

水中における通信品質評価に基づく 牡蠣養殖を支援する無線マルチホップネットワークの提案

山本 郷平[†] ガジェゴスラモネト アルベルト^{††} 辻 明典^{††} 木下 和彦^{††}

^{† ††} 徳島大学 〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1

E-mail: [†]c612335046@tokushima-u.ac.jp, ^{††}{alramonet,a-tsuji,kazuhiko}@is.tokushima-u.ac.jp

あらまし 本研究では、水質や温湿度をリアルタイムに管理しながら給餌量を調整する牡蠣養殖場の育苗施設内に各種センサを導入して自動的に各データを収集するシステムについて検討する。このとき、センサと通信モジュールを有線で接続すると、牡蠣に当たらないような設置や経年劣化による頻繁な交換などの問題が発生するため、運用容易性を考慮してこれらを一体化して水中に沈めることを提案する。しかし、水中において電波は大幅に減衰するため、実機を用いた予備実験によって実現可能性を示した上で、中継機を経由して水中のデータを伝送する無線マルチホップネットワークを提案する。そして、最後にこれを実装して動作確認を行う。

キーワード ZigBee, 無線マルチホップネットワーク, 牡蠣養殖

A Wireless Multi-hop Network for Oyster Farming based on Underwater Communication Quality Evaluation

Kyohei YAMAMOTO[†], Alberto GALLEGOS RAMONET^{††}, Akinori TSUJI^{††}, and Kazuhiko KINOSHITA^{††}

^{† ††}Tokushima University 2-1 Minami-josanjima, Tokushima, Tokushima 770-8506, Japan

E-mail: [†]c612335046@tokushima-u.ac.jp, ^{††}{alramonet,a-tsuji,kazuhiko}@is.tokushima-u.ac.jp

Abstract In this study, we propose a system for oyster farming that enables automated data collection by deploying various sensors within nursery facilities. These sensors continuously monitor and manage water quality, temperature, and humidity in real time while optimizing feeding conditions. When sensors and communication modules are connected via wired links, several challenges arise, including the difficulty of installation without interfering with the oysters and the need for frequent replacements due to wire degradation over time. To address these issues, we propose integrating and submerging the sensors and communication modules to enhance operational efficiency. However, as radio waves experience significant attenuation underwater, we conducted preliminary experiments using actual equipment to evaluate feasibility. Based on these findings, we propose a wireless multi-hop network that relays sensing data via repeaters. Finally, we implement and verify the functionality of the proposed system.

Key words ZigBee, wireless multi-hop network, oyster farm

1. はじめに

近年、農林水産業における IoT 技術の活用が進んでおり、牡蠣養殖にも導入されている。牡蠣養殖では、まず、育苗施設内で母貝を水温 20～22℃で飼育し積算水温 600℃に達するまで成熟させた後、水温 25～28℃で人工受精を行い、14～16 日間の幼生飼育を経て、粉碎した殻に付着し稚貝となる。さらに約 1 週間沈着させた後、水温 25℃を維持しながら約 40 日間

育成した稚貝を沖出しして海での養殖を開始する。本研究ではこの育苗施設に注目し、水質や温湿度をリアルタイムに管理しながら給餌量を調整して稚貝を育てる施設内にセンサと通信モジュールを導入し、自動的に各データを収集するシステムについて検討する。

このとき、センサと通信モジュールを有線で接続すると、牡蠣に当たらないような設置や経年劣化による頻繁な交換などの問題が発生することに注意する必要がある。

2. 関連研究

農林水産業における IoT の活用事例として、[1] では、5G と水中ドローンを活用することで、養殖場の状況を把握し、生産性を向上させた。しかし、5G は高コストである上に消費電力が大きく小型バッテリーを使用する本研究に適用することはできない。

[2] [3] では、水槽中に設置してある水質センサのデータを Wi-Fi 経由で収集し、リアルタイムでモニタリングしている。通信モジュールは地上に設置してあり、水中にあるセンサにはケーブルで電力を供給している。しかし、Wi-Fi も消費電力が大きいため適用することはできない。

