

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500244

研究課題名(和文)水中観測無線センサネットワークによる海中情報の長時間観測手法の開発

研究課題名(英文)Function study for long-term observation of underwater environmental information gathering by wireless sensor network

研究代表者

鈴木 剛 (Suzuki, Tsuyoshi)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：00349789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：サンゴ礁環境における生態系の保全を目的とした、海洋環境情報を収集する水中観測センサネットワークの開発において、カメラによる長時間の水中観測で問題となる夜間撮影と付着藻類の除去について検討した。LED照明を用いた夜間撮影の効果検証、および、センサノード表面への藻類の付着状態の調査実験と除去方法の検討を行った。LED照明により、対象までの距離が1.0～2.0mで夜間撮影可能なことを確認した。また、調査実験により付着初期段階でのワイパを用いた物理的な除去が必要であることを確認し、ワイパ機構を作製した。サンゴ群体の撮影および水温等の海中情報を収集する実験を実地にて行い、ワイパ機構の動作確認を行った。

研究成果の概要(英文)：We have been developing a wireless sensor network system to support the coral ecological system survey activities for conserving the coral reef environment. In this system, coral images are gathered by stationary underwater monitoring sensor nodes equipped with a camera with fixed-point observation. In a long-term observation, however, a camera view is interrupted by an insufficient light intensity after dark or an attached algae growth on the sensor node surface. Coral images could be captured using the sensor node which arranged circular ring LED illumination around the camera when the distance until the target coral was 1.0-2.0 [m]. We investigated attached algae growth in surface of acrylic board which is the exterior material of sensor node. A prototype of wiper device was developed to wipe and remove attached algae on the surface of sensor node. A wiping action of the wiper device was confirmed in practical environment.

研究分野：情報通信工学，ロボット工学

キーワード：無線センサネットワーク 水中センサノード 水中環境観測 情報収集支援 サンゴ礁保全

1. 研究開始当初の背景

サンゴ礁は、海洋の生物多様性を育むとともに基礎生産が行われる貴重な環境であり、国土形成・保持、津波等の防災機能など人間が生活する上でも重要な機能を有している。しかし、海洋環境の変化を原因とした大規模な白化現象やオニヒトデの大量発生による浸食被害などの問題から、サンゴ礁生態系の保全・管理が急務となっている。保全活動計画や対応策の立案などには、サンゴの状態変化とその環境要因の長時間かつ継続的な観測が必要不可欠である。現状では、主としてダイバーら人手による観測が行われているが、これには潜水時の肉体的・精神的負荷などによる様々な制限がある上に時間的な粒度が粗く、環境要因の時間・空間的变化と生態系への影響との因果関係を理解することが難しい。このような問題に対し、例えば、海洋観測ブイによる長期間の水質調査や水中設置型カメラなどの技術開発が行われているが、長時間継続的に水質情報や画像情報など統合的に収集する海中環境観測システムはない。

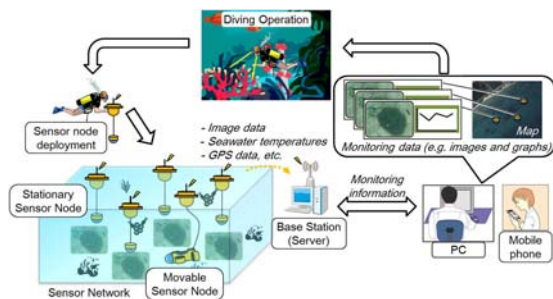


図1 海洋観測センサネットワークの概念

そこで我々は、沿岸域等の海中環境観測を目的として、無線センサネットワーク技術を利用し、水中に展開可能なセンサノード群により情報収集支援を行う水中観測センサネットワークシステムを開発している(図1)。センサノードを対象領域の複数地点に設置し、各センサノードが任意の周期で並列的・継続的に定点観測を行う。水中観測センサネットワークシステムの運用では、次のようなシナリオを想定している。

