

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26292103

研究課題名(和文) RFID技術を活用した河川生態系における小型魚の行動モニタリングシステムの構築

研究課題名(英文) Construction of the monitoring system on stream ecology using RFID

研究代表者

宮下 和士 (MIYASHITA, Kazushi)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授

研究者番号：70301877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：電磁誘導方式のパッシブタイプと、電波を用いたアクティブタイプのモニタリングシステムを構築した。パッシブRFIDは、作動距離が10cm程度と短いために制約が多いが、アクティブRFIDは水中での電波が減衰するも、実験から淡水であれば深度60cm程度までは利用できる。この電波をデコードする装置を開発し、アクティブRFIDを実用するための知見を得た。また、条件の異なるモニタリングの場合、システムを拡張するアーキテクチャとして、ミドルウェアによるデバイスの統合を実装した。さらに、広域モニタリングと多数の対象物を想定したデータ収集に関して、モニタリングのための圧縮センシングの検証を行った。

研究成果の概要(英文)：We constructed monitoring system for a passive type and an active type using radio waves. Active RFID can be used up to the depth of 60 cm in fresh water. We developed a device for decode to radio wave. In addition, we obtained insight to use active RFID. We implemented integration of device by middleware in the case of monitoring with different conditions. Furthermore, the compression sensing for monitoring for wide area monitoring and data collection assuming was verified.

研究分野：生態・環境

キーワード：RFID 群行動実験 モニタリングシステム構築

1. 研究開始当初の背景

水中生物の行動特性をモニタリングする手法は、電波や音響の発信機と受信機を組み合わせたテレメトリ方式やバイオロギング方式が開発され飛躍的に進歩した。しかし、これらのタグやロガーはサイズが大きく、比較的大型な生物に限定され、小型生物への利用は制約される。

2012年に閣議決定された「生物多様性国家戦略2012-2020」によると、「戦略目標A：生物多様性の損失の根本原因に対処」に対し、「生物多様性等の経済的な評価などによる可視化の取組」を主要行動目標としている。北海道では、2013年4月に「北海道生物の多様性の保全等に関する条例」が公布され、現在及び将来において道民が生態系サービスを楽しむとともに、道民生活の基盤である生物の多様性が維持されるように「モニタリングの充実と評価手法の確立」を図っている。これに伴い、河川用モニタリングシステムを確立し、河川生態系の定期的かつ定量的モニタリングを通じて、経済的価値や評価手法の確立、ならびにこれらの情報のデータベース化と共有化を図ることが求められる。

モニタリング技術に関して、RFID (Radio Frequency Identification) 方式は、物流で広く利用され、電磁誘導を用いるパッシブRFID方式と、電波を用いるアクティブRFID方式が利用されている。水中に生息する生物のモニタリングでは、前者が既に利用され、製品として入手可能である。しかし簡易なタイプでは、タグとリーダの作動距離が短く用途が限られる。大掛かりな装置も開発されているが、システム価格が高価で、手軽に利用できず、研究活動を阻害する要因となっている。後者のRFID装置は、水中で電波を使用することになり、一般的に不適当な方式と考えられ、十分な検討が行われていない。

2. 研究の目的

電磁誘導や電波を利用するRFID方式を検討し、それぞれの方式について基礎実験を実施し、河川の小型水中生物に装着して行動をモニタリングするためのRFIDシステムを開発する。また、河川に設置するRFIDモニタリングシステムで複数種の小型魚類の行動をモニタリングし、種間の行動特性や生息場所選択などの調査に活用する。それらの研究開発および調査から、河川流域の水中生物の移動・行動特性をモニタリングする方式について知見を得る。

3. 研究の方法

RFID方式について電磁誘導方式と電波方式を検討し、それぞれの方式について基礎実験を行い、それらの特性を確認する。その結果に基づき、河川の小型水中生物に装着して行動をモニタリングするためのRFIDシステムを開発する。開発するモニタリングシステムでは、RFIDタグからのIDデータを収集

して保存する機能、設置した状態でデータをダウンロードする機能を付加することによって、ユーザの使用を支援する機能を設ける。また、RFID技術を活用したモニタリングシステムのシステム開発を効率的に行うため、システムアーキテクチャとしてミドルウェア技術の活用を検討し、応用システムの開発を図る。

