

水中ワイヤレスセンサネットワークにおける伝搬遅延を考慮したタイムスロットスケジューリング

浜田 龍平^{†1} 村田 佳洋^{†1}

近年、海洋資源調査や災害感知のために、水中用のワイヤレスセンサネットワーク (Underwater Wireless Sensor Network, 以下 UWSN) が研究されている。水中では電波通信が効果的でないため、音響通信がよく用いられる。音響通信は伝搬遅延が大きく、センサノードごとの受信タイミングが異なるため、水中環境のための輻輳制御手法が必要である。

本論文では、UWSN における伝搬遅延を考慮したタイムスロットスケジューリング手法を提案する。本手法は、遺伝的アルゴリズムによって通信優先度を割り当て、タイムスロットを割り当てる。

提案手法を評価するためシミュレーション実験を行った。その結果、ガードタイムを用いた手法と比較して、37% 少ないタイムスロット数での割り当てを得ることが出来た。

Considering the propagation delay time slot scheduling for Underwater Wireless Sensor Networks

RYUHEI HAMADA^{†1} and YOSHIHIRO MURATA^{†1}

Recently, Underwater Wireless Sensor Network (hereafter, WSN) is studied. Because it is not efficient radio communication in the water, acoustic communication is usually used. There are long propagation delay in this communication, sensor nodes receive signals at difference times. Then, congestion control methods are needed for under water environments.

In this paper, we propose a time-slot scheduling method considering the propagation delay for underwater wireless sensor networks. In this method, the communication priorities of nodes are determined using genetic algorithm, and the time-slots are allocated.

To evaluate proposed method, we experimented in simulation. Compared the number of timeslots with that of method using guard time. As a result, our method achieved about 37 % less time-slots than that of method using guard time.

1. はじめに

近年、農業管理や工業システム、災害感知のための環境観測による情報収集アプリケーションを実現する1つの手段として、ワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network, 以下 WSN) が注目されている。WSN では、観測したい環境に安価な多数のセンサノードと呼ばれるものを配置し、それらを無線マルチホップ通信しノードがセンシングによって得た情報を交換することで大規模な環境観測を実現する研究が行われている。

WSN では、一般的に電波による通信が用いられる。電波通信における問題の一つとして、伝搬遅延の問題がある。この伝搬遅延の問題を解決するため、PSFQ (Pump Slowly and Fetch Quickly) によるホップバイホップ通信を用いた手法がある¹⁾。これは、TCP がタイムアウトしてしまいデータを確実に伝搬出来ない問題を効率的な符号化を用いることで可能とした手法である。他に、CODA (Congestion Detection and Avoidance) を用いた手法がある²⁾。これは、輻輳によるデータの損失を防ぐために CODA における開ループと閉ループの動作を組み合わせることで高速な動作と効率的な状態を維持しデータの損失を防ぐ手法である。

また、WSN では効率的な通信を行うため、時間分割多元接続 (TDMA: Time Division Multiple Access), 周波数分割多元接続 (FDMA: Frequency Division Multiple Access), 符号分割多元接続 (CDMA: Code Division Multiple Access) など様々な MAC プロトコルが提案されている。しかし、水中では帯域幅が制限されているため、FDMA および CDMA は効率的な通信ができない。このため、UWSN では帯域幅に依存しない TDMA を利用した研究が盛んである。また、TDMA では、伝搬遅延が問題とされる。

現在、WSN では、水中に応用させた UWSN (Underwater Wireless Sensor Network) がある。WSN では、一般的に電波による通信を行っているが、水中では電波の減衰が著しい。また、利用できる通信帯域幅が限られてくるため、UWSN では音響による通信が一般的である。

音響による通信では、電波による通信と同様に、干渉や伝搬遅延の問題があり、更には、ドップラー効果が問題とされている。水中における音響通信では、伝搬遅延が著しく、セン