- 1) 調査船などに複数台の水中観測センサノードを搭載し、調査箇所へ運搬する。
- 2) 調査対象領域あるいは調査対象となるサンゴ(礁)の上部に、調査内容に応じた台数・粒度でダイバーがセンサノード群を分散配置する。
- 3) センサノード群は、調査目的に応じて調査者の設定した時間周期で継続的に画像および水温などの水中環境観測情報を取得する。また、センサノード自身の状態計測を行う。
- 4) 定点センサノードの状態および観測データは近隣のセンサノードを介したマルチホップ伝送によりサーバに集約され、公開される。

- 5) 調査者はインターネットを介してサーバにアクセスし、調査対象の観測データを閲覧する。また、センサノードの状態を確認し、設置個所にて定期(数日~1週間程度)的にセンサノードの状態確認やバッテリー交換などのメンテナンスを行う。

センサネットワーク技術を用いることで、時空間的に任意の粒度で観測を行えるため、調査の目的や対象に応じた柔軟な観測が可能となる。また、時空間的に多様な情報を集約・解析することで、従来の観測方法では得られなかった新たな生物学的・環境学的な知見や発見を得られる可能性が期待される。

2. 研究の目的

前述のようなシステムで長時間(調査目的により数日から数か月)継続して観測を行う場合、電源の確保、水深の深い暗所や夜間の撮影、藻類などの付着生物除去などが重要な課題となる。本システムの運用において、電源についてはセンサノードの間欠動作および定期バッテリー交換での解決を想定しているが、暗所撮影および付着生物除去については実地試験による検討が必要である。例えば、サンゴの生態調査で重要な産卵の観測では、産卵の兆し(セッティング)が満月を挟んだ数日間の19~22時にサンゴ根本付近で見られることが知られている。セッティング情報を水中観測センサネットワークで検知し調査者に知らせるためには、暗所でサンゴを撮影し画像処理によってセッティングを検出する必要がある。人手での撮影では照明が用いられるが、センサノードで撮影する場合照明の当て方などが画像処理に影響するため、画像処理を考慮した撮影方法が求められる。また、付着生物の研究は、バイオエネルギーなどへの利用において機能の解明などが行われているが、物体への付着や成長、それらの除去についてはほとんど研究されていない。センサノードのカメラ視認性を確保するためには、付着を阻害する有色塗料やカバーなどを用いることはできないため、効果的な除去方法を検討する必要がある。

以上のことから、本研究では、暗所・夜間の撮影方法、および、付着生物除去方法の検討を行った。

3. 研究の方法

サンゴ礁生態系の観測を目的とした水中観測センサネットワークの開発における、長時間観測を行うための要素技術として、暗所での撮影手法および付着生物の除去手法を検討する。

(1) 水中観測センサノードの改良

これまでに図2に示すような水中観測センサノードを設計試作してきた。本研究では、この試作機を基盤として、実験により得られた知見などに基つき、本研究を行うための改良を加える。

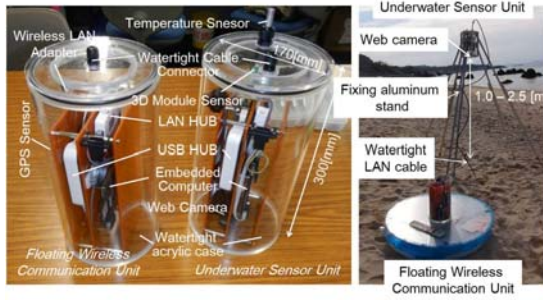


図2 センサノード試作機

(2) 暗所・夜間撮影手法の検討

実地にて夜間撮影を行い、課題点を整理する。実験で得られた知見をもとに、観測するサンゴの色特性などを考慮し、照明やナイトビジョンおよび画像処理などを用いて暗所でサンゴの特徴量を得られる手法を検討する。