4. 研究成果

RFIDは、非接触でIDを読み取り、そのタグを取り付けた対象物の所在を管理するために用いられる。その方式としては、電磁誘導方式を用いたパッシブタイプと、電波を用いたアクティブタイプがある。前者のパッシブタイプは、作動距離がニアフィールド内に限られ、河川で利用する場合、魚類の通過する経路が制限される。一方、後者のアクティブタイプは、水中の電波強度の減衰が問題となり、水中生物の行動モニタリングには適さないと考えられている。本研究では、両タイプのRFIDを調査し、特性を把握する。その結果に基づき、アクティブRFIDの河川での可用性を示し、河川の生物をモニタリングするためのシステム開発を行った。

(1) パッシブRFID

原理

水中生物のモニタリング用として電磁誘導方式のタグとそのリーダが商品として販売されている。それらの仕様を表1に示す。しかし、作動距離が10cm程度と短く、河川の魚類モニタリングには適さない。同方式で大がかりなコイルを実装した装置も販売されているが、取り扱いが容易ではないことと、装置が高価で利用には課題が多い。

電磁誘導結合非接触型ID識別装置の原理とその作動距離について示す。この方式では、ループ導線が磁界交流磁場を生じさせるためのアンテナとして使われる。図1に示す導線ループ(円形)の場合、x軸上の測定点での磁界強度は式(1)で表される。

表1 パッシブRFID装置仕様

装置	型式	備考
リーダ	Biomark 601 Handheld Reader	作動距離(HPT12): 10 17 cm
タグ	Biomark HPT12	12.5mm, 134.2 kHz

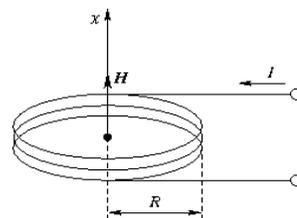


図1. 導線ループの磁界強度

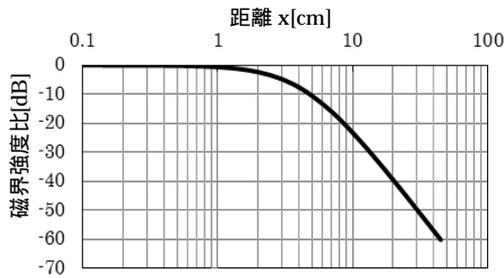


図 2. コイルの中心からの距離における磁界強度



(a) タグ装着 (b) 上面計測 (c) 側面計測

図 3. パッシブ RFID タグを用いた水中実験

$$H = \frac{I \cdot N \cdot R^2}{2\sqrt{(R^2 + x^2)^3}} \quad (1)$$

ここで、 $N$  は巻線数、 $R$  はコイルの半径、 $I$  はコイルに流す電流、 $x$  はコイルの中心からの距離である。

図 2 は、 $R=4.5$  cm のとき、距離  $x$  cm における磁界強度  $H(x)$  を  $x=0$  cm の磁界強度  $H(0)$  に対する比で表した。コイルの中心から軸方向に  $x$  離れた場所での磁界強度は、 $x=1$  cm まではほぼ一定であるが、それより離れると急激に下降し  $x=10$  cm では約  $-23$  dB まで下がる。実際にポータブルリーダー (Biomark 601) で測定すると、約  $10$  cm 以上離れると RFID の検出が困難になる。

また、リーダーとタグの電磁誘導による結合について、磁束密度  $B$  と磁束  $\Phi$  は次式で表される。

$$B = \mu H \quad (2)$$

$$\Phi = B \cdot A \quad (3)$$

ここで、 $\mu$  は透磁率、 $A$  は磁界が通過する断面積を表す。水の比透磁率は  $0.999992$  であるので、磁束は水の影響を受けない。従って、電磁誘導を利用するパッシブ RFID では、水の影響を無視できることがわかる。

#### 評価実験

パッシブ RFID システムを用いて行った水中実験について示す。RFID タグを魚類に装着し (図 3(a))、深さ約  $10$  cm、幅  $20$  cm、長さ  $100$  cm の水槽で、図 3(b) のようにリーダーで魚に取り付けたタグを上部から読み取る。リーダーと魚の距離が約  $10$  cm となる水面では読み取りエラーとなり、リーダーを近づけて約  $8$  cm の状態で ID を読み取ることができた。次に、図 3(c) のように魚を水槽のほぼ中央に置き、左右の側面から ID を読み取る。タグとの距離は約  $10$  cm となるが、左右いずれのリーダー

表 2. アクティブ RFID タグ仕様

項目	仕様	備考
型式	LT-04-2	ARIB STD-T99 適合
送信周波数	143MHz	特定小電力無線
送信出力	100 $\mu$ W 以下	
識別符号	6 bits	64 コード
電源電圧	3.0V	酸化銀電池
発信間隔	10 秒 (標準)	
動作寿命	約 3 ヶ月	発信間隔 10 秒の時
寸法 / 重量	13mmx28mm 5g	外観 