[4] では、太陽光発電と商用電力を組み合わせた電力供給システムと ZigBee を用いてスマート灌漑システムを開発し、リアルタイムな土壌水分センサデータに基づいた自動制御によって、生産性を向上させた。

ZigBee は低消費電力であるため、本研究での利用に適しているが、水中で使用した例が少ない。IEEE 802.11 を使用して水中での無線通信の性能評価を行った論文 [5] では、淡水中に 2 台のアンテナを入れて水中通信の状態を監視し、特に温度と通信距離可能な関係性を明らかにしている。ZigBee は IEEE 802.11 と同じ 2.4GHz 帯で動作するため減衰の程度は同等と考えられるが、より送信電力が小さいため実際の通信可能距離は短い。しかし、水槽から外までなら届く可能性がある。そのため、予備実験を行った上で牡蠣養殖支援への適用を考える。

3. 予備実験

3.1 センサと通信モジュールの一体化

本研究では、水質センサと通信モジュールを一体化した完全防水のデバイスを水中に沈める方法を提案する。構成要素は防水センサ、通信モジュール、バッテリー、防水ケースで、有線接続が不要なため、水中の任意の場所に設置でき、大幅な設置作業の簡素化というメリットがある。一方で、水中での無線通信は信号減衰や障害物の影響を受けやすいというデメリットがある。そのため、水中からだ通信できない可能性がある。そこで円筒形容器に一体化したセンサと通信モジュールを設置し、吸盤を用いて水槽の内壁に固定する形態を合わせて提案する。これにより、容器が導波管として機能し、水中でセンシングしたデータを伝送できるものとする。

3.2 実験環境

ZigBee を水中で使用した例が少ないため、水中からの通信可能範囲を測定する予備実験を行うことで、センサと通信モジュールを一体化する方法と円筒形容器の導入の実用性を示す。通信モジュールとして入手簡易な MONOSTICK(JN5169) [6] を採用し、Raspberry Pi 及びバッテリーと一体化したものをノードとする。そのノードを 2 つ用意して、1 つを End device、もう 1 つを Coordinator として動作させるようにした。

Raspberry Pi で実際のセンサデータと同じ形式のダミーデータを生成するようにした。具体的には、図 1 に示すように、センサの種類を 1byte で表す Sensor Number、何番目のデータであ

るのかを 1byte で表す Packet Handle、センサデータを 2bytes で表す Sensor Data、を Raspberry Pi から同じ End device 内の JN5169 へ UART 通信で送信した。

Sensor Number	Packet Handle	Sensor Data
(1byte)	(1byte)	(2bytes)

図 1: 無線通信で使用するデータ構造

そして、Raspberry Pi からデータを受信した JN5169 は、ZigBee を用いて Coordinator へ送信するようにした。

目的地である Coordinator に End device からセンサデータが届くと、どの通信モジュールから受信したのかを表す Short Address、電波通信品質を示す LQI [6] をパケットに付与して、USB 接続で接続されている PC に UART 通信で送信した。LQI とは電波通信品質を示す値であり、0 から 255 までの数値で表される。評価区分として、50 未満が悪い、50～100 がやや悪い、100～150 が良好、150 以上はアンテナの近傍である。図 2 の破線で囲んでいる部分が追加箇所である。

Sensor Number	Packet Handle	Short Address	LQI	Sensor Data
(1byte)	(1byte)	(2bytes)	(1byte)	(2bytes)

図 2: UART 通信で使用するデータ構造

そして、Coordinator で受信したパケットの内容を PC の画面上で表示させるプログラムを構築した。図 3 に予備実験でのネットワーク全体のデータの流れを示す。

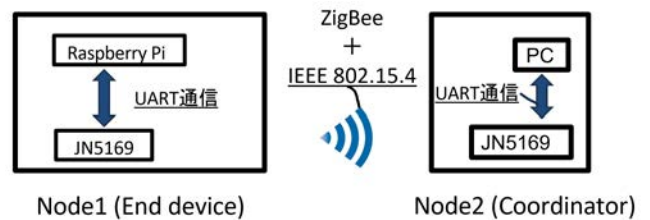


図 3: 予備実験でのネットワーク全体のデータの流れ

3.3 実験結果

通信可能範囲に水がどれほど影響しているのかを定量的に測定するために、水以外の障害物がない環境を用意した。また、コストや設置の容易さを重視したため、軽量かつ電波伝播に与える影響が少ないという利点をもつ防水ケースとして簡易的なプラスチック製のジッパー袋を採用した。また、使用した水槽は図 4 のような高さ 0.45m、幅 0.60m の大きさである。実験内容として、図 5 に示すように End device だけを水槽に沈めており、Coordinator までの距離は 2.0m に固定にし、図 6 にある x を 0.05m、0.10m、0.15m、0.20m と変化させた。