(3) 付着藻類除去手法の検討

海中での付着生物の付着状態や成長段階を調査し機械的な除去方法とセンサノードの構成素材の物性的な除去方法を試み、付着生物をセンサユニットのカメラで認識し、自動的に除去作業を行えるようにする。これらの要素技術を搭載したセンサノードを開発し、実地試験により評価する。

4. 研究成果

(1) 定点センサノードの改良

各年度において、それまでの実地実験で得られた知見に基づき、ハードウェア、ソフトウェアの安定性、情報収集機能におけるカメラの視認性、無線通信特性、通信ユニットの水密性、センサノードの設置容易性などについて検討を行い、センサノードを改良した(表1)。

表1 各年度でのセンサノードの主な改良点

年度	主な改良点
2012年度	<ul style="list-style-type: none"> ・センサノード容器の水密性向上, ・ソフトウェアのモジュール化と統合 ・アンテナ変更による無線通信接続性向上, ・固定型フレームを用いたセンサノード設置, ・ソフトウェア構成の変更による, 通信不安定時の自動バックアップ.
2013年度	<ul style="list-style-type: none"> ・ソーラー充電可能な大容量バッテリー搭載 ・水中イーサネットケーブル採用による省線化, ・ロープおよびベルトによるセンサノード設置, ・夜間撮影用リングLEDライトの搭載.
2014年度	<ul style="list-style-type: none"> ・構成要素機器配置の見直しによる小型化, ・電源部の変更による電源の安定性の向上, ・水密容器の蓋設計変更, および, アルミ支柱の採用による剛性, 密閉性, 組み立て易さの向上, また, これにより周辺機器の搭載が可能, ・付着生物除去を目的としたワイパ機構(後述)の作製・搭載.

図3~5に、最終年度におけるセンサノードの外観、ハードウェア構成、および、ソフトウェア動作を示す。

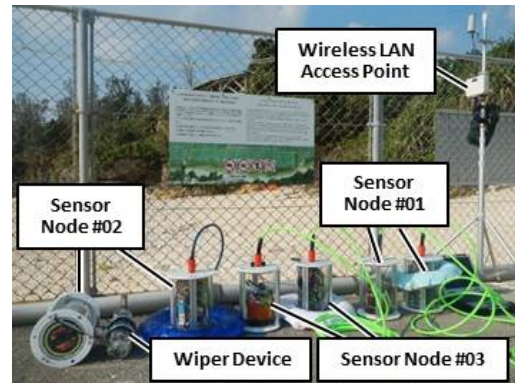
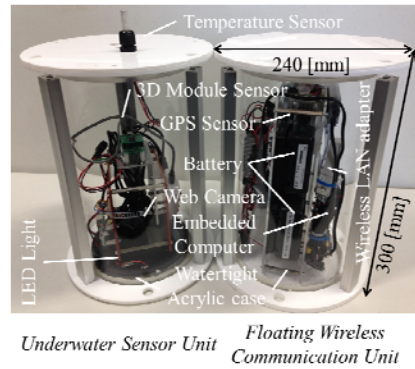


図3 センサノード外観(上)および全体構成(下)