(a) RFID タグ (b) 受信機 (c) アンテナ

図 4. アクティブ RFID 装置

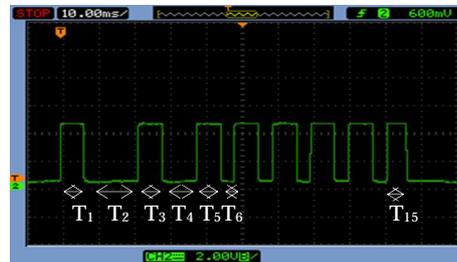


図 5. アクティブ RFID タグ信号

でも読み取りエラーとなった。魚を少し側面に近づけると読み取ることができた。これらのことから、タグを魚に装着した状態では、読み取り可能な距離は約  $8$  cm 以内であった。

前述の原理で示した物理的考察から、電磁誘導方式のパッシブ RFID 信号の磁束密度は、水に対する減衰量を無視できるが、作動距離が  $8$  cm 程度であるので、モニタリングシステムとしては適さない。

## (2) アクティブ RFID

### 原理

電波の発信機と電池を小型のタグに組み込み、一定周期で ID コードを発信する。本研究では、ID コードの符号化方式として、パルスポーズ符号化方式 (後述) を使用する。その電波をアンテナで受信し、受信機でベースバンド信号に変換する。

### アクティブ RFID 装置

使用するアクティブ RFID タグ LT-04-2 の仕様を表 2 に示す。図 4(a) に RFID タグ、(b) に受信機、(c) にアンテナを示す。この RFID は  $143$  MHz 帯の特定小電力無線を使用し、6 ビットの識別符号を一定間隔で出力する。送信される信号は、図 5 に示すように、 $T_1, T_3, T_5, T_7, T_9, T_{11}, T_{13}, T_{15}$  の ON/OFF 信号の 8 パルス (パルス幅= $T$ ) で構成され、同期信号と 6 ビ

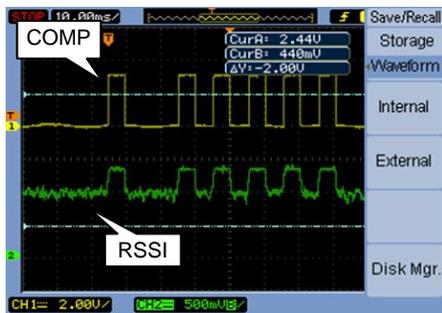


図 6. RSSI 信号とパルスポーズ符号信号

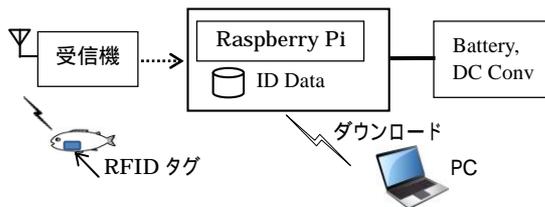


図 7. RFID モニタリングシステム基本構成

表 3. パルス列のデコード結果

パルス	T1+ T2	T3+ T4	T5+ T6	T7+ T8	T9+ T10	T11+ T12	T13+ T14
間隔 [ms]	20.9	10.4	16.3	10.2	11.0	15.0	15.6
コード	SY	1	0	1	1	0	0

注) SY は同期信号を表す。

ットの符号信号を表す。この符号化方式としてパルスポーズ符号化方式が採用されている。T1 の後に幅 3T の OFF 期間(T2)が設定され、同期信号を表す。この後のパルス間隔 T4, T6, T8, T10, T12, T14 の長さによって 6 ビットの信号を表す。パルス間隔が T(=5ms)のとき '1', 2T(=10ms)のとき '0' と定義され、T2 を MSB, T14 を LSB とする 6 ビットの符号で送信する。受信機では、受信信号強度の RSSI (Received Signal Strength Indicator) と基準信号強度を比較するコンパレータでパルス波形として出力する。図 6 は、RSSI 信号(RSSI)とコンパレータ出力信号(COMP)を示す。このパルス列のタイミングをコンピュータで検出し、ID コードにデコードする。

#### RFID モニタリングシステム

アクティブ RFID タグを用いて小型魚の行動をモニタリングするシステムの基本構成を図 7 に示す。魚に取り付けた RFID タグからの無線信号を受信機で受信し、デジタル信号に変換してホードコンピュータ (Raspberry Pi: R-Pi) に入力する。R-Pi では、パルス列の間隔を測定し、6 ビットの ID としてデコードする。その ID コードに日付と時刻を付加するとともに、各信号の処理結果をエラーコードとして付加し、ファイルとして R-Pi に記録する。また、このシステムでは、ラップトップコンピュータ (PC) から無線 LAN で R-Pi にアクセスすることによって、データをダウンロードできる機能を提供する。このモニタリング装置を屋外で使用す