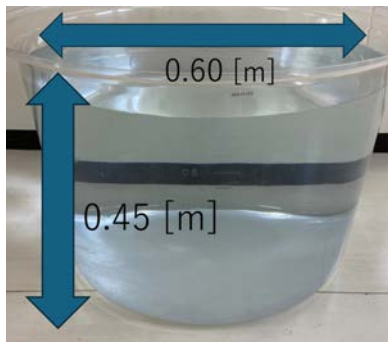


図 4: 水槽の幅と高さ

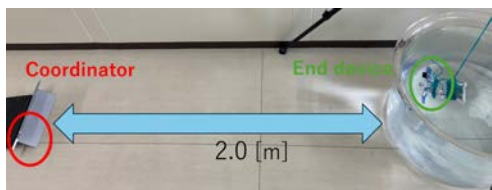


図 5: 水槽外の通信距離

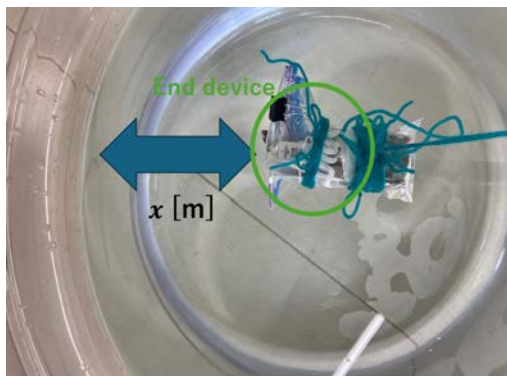


図 6: 水中部分の通信距離

実験結果を図 7 に示す。縦軸は LQI 値と変換式 (1) で受信信号強度に変換した値 P を示し、横軸はメートル単位の水中距離を表している。また、○印は実際に受信した 10 パケットの平均値を表しており、×印は 10 個の○印の平均値を表している。

$$P = \frac{7 \times \text{LQI} - 1970}{20} \quad [\text{dBm}] \quad (1)$$

0.05m の位置では、LQI の評価区分「悪い」という電波通信品質になっており、 x の距離が大きくなるにつれて、LQI が悪くなっていることが明らかになった。そして、0.20m の位置では受信不可能となった。

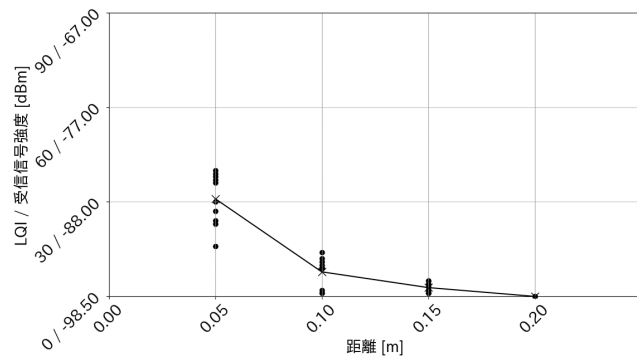


図 7: 水中距離を変化させた場合の LQI 及び受信信号強度

また、パケットロス率を図 8 に示す。縦軸はパケットロス率を表しており、横軸はメートル単位の水中距離を表している。0.05m の位置ではパケットロス率はほぼ 0 であるが、 x の距離が大きくなるにつれて、パケットロス率が大きくなっていることが明らかになった。0.15m では約 90% のパケットロス率が発生し、0.20m では 100% のパケットロス率となった。