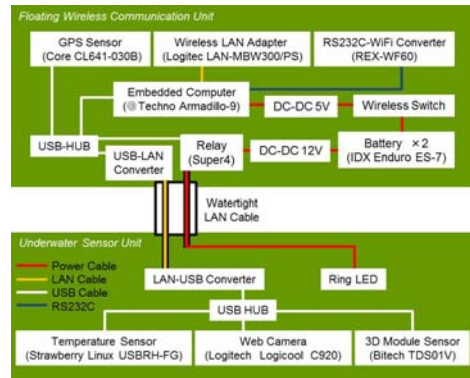


図4 センサノードのハードウェア構成

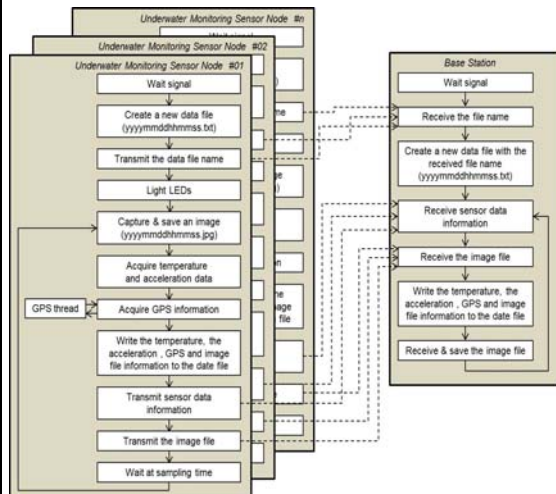


図5 センサノードのソフトウェア動作

センサノードは、データ取得時刻をファイル名としたデータファイル(年月日時分秒.csv)に画像情報、温度、加速度、GPS データを保存する。データは基地局サーバに適宜送信・蓄積される。図 6~9 に取得データ例を示す。図 6 の画像ファイル名は、画像取得日時により“年月日時分秒.jpg”で表されており、201401140642.jpg は、2014 年 1 月 14 日 14 時 6 分 42 秒の取得画像を示している。

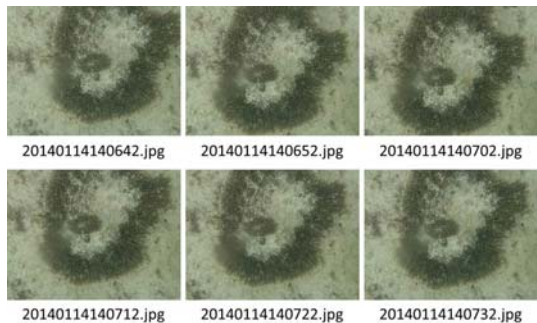


図 6 昼間撮影時の取得画像例

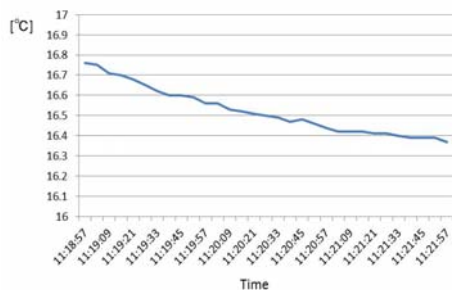


図 7 温度データ例 (補正後)

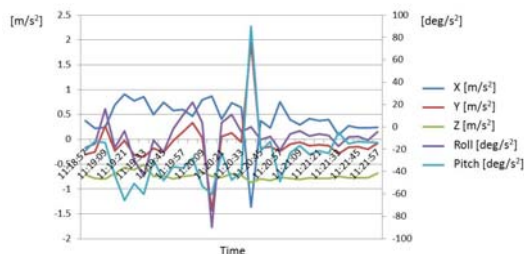


図 8 加速度データ例



図 9 GPS データ例

(2) 暗所・夜間撮影手法の検討

暗所撮影の検討を行うために、2014 年 9 月 3~5 日に、琉球大学 熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設前の海中にて、ミドリイシ属の造礁サンゴ 1 群体を撮影した。本実験では、できるだけ長時間の夜間撮影を行うことを目的とし、