表 4. 実験パルス間隔の計測精度評価  
パルスコード=111100

パルス 間隔	T1+ T2	T3+ T4	T5+ T6	T7+ T8	T9+ T10	T11+ T12	T13+ T14
設定 [ms]	20	10	10	10	10	15	15
ave [ms]	20.3	10.1	10.2	10.2	10.2	15.3	15.3
std [ms]	0.18	0.18	0.06	0.07	0.06	0.07	0.27
max [ms]	21.9	10.4	10.4	10.4	10.5	15.5	17.2
min [ms]	19.7	8.6	10.0	10.0	10.0	15.1	15.1
max [ms]	1.54	0.21	0.21	0.22	0.26	0.23	1.88
min [ms]	0.60	1.56	0.16	0.15	0.16	0.19	0.28

(注) max = |ave - max|, min = |ave - min|

るため、バッテリーを接続することによって、電圧 (12V) を DC-DC コンバータで 5V に変換して R-Pi に供給し、屋外で使用できるようにした。また、小型の DC-DC コンバータを使用することによって、46Ah のバッテリー (Panasonic 80B24R) でシステムが約 9 日間稼働することを確認した。

#### 評価実験

##### (a) デコーディング

RFID タグから発信された電波を受信機で受信したとき、RSSI 信号とそのコンパレータ出力は、図 6 のように出力されることを確認した。このコンパレータ出力信号のパルス間隔を R-Pi で測定し、測定したパルス間隔を表 3 に示す。この結果から、R-Pi でパルス間隔を測定したとき、設定値である 20ms(同期), 10ms('1'), 15ms('0')に対して誤差があるが、信号をデコードできることを確認した。

##### (b) パルス間隔の計測精度評価

ボードコンピュータ R-Pi でパルス間隔を計測する精度を評価するため、10 秒間隔で発信される RFID 信号を 20 分間計測し、各パルス間隔の測定結果を調べた。その結果を表 4 に示す。各パルスの標準値に対して、測定値の平均値(ave)、標準偏差(std)、最大値(max)、最小値(min)、最大値と平均値の差(max)、最小値と平均値の差(min)を示した。これらの結果から、R-Pi の測定精度は、標準偏差で 0.3ms 以下であるが、極めて少ない頻度で平均値に対する誤差が 1.9ms と大きくなることがある。これは、R-Pi の割り込み処理が OS の処理条件によって遅延することが原因と考えられるが、標準偏差が 0.3ms であることから、通常は精度の高い計測が行えると考えられる。処理の遅延による計測誤差によって生じる ID コードの誤り対策として、後述するパリティチェック機能を追加し、コード判定の誤りを検出する機能を付加した。

表 5. 淡水中に設置したタグの ID デコード実験

水深 [cm]		14	23	41	50	60*
検出 コード	ID-09	001001	001001	001001	001001	001001
	ID-1F	011111	011111	011111	011111	011111

注) タグとアンテナの距離: 約 5m

(\*) 水槽底面にタグを設置, 他は底面から 10cm に設置

### (c) 水中使用実験

RFID タグを水中で使用する場合について, 実験結果に基づいて記す. 実験では, 金属水槽 (90cm(L) × 60cm(W) × 60cm(H)) の底面から 10cm の高さにタグを設置して淡水を投入する. 2 種類の ID コード (ID-09, ID-1F) のタグを使用し, 5m 離れた場所で信号を受信し, 信号をデコードする. 各水深におけるタグからの信号をデコードした ID コードを表 5 に示す. 水深 60cm までは, 2 つのタグの ID が正常にデコードできることを確認した.

次に, 函館市国際水産・海洋総合研究センターに設置された海水の大型実験水槽を用いて, 水中からのタグの信号を受信する実験を行った. その結果, 水深 14cm まで検出できることがわかったが, 水深とともに急速に信号が減衰し, 海中のモニタリングには適さないことを確認した.

これらの実験から, 電波を利用したアクティブタグは, 淡水の場合, 60cm 程度の水深まで利用可能であること, 海水では利用できる水深が 14cm 程度までであることを確認した.