^{†1} 広島市立大学 情報科学研究科 システム工学専攻
Hiroshima City University Graduate School of Information Sciences Department of Systems Engineering

サノードの受信タイミングが異なる。また伝搬遅延の問題は、通信における輻輳に対しても深刻な問題であり、輻輳制御は非常に困難な問題である。

そこで我々は、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を用い通信における優先度を決定し、データ収集経路と優先順位から伝搬遅延を考慮した水中ワイヤレスセンサネットワーク (UWSN) のための効率的なタイムスロットスケジューリングを提案する。

本研究では、GA によって通信における優先度を割り当て、データ収集経路の考慮による優先度の更新と輻輳の可能性を考慮したタイムスロットの割り当てを3段階に分けているところに特色がある。また、提案手法を評価するためシミュレーション実験を行った。その結果、ガードタイムを用いた手法と比較して、37% 程度少ないタイムスロット数での割り当てを得ることが出来た。

2. 関連研究

現在、WSN は水中に應用され、UWSN として研究がされている。UWSN のアプリケーション例としては、海洋環境観測、海底資源調査などが考えられる。これらの観測により、石油や石炭に代わる新たなエネルギーの発見やレアメタルなどの発見が期待される。しかし、水中では、帯域幅が制限されることや海流の影響、センサノードの汚染・腐食、リアルタイム性などさまざまな問題が挙げられる³⁾。

Ian F. Akyildiz らは、UWSN における様々なアプリケーションに対して、効率的なデータ通信のために UWSN のアーキテクチャを提案している⁴⁾。この文献では、海面付近に存在するセンサノードの海流によるセンサノードの移動を問題視している。

Chao Lu らは、UWSN における時刻同期手法を提案している⁵⁾。この文献では、UA-TSP と呼ばれる時刻同期手法により伝搬遅延を保証し、シミュレーション実験により通信効率と消費電力がより最適となるような時刻同期を達成している。

また、Li Liu らは、センサノードにあまり移動が見られないようであれば、頻繁な時刻同期が必要でないとし、データ経路生成時間を短縮している⁶⁾。

X.Che らは、浅い海域での電波通信を用いた TDMA を利用した手法を提案している⁷⁾。この文献では、小規模なネットワークにおいて VLF 技術を利用し、TDMA におけるタイムスロットスケジューリングを提案し、さまざまなネットワークシナリオに対する性能を評価している。

著者の知る限り、UWSN における伝搬遅延を考慮したタイムスロットスケジューリングの提案は行われていない。

3. 問題定義

3.1 概要

本研究では、以下の様な海底における環境調査のための UWSN アプリケーションを想定する。図1のようにフィールド上に基地局ノード s_0 を含んだセンサノードが配置され、各センサノードは周辺の温度などの環境データをセンシングによって周期的に計測する。計測された環境データは、マルチホップ通信によって基地局ノード s_0 へとデータを集約される。その際、ノード s_5 とノード s_4 が同時にデータを送信すると、ノード s_2 で受信する際に輻輳してしまう。本研究における問題の目的は、全てのセンサノードから基地局ノードへデータを収集するまでの時間を最小化することである。なお海底では、海流の影響も少ないとして、本研究において設置されたセンサノードが海流によって移動することは考慮しない。また、海底は水平なものとし、海嶺や海溝などの音響通信を妨げる障害物がないものとする。