リング LED 照明をカメラ外周に配置した定点センサノードを夜間設置し、観測を行った。センサデータは、サンプリングタイム 300[sec]で取得した。図 10 に夜間撮影時のセンサノード設置の様子、図 11 に取得画像の一部を示す。今回、満充電のバッテリーを消費するまでセンサノードを稼働させ、長時間撮影を行った。LED 照明により、対象までの距離が 1.0~2.0m で夜間撮影可能なことを確認した。また、撮影時刻より、2014 年 9 月 4 日 20:37:07 から同 9 月 5 日 03:58:36 まで、約 7 時間で 90 枚の撮影が行えた。一方で、連続的な夜間撮影では、撮影タイミングによって図 11~12 のように海中の浮遊物等に照明が反射し、サンゴの撮影が困難となることが分かった。また、潮汐により水深が 1.0~3.0m 程度変化し、センサノードの設置状態も影響を受けた。これより、夜間での連続撮影におけるセンサノード設置方法および撮影方法の検討を行う必要があることが分かった。現状では、潮汐の影響を考慮したセンサノード設置方法、対象までの距離変化に応じたカメラコントロール、浮遊物への対処などを検討している。

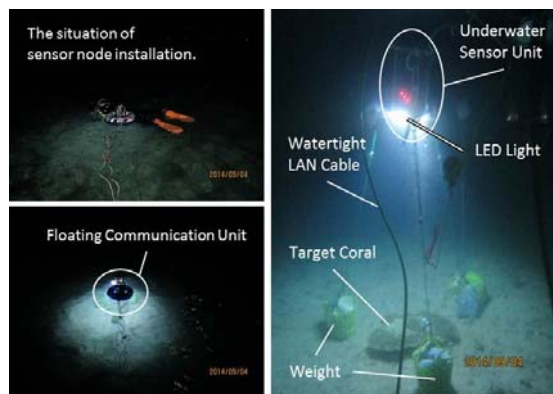


図 10 定点センサノード夜間設置の様子

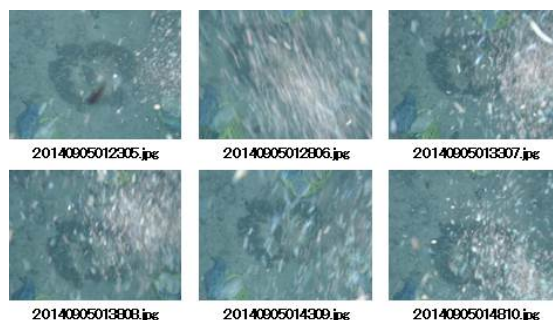


図 11 夜間撮影時の取得画像例

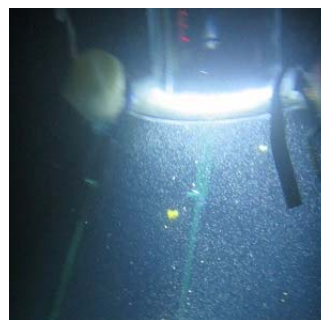


図 12 夜間撮影時の浮遊物による照明の反射

(3) 付着藻類除去方法の検討

沖縄県国頭郡沿岸部にて、センサノードの外装素材と同じアクリル板を用いて、付着藻類繁殖による影響を調査した。2013年11月22日に、アクリル板を、(a)暗黒水槽（太陽光を遮断した流海水水槽）、(b)天窓水槽（太陽光が当たる流海水水槽）、(c)礁池（サンゴ礁の浅瀬）、(d)礁斜面（サンゴ礁先端部）に設置し、14、28、52日後に回収を行った。回収後のアクリル板の例を図13に示す。暗黒水槽では52日経過後でも藻類の付着はほとんど見られなかった一方で、天窓水槽、礁池、礁斜面では、14日後のもので付着が見られ、日数の経過に伴って増殖していた。太陽光環境下では光合成が行われるため、屋内水槽であっても付着藻類が繁殖する。また、センサノードの利用環境となる礁池や礁斜面では、付着藻類の増殖が著しいことが確認できた。

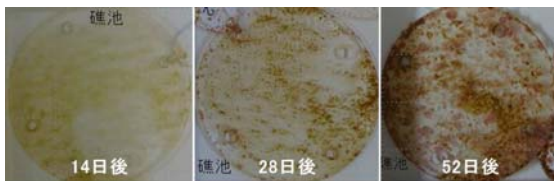


図13 アクリル板への藻類付着状況（礁池）

図14に、回収したアクリル板の透過率を示す。礁池や礁斜面に設置したアクリル板は、28日後で約80 [%]、52日後では約50 [%]に低下し、カメラでの撮影を考慮するとサンゴの視認性が大幅に低下することが分かった。