また水棲生物にパッシブタグを装着した際の受信特性について検証した. 市販されているアメリカザリガニの腹側にパッシブ RFID を挿入し, リーダーからの距離や角度によって受信強度が変化するかを検証した. その結果, パッシブ RFID はリーダーに対して水平になっている際に最も受信強度が高いことが示された. これらのことから, 水棲生物にパッシブタグを用いる場合は, タグの挿入位置をリーダーの典型的な角度に応じて決めることが効率的である.

### 誤り検出機能

前述の評価実験結果から, 低い確率でパルス間隔の計測に誤りが生じることが確認されている. この対策として, 1 ビットの誤りを検出するパリティチェック機能を付加した. RFID タグにパリティビットを付加できないので, 使用するタグのコードに従って, タグを奇数パリティのグループと偶数パリティのグループに分類する. 使用するタグを奇数が偶数のグループで選択し, モニタリングシステムのパラメータをそれに合わせて設定する. デコード処理によって得られた ID について, パリティチェックを行い, その結果をエラーコードとして出力する. パリティチェックは, 1 ビットの誤りでなければ検出できないが, エラーの確率が十分低ければ, 使用可能である.

### (3) 拡張機能

#### ミドルウェアによるデバイスの統合

モニタリングシステムとして, アクティブ RFID やパッシブ RFID, あるいは異なったセンシングデバイスを使用するとき, 専用のシステムを開発することは効率的観点から改善が求められる. 本研究では, ミドルウェア技術を導入し, 異なったデバイスを統合する方式を検証した. アクティブ RFID の受信機とパッシブ RFID のリーダーを R-Pi に接続し, 併用することを可能にした. このように, システムに多様な機能を付加する場合, ミドルウェアを用いたシステムアーキテクチャが有効であることを確認した.

#### 広域モニタリングに関する検討

将来, 多数の魚類にタグを取り付けて広域でモニタリングする場合, RFID タグからの信号がリーダーに集中するとともに, 広域に設置されたモニタリング装置からのデータを収集するシンクノードにおいて通信が輻輳することが考えられる. センシングシステムが直面するこれらの課題に対応するため, 無線センサネットワークで効率的にデータを収集する圧縮センシングによるデータ収集方式の検討を行った. 現在は, データの特性に特化した圧縮方式で 1/8 ~ 1/32 にデータ圧縮し, 復元誤差数%を確認している. この圧縮センシング技術を ID のモニタリングに応用し, 効率的なモニタリングを実現することが今後の課題である.

### (4) 結論

河川の生物をモニタリングするために RFID の利用を検討し, 電磁誘導方式のパッシブタイプと, 電波を用いたアクティブタイプについて調査した. パッシブ RFID は, 作動距離が 10cm 程度と短く, 河川での利用には制約が多い. 一方, 143MHz 帯のアクティブ RFID は, 水中での電波強度の減衰が問題となるが, 実験の結果から, 淡水であれば, 水深 60cm 程度までは利用できることを確認した. このアクティブ RFID をデコードするモニタリング装置を開発し, RFID のデコーディングとその安定性を確認して, アクティブ RFID を実用するための知見を得た. また, 条件の異なる多様なモニタリングを求められる場合, システムを容易に拡張するシステムアーキテクチャとして, ミドルウェアによるデバイスの統合を検討し実装した. さらに, 広域モニタリングと多数の対象物を想定したデータ収集に関して, 効率的なモニタリングのための圧縮センシングについて検証を行った.

### 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)

[学会発表](計 3件)

Takahiro Fujiwara, Haruki Uchiito, Tomoya Tokairin, Hiroyuki Kawai, "Effectiveness of Compressed Sensing and Transmission in Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring," Proc. of SPIE Smart Structures /Nondestructive Evaluation 2017, Portland, USA. 2017年3月29日

藤原孝洋, 佐久間正太, 後藤等, 白川北斗, 津田裕一, 宮下和士, "アクティブRFIDを用いた小型魚類の河川におけるモニタリングの検討," 電子情報通信学会信学技報, Vol.116, No.308, ASN2016-60, pp.105-108, 2016年11月18日 名古屋大学 (愛知県名古屋市)

Yugo Nakamura, Takahiro Fujiwara, "CMSAS: A Concept of Middleware Architecture to Integrate Heterogeneous Sensor Networks and Actuators," ACM Mobicom 2014 S3 Workshop, pp. 25-27, Hawaii, USA 2014年9月7日

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

宮下 和士 (MIYASHITA, Kazushi)  
北海道大学・北方生物圏フィールド科学  
センター・教授  
研究者番号：70301877

### (2)研究分担者

藤原 孝洋 (FUJIWARA, Takahiro)  
函館工業高等専門学校・生産システム  
工学科・教授  
研究者番号：80435388