3.2 仮定

UWSN におけるセンサはすべてネットワーク上のノードであるとみなし、ネットワークはセンサノードと基地局ノードの2種類によって構成される。センサノードは、センシングを行うことで周囲の情報を収集することが可能であり、データの集約をしながらマルチホップ通信によって基地局ノードへセンシングデータを送信する。この時、他のセンサノードが自身のセンシングデータと共に中継して基地局ノードへとセンシングデータを収集する。基地局ノードは、全センサノードからセンシングデータを収集しており、基地局ノードからなるデータ収集経路の木をデータ収集木とする。なお、データを収集する際は、データ収集木上における子ノードからデータが送信されていない時、親ノードはデータを送信しないとする。ここで、UWSN における全てのセンサノードの集合を、 $S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_n\}$ とし、各センサノードには初期位置が与えられる。センサノードは、音波によって通信を行うことが可能であり、その音波の最大通信距離は $R[m]$ である。また、センサノードのセンシングデータ量は $D[bit]$ とし、通信伝搬速度は $V[m/s]$ 、単位時間あたりのデータ送信量は $B[bps]$ である。

3.3 タイムスロット

あるノードが複数のノードからデータを同時に受信した時に輻輳する。また、あるノード自身が送信していても輻輳をする。この輻輳を避けるために TDMA(時分割通信) を利用するが⁷⁾、水中の伝搬遅延により通信と受信の間にタイムラグが生じる。そこで各ノードに対して“通信してよい”時間枠(以降、タイムスロット)を与え、輻輳しないようなスケジュー

ルを与える．センサノードの通信スケジューリングのために，1つが $t[s]$ の大きさのタイムスロットを用いる．タイムスロットの割り当て例を図2に示す．ノード s_5 が $t = 1$ に送信すると， s_2 と s_4 にはタイムラグが発生するために $t = 4$ に受信する．

3.4 インスタンスの例

ここでは，センサノード5つ，基地局ノード1つのインスタンスの具体例を示し，本問題について解説する．図1に示すような配置のセンサノード $s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$ を考える．各ノード $s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$ には，初期位置が与えられる．また，センシングデータ D は $1024[\text{bit}]$ ，最大通信距離 R は $5000[\text{m}]$ ，単位時間当たりのデータ送信量 B は $320[\text{bps}]$ ．また，タイムスロット t は $1[\text{s}]$ 毎に1つ割り当てる．通信伝搬速度は， $V = 1,500[\text{m/s}]$ とする．このインスタンスに対して，図2に示すようなタイムスロットスケジュールを与えることが出来る．この例では，タイムスロット数が22である．この数を最小化する様なデータ通信スケジュールを求めることが本問題の目的である．タイムスロットスケジュールは，輻輳が発生しないようにスケジューリングされる．

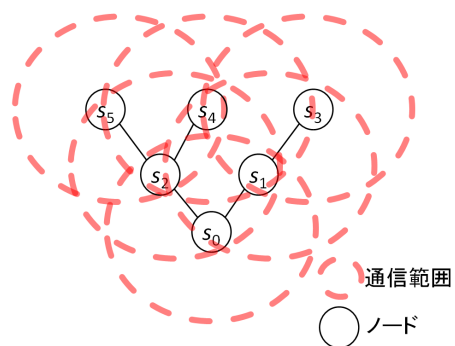


図1 ノードの配置図

4. 提案手法

4.1 概要

本章では提案手法である，水中ワイヤレスセンサネットワークのための伝搬遅延を考慮したタイムスロットスケジューリング手法について述べる．提案手法は，GAによって通信における優先度を割り当て，データ収集木の考慮による優先度の更新と輻輳の可能性を考慮

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
s_0																						
s_1																						
s_2																						
s_3																						
s_4																						
s_5																						

図2 タイムスロット割り当ての例

したタイムスロットの割り当てのように3つの段階に分ける手法となっている．手順は以下の通りである．まず，優先度割り当てでは，優先度がGAの遺伝子として与えられ，優先度の数値が低い方から通信をしていく．次に，優先度更新では，データ収集木を考慮し，基地局へデータを効率よく収集するように優先度を並び替え，更新する手順をとる．最後に，タイムスロット割り当てでは，優先度順に輻輳が起きないようタイムスロット数が最小の位置で通信処理時間(送信・受信)を割り当てる．以上のように，提案手法では優先度によりセンサノードの通信を順序付け，優先度とデータ収集木より優先度を更新し，遺伝的アルゴリズムによって効率よくタイムスロットを割り当てていく点に特徴がある．

