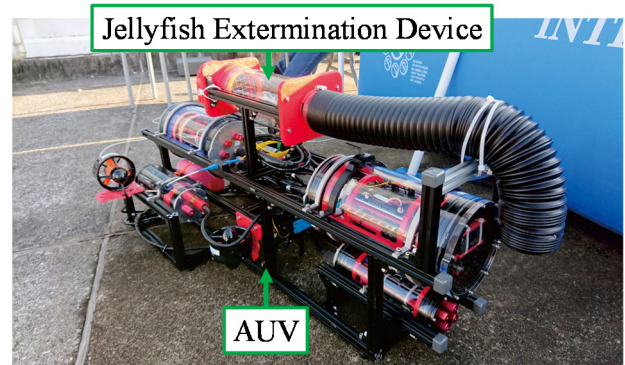


Fig. 11 Developed AUV equipped with jellyfish extermination device

4 クラゲ駆除装置の性能評価実験

クラゲ駆除装置を搭載した AUV を用いてクラゲ駆除の性能を評価する．本実験では，ゼラチンで製作したクラゲサンプルを AUV の前方に投下して対象の吸引・粉砕を行うことにより，粉砕時間と粉砕されたサンプルの大きさを評価する．実験で使用したクラゲサンプルを図 12 に示す．

駆除対象のミズクラゲは，体が水とゼラチン質で構成されているため，クラゲサンプルも水 400ml とゼラチンで製作をする．また，粉砕されたサンプルの回収と大きさの測定を容易にするため赤色で製作する．図 12 は，水約 400ml とゼラチン約 15g，食紅約 3g でサンプルを製作したクラゲサンプルであり，直径約 7cm，高さ約 11cm である．製作したサンプルの粉砕された様子を図 13 に，また，製作したサンプルを用いた実験の様子を図 14 に示す．

図 14 の(a)~(c)では AUV 前方にクラゲサンプルが投下されて吸引される様子であり，(d)~(f)は，クラゲサンプルが粉砕される様子である．粉砕実験は 3 回行っており，粉砕後水槽からサンプルを回収して評価を行った．この実験の結果を表 4 に示す．

表 4 のように 1 回目の実験では 68 個，2 回目の実験では 47 個，3 回目の実験では 57 個のサンプルを回収し，計 172 個のサンプルを対象として評価を行った．吸引から粉砕が完了されるまでの時間は 3 回の実験の平均で約 7.5 秒であった．サンプルの寸法の測定では，一番長い辺を長さ，次に長い辺を幅として記録し，1 回目の実験の平均は 21.5mm x 13.8mm x 9.8mm，2 回目の実験の平均は 19.8mm x 15.3mm x 10mm，3 回目の実験の平均は 19.5mm x 14.3mm x 8.9mm であった．各実験での粉砕されたサンプルの体積の平均は，1 回目が 3018.2mm³，2 回目が 3081.8mm³，3 回目が 2556.7mm³ であり，各体積の標準偏差は，1 回目が 1620.2mm³，2 回目が 1396.2mm³，3 回目が 1295.7mm³ であった．