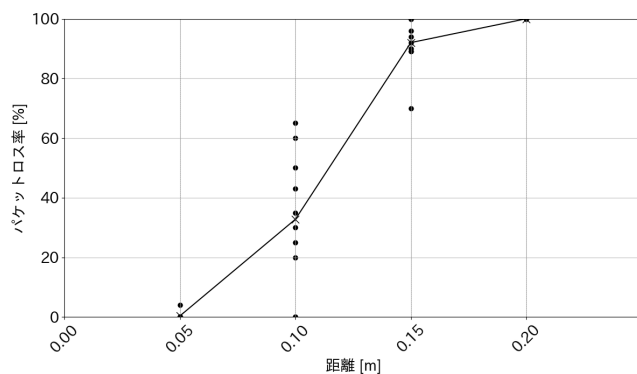


図 8: 水中距離を変化させた場合のパケットロス率

ここで図 9 で示すような円筒形容器を導入する。円筒形容器には水が入らないようにする必要があり、底には吸盤を設置して、図 10 のように水槽の内壁に設置する。そして、図 11 に示すように、円筒形容器内にある End device が内壁から 0.20m の位置になるようにした。



図 9: 円筒形容器の全体図



図 10: 円筒形容器を水中に沈めた状態 (横から)

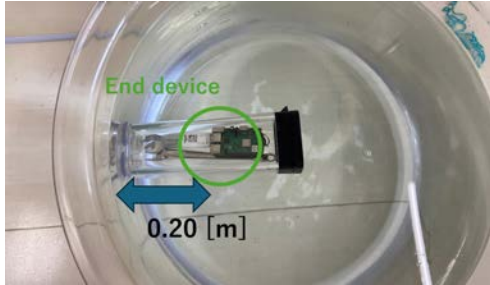


図 11: 円筒形容器を水中に沈めた状態 (上から)

結果として、円筒形容器を導入していない場合は 0.20m の地点で受信不可能であったが、円筒形容器を導入することで、平均 LQI 値は 68.38, 平均受信信号強度は -74.55 となり、パケットロスなく受信できた。

4. 牡蠣養殖を支援する 無線マルチホップネットワーク

4.1 提案構成

水槽との距離を変化させた場合の電波強度の測定結果を踏まえて、Router を End device と Coordinator の間に設置することで、水中からの End device のデータを水槽外の Coordinator に送信できるようにする無線マルチホップネットワークを提案する。無線マルチホップネットワークを構築することで、End device と Coordinator との距離が離れていたとしても、Router を経由することで、水中にある End device からのデータを Coordinator で受信できるのではないかと考える。図 12 と関連付けると Node1 が End device, Node2 が Router, Node3 が Coordinator である。

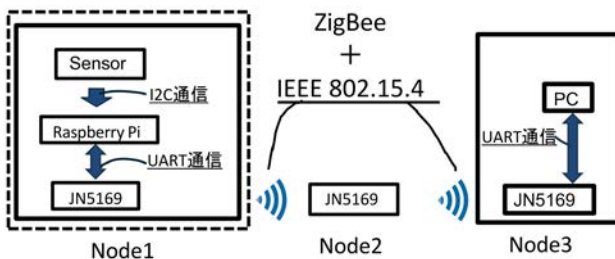


図 12: ネットワーク全体のデータの流れ

4.2 実装と実験

提案したシステムに温度センサ DS18B20 のデータを扱えるように実装した。図 13 には DS18B20, Raspberry Pi, JN5169 で構成されたノードを示す。



図 13: 温度センサ DS18B20 を付与したノード

そして、実装したノードを円筒形容器内に設置して、無線マルチホップネットワークの動作確認を行った。図 14 に示すように円筒形容器に穴を開け、そこから温度センサを出し、接続部分は防水になるよう加工してある。



図 14: 実装した DS18B20

図 15 にネットワーク全体を示すように、Coordinator と Router との距離は 4.0m と固定した。また図 16 に示すように、Router と End device との距離は 0.20m とした。