4.2 遺伝的アルゴリズム

4.2.1 概要

遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)は，ダーウィンの進化論に基づく生物界の「遺伝の法則」を模倣した組合せ最適化アルゴリズムの1つである．

4.2.2 遺伝子の符号化法

提案手法では，解をデータ収集木の木構造(接続先)と，各ノードの通信の優先度(優先度(更新前))に分けて符号化する．データ収集木は，各ノードに対するデータの送信先のノード番号を“接続先”として表現する(表1上部)．ただし，基地局ノードの接続先は“-1”とする．データをノード s_i から s_j へ送信する際，“接続先”ノードである s_j を親ノード，接続元である s_i を子ノードとする．表1の例は，図1で表されたデータ収集木を表している．各ノードの通信の優先度は，各センサの優先度(更新前)として与える(表1下部)．適応度を計算する際，この優先度はまずデータ収集木の構造を考慮して更新され(4.3.1項で後述)，優先度(更新後)の数字の小さいものから順に輻輳しないようタイムスロットを割り当てる．

4.2.3 初期個体群の生成

データ収集木の構築：初期個体群の接続先部分の初期化方法について述べる．以下のアルゴリズムを用いてデータ収集木をランダムに生成し，各個体に対して与える．

- (1) 基地局ノード s_0 の通信範囲内にあるノード s_i をランダムに1つ選択．
- (2) $V_T = \{s_0\}, \{s_i\}, E_T = \{e_{s_0, s_i}\}$ から初期木 $T = (V_T, E_T)$ を構成．ただし， e_{s_i, s_j} はノード s_i とノード s_j 間の枝．連結候補のノード集合を $U = V_T$ ．未接続のノード集合を $U' = S \setminus V_T$ ．ただし， S はノード全体の集合．
- (3) ($U = \emptyset$) かつ ($U' \neq \emptyset$) ならば，エラー（後述）としてアルゴリズム終了．
- (4) $s_j \in V_T$ をランダムに1つ選択． $U = U \setminus \{s_j\}$ ．
- (5) 未接続のノード集合 U' 内に， s_j の通信範囲内のノードが一つも存在しなければ，ステップ(4)へ．
- (6) 選択したノード s_j の通信範囲内にあるノード $s_k \in U'$ をランダムに1つ選択．
- (7) $V_T = V_T \cup \{s_k\}, E_T = E_T \cup \{e_{s_j, s_k}\}, U' = U' \setminus \{s_k\}, U = V_T$ ．
- (8) $U' = \emptyset$ ならば， $T = (V_T, E_T)$ を戻り値としてアルゴリズム終了．
- (9) ステップ(4)へ．

このアルゴリズムでのエラーは，基地局から連結できないノードが存在することを示す．アルゴリズムがエラーとして終了した場合，全てのノードでデータ収集木を構築できないためアルゴリズム全体を終了とする．

優先度（更新前）：ここでは，優先度（更新前）部分の初期化方法について述べる．優先度（更新前）として，巡回セールスマン問題と同様に各ノード毎に優先度が重複しないようランダムに順列を与える．

4.2.4 交 叉

選択した2つの個体間において遺伝子の一部を交換して新しい個体を生成する操作である．ただし，接続先での交叉は考慮せず，優先度のみ交叉を適用する．

優先度部分の交叉：優先度の遺伝子では，巡回セールスマン問題において巡回する利潤を順序付けることと似ているため，同様の交叉を用いることができる．ここでは，PMX法を用いる．

4.2.5 突然変異

接続先部分の突然変異：遺伝子の接続先部分では，基地局ノード以外からランダムに選択したセンサノードの接続先を他のセンサノードに繋ぎかえる方法を用いる．アルゴリズムは以下の通りである．