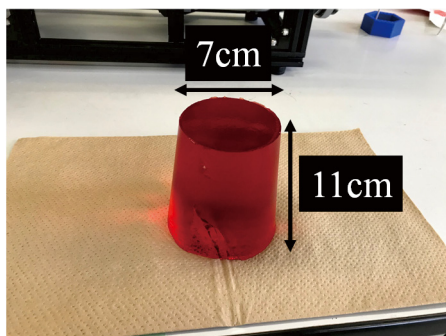


Fig. 12 Jellyfish sample for test

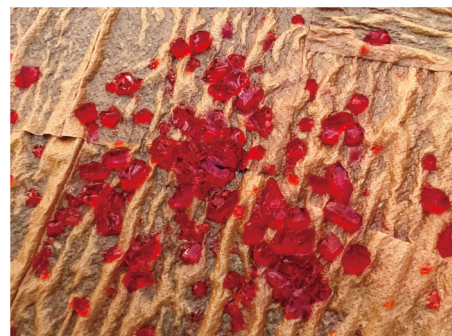


Fig. 13 Crushed jellyfish sample by test

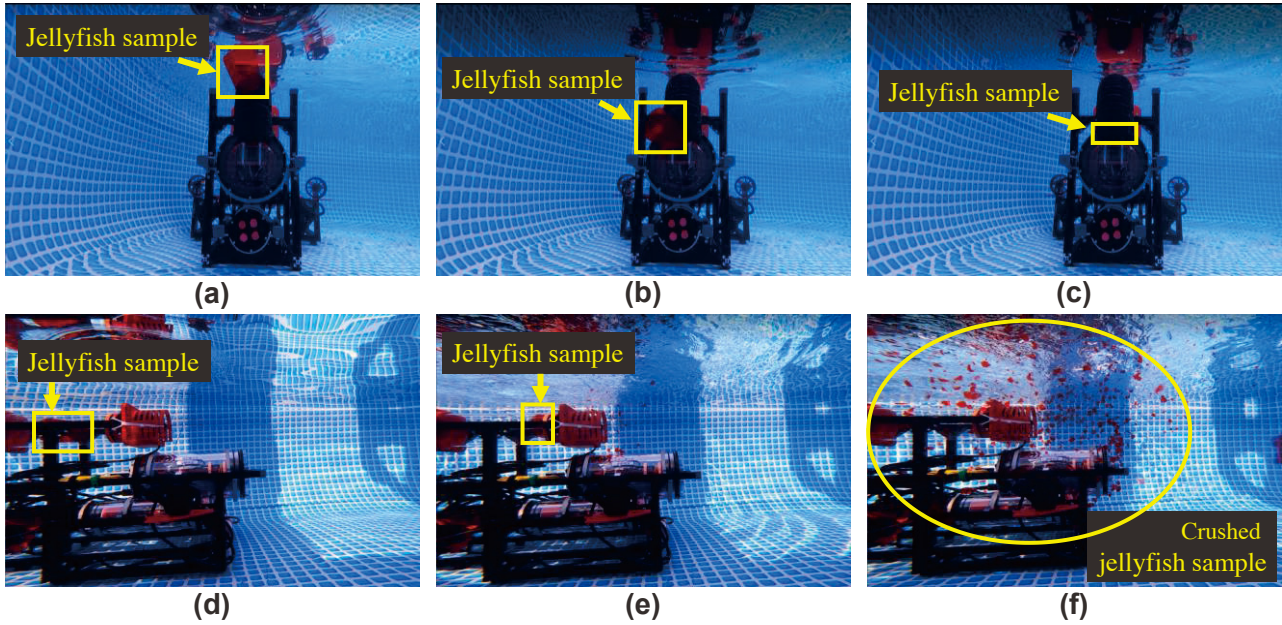


Fig. 14 Jellyfish sample crushing test

Table 4 Experimental results

Test number	Number of samples	Crushing Time (sec.)	Average of				Standard deviation of volume (mm ³)
			Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Volume (mm ³)	
1	68	7.07	21.5	13.8	9.8	3018.2	1620.2
2	47	8.03	19.8	15.3	10	3081.8	1396.2
3	57	7.36	19.5	14.3	8.9	2556.7	1295.7

5 結言

本研究では、ミズクラゲのような小型クラゲの駆除作業を行う AUV の設計・開発と、クラゲサンプルを用いて駆除装置の粉砕性能評価実験を行った。AUV の設計・開発では、水中環境での動作できるための電気電子部品を選定し、各部品らを 5 個の Hull 内部に配置して、それらのシステム図を作成し製作した。クラゲ駆除装置に関しては、吸引口から水と一緒にクラゲを吸引して粉砕する装置を設計・開発し、クラゲサンプルを用いた性能評価実験を行った。性能評価実験では、クラゲサンプルの粉砕を 3 回行い、172 個の粉砕されたサンプルを対象にその面積と標準偏差を持って評価を行った。実験の結果、粉砕されたサンプルの面積は 1 回目が 3018.2mm³、2 回目が 3081.8mm³、3 回目が 2556.7mm³であり、各体積の標準偏差は、1 回目が 1620.2、2 回目が 1396.2mm³、3 回目が 1295.7mm³であった。本実験でクラゲ駆除装置を用いてクラゲサンプルを粉砕できることが確認された。実験の結果、開発したクラゲ駆除装置を利用してミズクラゲの駆除ができると判断した。しかし、実環境での運用のためには多くの課題があり、AUV のクラゲの自動認識と AUV の姿勢制御システムの開発などが必要とされる。また、AUV の運用時間や運用範囲なども検討する必要がある。これらを今後の課題として AUV を用いた小型クラゲ駆除作業の実用化を目指す。