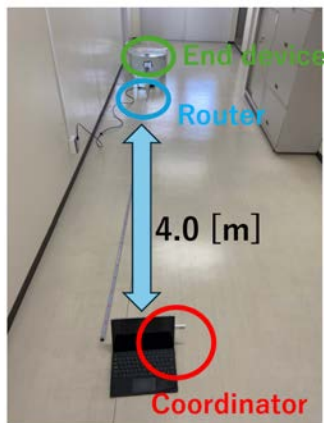


図 15: ネットワークの全体

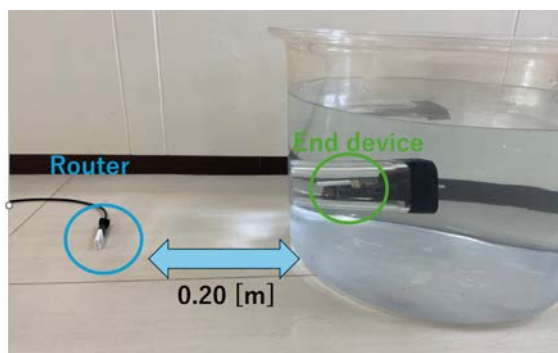


図 16: End device と Router の配置

結果は、パケットロスなく温度センサデータを Coordinator で収集することができた。また、平均 LQI が 106、平均受信信号強度が -61.4dBm となり、無線マルチホップネットワークを構築することで、LQI の通信評価基準としては「良い」区分になる値を受信して、無線マルチホップネットワークの実用性を示すことができた。

5. ま と め

本研究では、牡蠣の稚貝を育てる陸上の養殖施設において、無線通信を用いて水質などのセンサデータを自動的に収集するシステムについて検討した。センサと通信モジュールを一体化することで、配線のスペース確保や劣化による交換作業を削減する。そこで、ZigBee を用いた無線マルチホップネットワークの構築を検討し、水中から通信可能範囲を測定した。結果、水中に投下して End device と Coordinator への距離を固定して、水槽の内壁と End device との距離を変化させた通信品質評価では 0.15m まで通信可能で、0.20m ではパケットロス率が 100% となった。そこで円筒形容器を導入することで 0.20m の位置でもパケットロスなく通信可能であることを示すことができた。また、実際に温度センサを扱えるように実装して、無線マルチホップネットワークの動作確認を行った。End device と Coordinator との距離が離れていたとしても、Router を介して無線マルチホップネットワークを構築することで、パケットロスなく Coordinator で受信することができ、平均 LQI の値も

上昇した結果となった。したがって、無線マルチホップネットワークの実用性を示すことができた。

現在は、1つのセンサのみ対応しているシステムであるため、今後はシステムの拡大と自由度を考慮して、複数台のセンサに対応したシステムを構築すべきである。また、運用の観点から、本研究で使用した円筒形容器よりも小さくて細い容器に変更する予定である。そして、牡蠣の養殖場で本研究で構成したシステムを導入して動作確認を行うことで、システムの実用性を示す必要がある。

文 献

- [1] NTT ドコモ, “5G と水中ドローンを活用した漁場遠隔監視の実証実験に成功,” Nov. 2019, https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2019/topics_191127-00.pdf.
- [2] A. Machado, J. S. Pinto, and R. Rocha, “Biodepura: bivalve depuration methodologies adapted to the physiological needs,” 2021, 10th Euro-American Conference on Telematics and Information Systems (EATIS '20), 2021.
- [3] N. Ya'acob, N. N. S. N. Dzulkefli, A. L. Yusof, M. Kassim, N. F. Naim, and S. S. M. Aris, “Water quality monitoring system for fisheries using internet of things (iot),” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1176, no. 1, p. 012016, August 2021.
- [4] A. Sagala, J. R. Sitompul, J. L. Hutaeruk, and R. Sitorus, “Smart farming-drip irrigation controlled using Ir-wpan with hybrid power,” Jurnal Sistem Informasi dan Ilmu Komputer Prima (JUSIKOM PRIMA), vol. 5, no. 2, pp. 135–140, 2022.
- [5] S. Sendra Compte, “Deployment of efficient wireless sensor nodes for monitoring in rural, indoor and underwater environments,” Ph.D. dissertation, Editorial Universitat Politècnica de València, 2013.
- [6] Mono Wireless Inc., “MONOSTICK,” <https://www.mono-wireless.com/jp/products/MoNoStick/>.