表 1 遺伝子型での符号化

ノード番号	s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
接続先	-1	0	0	1	2	2
優先度 (更新前)	6	2	1	3	4	5

表 2 更新後の優先度

ノード番号	s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
優先度 (更新後)	6	5	4	2	3	1

- (1) 基地局ノード以外からランダムにノード s_i を選択．
- (2) 選択したノード s_i の接続先ノード s_j との辺 e_{s_i, s_j} を削除 ($E_T = E_T \setminus \{e_{s_i, s_j}\}$) し，ノード s_i が存在する部分木を T_1 と， s_j が存在する部分木 T_2 に分割． T_2 のノード集合をコピーした集合 $U = V_{T_2}$ ．
- (3) U からランダムにノード s_k を選択． $U = U \setminus \{s_k\}$ ．
- (4) ノード s_k がノード s_i の通信範囲内であれば， $E_T = E_T \cup \{e_{s_i, s_k}\}$ とし，ステップ(6)へ．
- (5) そうでなければ，ステップ(3)へ．
- (6) $T = (V_T, E_T)$ を戻り値としてアルゴリズム終了．

優先度部分の突然変異：優先度の遺伝子では，交叉の時同様に巡回セールスマン問題で利用される突然変異と同様の2都市間順序入れ替えを用いる．

4.3 適応度の計算

4.3.1 優先度の更新

この節では，遺伝子で与えられた優先度（更新前）を，“子ノードからのデータを受け取らない状態で親ノードへデータを送信しない”という制約（3.2節参照）を満たすように優先度を更新するアルゴリズムについて述べる．各センサノードには優先度が割り当てられ，図1に示すようなデータ収集木を基に，表2の様に更新する．優先度の更新方法は，以下の手順の通りである．

- (1) 初期状態として，子ノードのいないノード集合を S' ．更新候補のノード集合を $Q = S' \setminus \{s_0\}$ ．更新状態のノード集合を $Q' = \emptyset$ ．はじめに更新する優先度を $p = 1$ ．
- (2) 更新候補のノード集合 Q 内から最も優先度の値が小さい（より優先される）ノード s_i を選択し，優先度を p に更新． $Q = Q \setminus \{s_i\}$ ． $Q' = Q' \cup \{s_i\}$ ． $p = p + 1$ ．

- (3) ステップ(2)で選択したノード s_i に親ノード s_j があり、ノード s_j の子ノード全てが Q' の要素であれば、 $Q = Q' \cup \{s_j\}$ とし、ステップ(5)へ。
- (4) そうでなければ、ステップ(2)へ。
- (5) $Q = \emptyset$ であれば、アルゴリズム終了。
- (6) そうでなければ、ステップ(2)へ。

4.3.2 タイムスロット割り当て

4.3.1 項で更新した優先度を用いて、各ノードに通信(送信・受信)するタイムスロットを割り当てる方法を割り当てる。割り当て方法は、以下の手順の通りである。優先度を割り当てるタイムスロットを L_i^s とする。ここで、 t は時刻、 s はノードである。時刻 t にノード s_i が送信した時のノード s_j の受信時刻を $t_{ij} = t + \lceil \text{latetime}(s_i, s_j) \rceil$ とし、 $\text{latetime}(s_i, s_j)$ はノード s_i とノード s_j との通信に発生する遅延時間とする。また、通信時間を $C = D/B$ とし、 D をデータ量、 B を単位時間当たりのデータ送信量とする。ここで、ノード s_i の送信開始時刻を t_i^{start} とすると、送信終了時刻は $t_i^{\text{end}} = \lceil t_i^{\text{start}} + C \rceil$ 。また、ノード s_i のデータを受信するノード s_j の受信開始時刻は $t_{ij}^{\text{start}} = t_i^{\text{start}} + \lceil \text{latetime}(s_i, s_j) \rceil$ となり、受信終了時刻は $t_{ij}^{\text{end}} = \lceil t_{ij}^{\text{start}} + C \rceil$ 。