参考文献

- 1) Purcell, J.E., Uye, S. and Lo, W.T.: Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: a review, *Marine Ecology Progress Series*, 350, (2007), 153.
- 2) 上真一：近年の東アジア沿岸域におけるクラゲ類の大量出現:その原因と結果, *沿岸海洋研究*, 43, 1 (2005), 13.
- 3) 鳥取県水産試験場, 大型クラゲをやっつけろ!, (online), available from <<https://www.pref.tottori.lg.jp/item/422850.htm>>, (accessed 2021-07-15).
- 4) Kim, D., Shin, J.U., Kim, H., Kim, H., Lee, D., Lee, S.M. and Myung, H.: Development and Experimental Testing of an Autonomous Jellyfish Detection and Removal Robot System, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 14, 1 (2016), 312.
- 5) Kim, H., Kim, D., Kim, H., Shin, J.U. and Myung, H.: An extended any-angle path planning algorithm for maintaining formation of multi-agent jellyfish elimination robot system, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 14, 2 (2016), 598.
- 6) Segura-Puertas, L., Celis, L. and Chiaverano, L.: Medusozoans (Cnidaria: Cubozoa, Scyphozoa and Hydrozoa) of the Gulf of Mexico, *Gulf of Mexico origins, waters, and biota*, 1, (2009), 369.
- 7) Ura, T.: Development Timeline of the Autonomous Underwater Vehicle in Japan, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 32, 4 (2020), 713.
- 8) Ura, T.: Observation of deep seafloor by autonomous underwater vehicle, *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 42, (2013), 1028.
- 9) Ahn, J., Yasukawa, S., Sonoda, T., Ura, T. and Ishii, K.: Enhancement of deep-sea floor images obtained by an underwater vehicle and its evaluation by crab recognition, *Journal of Marine Science and Technology*, 22, 4 (2017), 758.
- 10) Yasukawa, S., Ahn, J., Nishida, Y., Sonoda, T., Ishii, K. and Ura, T.: Vision System for an Autonomous Underwater Vehicle with a Benthos Sampling Function, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 30, 2 (2018), 248.
- 11) Ahn, J., Yasukawa, S., Sonoda, T., Nishida, Y., Ishii, K. and Ura, T.: An Optical Image Transmission System for Deep Sea Creature Sampling Missions Using Autonomous Underwater Vehicle, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 45, 2 (2020), 350.
- 12) Robosub: Robosub 2021 Mission & Rules, (online), available from <<https://robosub.org/resources/>>, (accessed 2021-07-15).
- 13) The Singapore AUV Challenge 2022: SAUVC Rulebook, (online), available from <<https://sauvc.org/rulebook>>, (accessed 2021-07-15).
- 14) 沖縄海洋ロボットコンペティション: 競技規約, (online), available from <http://www.robo-underwater.jp/2020/rchp/JPN/rulebook_20200820.pdf>, (accessed 2021-07-15).
- 15) 市川 誠司, 望月 修: クラゲの推進運動と流れ, *理論応用力学講演会, 講演論文集*, 56 (2007), 1.
- 16) Blue Robotics, T200 Thruster, (online), available from <<https://bluerobotics.com/store/thrusters/100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp>>, (accessed 2021-07-15).
- 17) LattePanda, LattePandaAlpha864s, (online), available from <<https://www.lattepanda.com/products/lattepanda-alpha-864s.html>>, (accessed 2021-07-15).