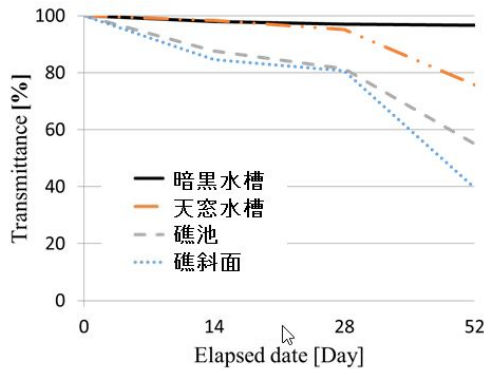


図14 アクリル板の透過率の変化

また、設置1日目でも極微小な付着物が付着すること、時間経過に伴い付着物にカルシウム等を含む固い層が形成され、物理的にも除去が困難となることがわかった。そのため、藻類の成長観測による除去タイミングの決定は困難であり、付着初期段階での物理的作用による除去、具体的には、ワイパ等による1日1回程度のアクリル面のふき取りが必要との結論を得た。そこで、センサノードと連結して使用するワイパ機構の検討・試作を行った。センサノードのカメラ前面部のアクリル板の大きさから、厚さ5[mm]のゴムプレートで0.03[m]×0.135[m]の矩形に成形し、ワイパのブレード部とした。これをアクリル板表面に押し付け、海水中で往復動作させて付

着藻類を除去する。また、一般に、流体中の抗力は、

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D S$$

で表されることから、ワイパブレードの動作に必要な力を計算した。表1に設計値を示す。なお、海水温等の環境条件は、実地実験場所である沖縄県沿岸の観測値の月間平均等を参考に表2のように設定した。これらの値より、ブレード先端の動作に必要なトルクを2.3[Nm]とし、駆動系の設計を行った。

表1 ワイパ機構の設計値

変数	設計値
ρ	海水の密度 1,025 [kg/m ³]
v	ブレード速度 1.2 [m/s]
C_D	抗力係数 1.2
S	ブレードの面積 (含、支柱部) 0.03×0.3 [m ²]
D	抗力 7.7 [N]

表2 対象領域（沖縄県沿岸）の観測値平均

海水温	21[°C]
塩分濃度	35[‰]
流速	0.4[km/h]

図15～17にワイパ機構の概要、ハードウェア構成、外観を示す。ワイパ機構は、センサノードの構成が変更された場合を想定し、小型計算機を内蔵してセンサノードと独立に動作する構成とした。計算機は、任意の時間設定で、モータを間欠往復動作させる。計算機、バッテリー、モータコントローラおよびモータを水密容器内に配し、モータ駆動力はマグネットカップリングを介して、海水中のワイパブレードに非接触で伝えられる。モータコントローラおよびモータの電源は、防水ケーブルを介してセンサノードから供給される。小型計算機はワイパ機構内の小型バッテリーにて動作する。

沖縄県国頭郡琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設の沿岸にて、ワイパ機構の動作確認を行った。実験では、センサノードをサンゴ群体上に設置し、ワイパ機構が想定された動作を行うか確認した。今回は、水中でのワイパ動作確認のため間欠動作時間を5秒に設定した。実験により、海中での往復ワイピング動作が行え、構造、モータ出力、間欠制御等に問題がないことを確認した。また、ワイパ機構容器の水密性に問題がない事を確認した。しかし、間欠制御による往復ワイピング動作において、ワイパブレード位置にズレが生じることが確認できた。これは、潮流やワイパ自身の動作による水流等によりワイパブレードにかかる負荷が往復で異