- (1) 優先度 $p = 1$ とし、優先度が p のノード s_i を選択。
- (2) ステップ(1)で選択したノード s_i に子ノードがない場合 $t_{s_i}^{\text{start}} = 1$ とし、ステップ(4)へ。
- (3) 選択したノード s_i に子ノードがある場合 $t_{s_i}^{\text{start}} = \text{finish}(s_i) + 1$ 。この時、 $\text{finish}(s_i)$ はノード s_i の子ノードからのデータ受信に割り当てられたタイムスロットの中で、最大のタイムスロットの番号(つまり受信終了のタイミング)。
- (4) ノード s_i の通信範囲内のノード集合を N_{s_i} 。“タイムスロット $L_{t_{\text{start}}}^{s_i} \sim L_{t_{\text{end}}}^{s_i}$ が他の通信に割り当てられていない”かつ“ $s_j \in N_{s_i}$ の全ノードのタイムスロット $L_{t_{\text{start}}}^{s_j} \sim L_{t_{\text{end}}}^{s_j}$ が他の通信に割り当てられていない”ならば、ステップ(6)へ。
- (5) そうでなければ、 $t = t + 1$ とし、ステップ(4)へ。
- (6) タイムスロット $L_{t_{\text{start}}}^{s_i} \sim L_{t_{\text{end}}}^{s_i}$ および $s_j \in N_{s_i}$ の全ノードの $L_{t_{\text{start}}}^{s_j} \sim L_{t_{\text{end}}}^{s_j}$ に割り当て、 $t = t + 1$, $p = p + 1$ 。
- (7) $p < n + 1$ であればステップ(1)へ。そうでなければ、終了。

5. 実験

5.1 実験：提案手法の性能実験

提案手法の性能を評価するため、得られたスケジュールのタイムスロット数を計測した。比較対象として、ガードタイムを利用した手法(従来手法)、および提案手法のGA部分をランダム探索に置き換えた手法(ランダム)を用いた。また実験環境として、OSはMicrosoft Windows 7 Professional Service Pack 1を、コンパイラはgcc version 4.5.3を用いた。

5.1.1 ノード数の変化によるタイムスロット数の評価

ノード数を10から100まで変化させて実験を行った。実験結果を図3に示す。この結果は30回試行の平均である。

ノード数50の時に、ガードタイムを用いた手法より提案手法が37%程度少ないタイムスロット数のスケジュールを得ていることが分かる。このことから、遅延時間の隙間に他の通信を割り当てる提案手法が有効であると考えられる。

また、ノード数が50の時に、ランダム探索を用いた手法より提案手法が5%程度少ないタイムスロットスケジュールを得ていることが分かる。このことから、あまり大きな差ではないが、GAを用いてデータ収集経路やタイムスロットの組み合わせを得ることがある程度有効であると考えられる。

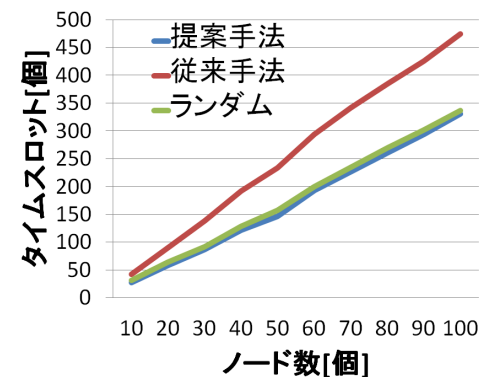


図3 ノード数の変化に対する評価

5.1.2 ノード密度に対するタイムスロット数の評価

ノード数を 50 個に固定し、フィールド 1 辺の長さを 2500[m] ~ 50000[m] で変化させて実験を行った。実験結果を図 4 に示す。この結果は 30 回試行の平均である。なお、基地局ノードはフィールドの中心に配置した。