なるためと考えられる。そのため、確実なワイピング動作を行うには、ワイパ位置の制御が必要となる。位置制御には、負荷を考慮して出力を調整するソフトウェア的な手法と、ストップやリミットスイッチ等により物理的に動作範囲を制限するハードウェア的な手法が考えられるが、搭載されているセンサおよびマイコン性能や、長時間の動作（バッテリー消費等）を考慮し、後者の方法を検討している。また、ワイパ機構による付着藻類の除去効果を、実験により確認する予定である。

本研究では、水中観測センサネットワークによる長時間観測を考慮した際に問題となる、暗所・夜間撮影、および、付着藻類の除去について検討を行った。今後も改良および実地機能試験を継続し、必要機能の追加および動作確認、計測精度等の評価を行うとともに、天候への対応なども含め、サンゴの長時間観測方法について検討する。さらに、複数台センサノードの開発および観測対象領域への展開・観測手法、それらの情報収集・統合手法について検討を進める予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

Tsuyoshi Suzuki, Kazuki Kato, Emi Makihara, Takafumi Kobayashi, Hitoshi Kono, Kei Sawai, Kuniaki Kawabata, Fumiaki Takemura, Naoko Isomura, Hideyuki Yamashiro, “Development of Underwater Monitoring Wireless Sensor Network to Support Coral Reef Observation”, International Journal of Distributed Sensor Networks, Hindawi Publishing Corporation, Article ID 189643, DOI 10.1155/2014/189643, (April, 2014)

〔学会発表〕 (計 1 件)

鈴木 剛, 澤井 圭, 武村史朗, 川端邦明, 山城秀之, 「海洋生態系観測・記録を支援する定点センサノードの開発」, 第 22 回インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN2012) 講演論文集, 浦添市でだこホール, 沖縄, 2012.08.30-31, 1C1-2(CD) (2012)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 剛 (SUZUKI TSUYOSHI)
東京電機大学・工学部・教授

研究者番号： 00349789

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

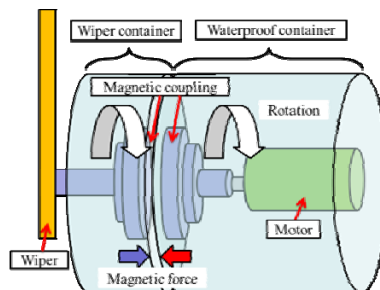


図 15 ワイパ機構の概要

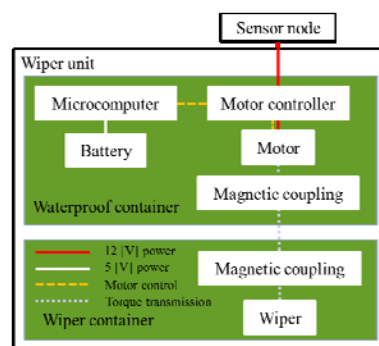


図 16 ワイパ機構のハードウェア構成

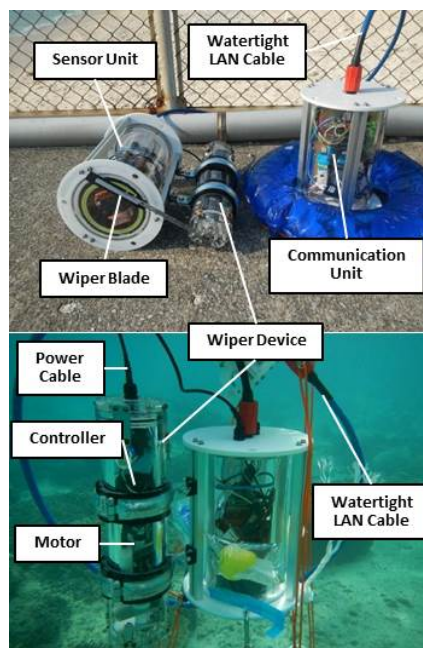


図 17 ワイパ機構の外観および動作