フィールドの大きさが 4000[m] の時、ガードタイムを用いた手法より提案手法が 10% 程度少ないタイムスロット数のスケジュールを得ていることが分かる。

また、フィールドの大きさが 4000[m] の時、ランダム探索を用いた手法より提案手法が 14% 程度少ないタイムスロットスケジュールを得ていることが分かる。

フィールドが狭いとタイムスロット数が大きいのは、通信範囲内にノードがより多く存在すると輻輳を起しやすくタイムスロットをより多く消費してしまうからであると考えられる。

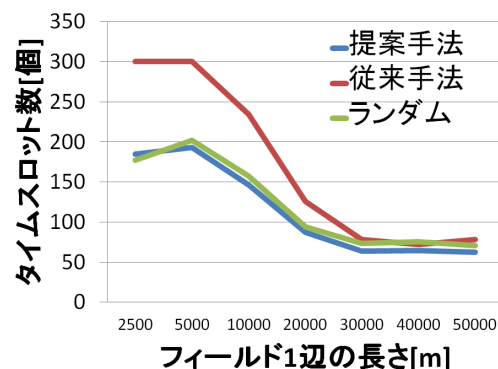


図 4 ノード密度変化に対する評価

6. おわりに

本研究では、GA を用い通信における優先度を決定し、データ収集経路と優先順位から伝搬遅延を考慮した水中ワイヤレスセンサネットワーク (UWSN) のための効率的なタイムスロットスケジューリングを提案した。本研究では、GA によって通信における優先度を割り当て、データ収集経路の考慮による優先度の更新と輻輳の可能性を考慮したタイムスロット

の割り当てを 3 段階に分けている点に特色がある。提案手法によって得られたタイムスロットスケジューリングの評価を行うために、比較手法としてガードタイムを用いた手法と比較した。その結果、それぞれ 37% 程度少ないタイムスロットスケジュールを得ることが出来た。このことから提案手法が伝搬遅延を考慮した水中ワイヤレスセンサネットワークのタイムスロットスケジューリングに有効であることが分かった。今後の課題としては、タイムスロットの大きさの影響、音波の合成による影響、ドップラー効果による影響について調査する予定である。また、遅延時間の不連続性がタイムスロット方式と相性が悪いいため、タイムスロットを用いない方法への拡張などがあげられる。

参考文献

- 1) C. -Y. Wan, A. T. Campbell, and L. Krishnamurthy, "PSFQ: A Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks," In WSNA, 2002 .
- 2) C. -Y. Wan, S. B. Eisenman, and A. T. Campbell, "CODA: Congestion Detection and Avoidance in Sensor Networks," In ACM SenSys, 2003 .
- 3) J. H. Cui, J. Kong, M. Gerla, S. Zhou, "Challenges: Building Scalable Mobile Underwater Wireless Sensor Networks for Aquatic Applications," UCONN CSE tech . repo . UbiNET-TR05-02, 2005 .
- 4) I. F. Akyildiz, D. Pompili and T. Melodia, "Challenges for Efficient Communication in Underwater Acoustic Sensor Networks," ACM SIGBED Review, Vol. 1(1), 2004 .
- 5) C. Lu, S. Wang and M. Tan, "A time synchronization method for Underwater Wireless Sensor Networks," Control and Decision Conference IEEE, pp.4305-4310, 2009 .
- 6) L. Liu, "Time Synchronization of Underwater Wireless Sensor Networks," http://www.intechopen.com/source/pdfs/12456/InTech-Time_synchronization_of_underwater_wireless_sensor_networks.pdf, 2010 .
- 7) X. Che et al., "Frame Design for a Prototype Underwater RF Electromagnetic Communication Sensor System," ASTEC Internal Publications, <http://www.fishnetz.co.uk/Publications.html> .
- 8) "LinkQuestInc." <http://www.link-quest.com/index.htm> .