

Underwater Sensor Network における ルーティングプロトコルの性能比較

加藤凌^{†1} 高野敦弘^{†1} 大木哲史^{†2} 甲藤二郎^{†1}

本稿では、水中環境での音波通信を前提として、DBRの欠点の克服を目的としてノードの配置方法とネットワーク性能の関係について調査した後、ルーティングプロトコル(AODV, DSDV, DBR)によるネットワーク性能比較実験を行った。評価項目はパケット到着率、end-to-end 遅延、ネットワーク全体のエネルギー消費量とした。本実験より DBRの欠点の1つである冗長パケットの多さは、ノードの配置方法を工夫することにより、改善できることを確認した。さらにルーティングプロトコルによるネットワーク性能の差も確認することができた。

A Performance Comparison of Routing Protocols in Underwater Sensor Networks

RYO KATO^{†1} ATSUHIRO TAKANO^{†1} TETSUSHI OKI^{†2} JIRO KATTO^{†1}

1. はじめに

近年、Underwater Sensor Networks(以下 UWSNs)は海中の観測データを収集するネットワークとして注目されている。海洋データの収集、汚染調査、災害の予防、軍事監視など様々な分野での活躍が期待されている。しかし、海中でのデータ転送は利用帯域の制限、雑音の影響による高エラーレート、音波通信による高遅延などの問題がある。そのため、地上用に提案されているルーティングプロトコルは不向きとされているが、位置情報によりルーティングを行う Geographical 型のルーティング手法は UWSNs に向いているとされている[1]。そこで本稿ではネットワークシミュレータ ns-3 を用いて Underwater 環境に適しているとされる Geographical ルーティング手法の一つである DBR と地上無線通信において代表的なルーティングプロトコルである AODV、DSDV を Underwater 環境で動作させ、パケット到着率、end-to-end 遅延、消費エネルギーについて評価を行う。

2. DBR (Depth Based Routing) [2]

DBR は UWSNs 向けに提案されているルーティング手法の一つである。3次元の位置情報は必要とせず、水深情報のみを必要とするため、GPS が使えない水中環境に適していると考えられている。sink が水面にあることを想定しており、水面に向けてブロードキャスト方式で、パケットの転送が行われる。つまり経路をたどると転送ノードの水深は、徐々に浅くなる。複数のノードが、同じパケットを重複してブロードキャストしてしまうことを防ぐために、以下の(1)に示す holding time という概念が組み込まれている。

ここで d は対象ノードと 1hop 前のノードとの水深差、 R は転送可能範囲、 τ は R/v_0 、 v_0 は水中での音波通信速度である。

$$f(d) = \left(\frac{2\tau}{\delta}\right) \times (R - d), \quad \delta \in (0, R]. \quad (1)$$

3. WHIO micro modem [3]

WHIO micro-modem は海中音波通信で用いられる代表的な音波モデムである。これは変調方式として FSK(80bps)と PSK(300~5000bps)のどちらかを選択することが可能で、送信状態(TX)、受信状態(RX)、待機状態(IDLE)、休止状態(SLEEP)の4状態を遷移しながら通信を行う。各状態での消費電力の値を表3.1に示す。

表3.1 WHIO micro-modem における消費電力

TX	RX	IDLE	SLEEP
10~50W	80mW~3W	80mW	≈ 0

表3.1からもわかる通り、WHIO micro-modem では他の状態に比べ送信状態の消費電力が非常に大きいという特徴がある。これは、地上無線通信と比較した際の海中通信の特徴の一つであり、パケットの送信によって消費されるエネルギーが非常に大きいことを意味している。

ここで送信状態における消費電力は、送信元での音圧をどのような値にするかにより大きく変わり、水深 H が浅い場合($H \leq 100m$)は式(2)、深い場合($H > 100m$)は式(3)で表される。ここで SL は送信元での音圧である。[4]

$$P_{tx}(d) = 2\pi H \times 10^{\frac{SL}{10}} \times 0.67 \times 10^{-18} \quad (2)$$

$$P_{tx}(d) = 4\pi \times 10^{\frac{SL}{10}} \times 0.67 \times 10^{-18} \quad (3)$$

4. 予備シミュレーション実験(ノードの配置方法とネットワーク性能の調査)

DBR はブロードキャスト方式でデータの転送が行われるために冗長パケットが多くなるという欠点がある。そこでノードの配置方法を工夫することにより、上記の欠点を克服することを目標にノードの配置方法とネットワークの性能の関係について調査を行なった。図 4.1、4.2、4.3 に示すような 3 種類のノードの配置方法を考える。

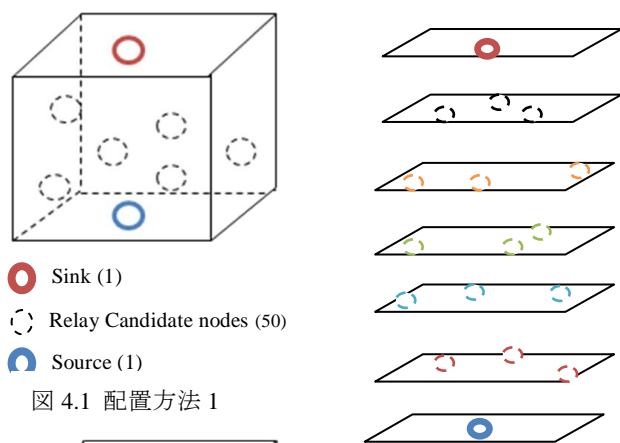
1 つ目の配置方法は中継候補ノードをすべてランダムに配置する方法である。この配置方法を以後、ランダム配置と呼ぶことにする。2 つ目の配置方法は、対象エリアを上下に 2 分割し、それぞれに 25 個ずつ中継候補ノードを配置する方法である。25 個の中継候補ノードの配置方法についてはランダムである。この配置方法を以後、2 分割配置と呼ぶことにする。3 つ目の配置方法は、sink-source 間に等間隔になるような layer を用意し、各 layer に均等数のノードを配置する方法である。今回は 5 つの layer を用意し、各 layer に 10 個ずつノードを配置する。なお layer 内のノードの配置方法についてはランダムである。この方法を以後、layer 配置と呼ぶことにする。なお、sink ノードは対象範囲の海水面の中心、(x, y, z)=(150, 150, 0)に、source ノードは対象範囲の海底面の中心(x, y, z)=(150, 150, -300)に配置し、すべてのノードは固定されていると仮定する。

表 4.1 に実験に使用したパラメータを示す。

表 4.1 実験パラメータ

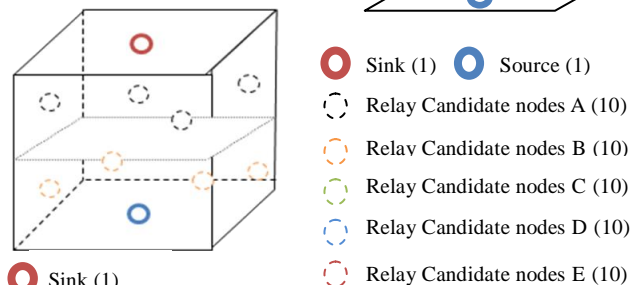
トランスポートプロトコル	UDP
ルーティングプロトコル	DBR
MAC 伝送レート	80[bps]
パケットサイズ	32[byte]
対象範囲	300×300×300 [m]
中継候補ノード数	50
ノード転送範囲 R	100[m]
Holding time 係数 δ	R/2
Holding time しきい値	0.7
シミュレーション時間	200[s]
試行回数	50

シミュレーション結果から得られたノード配置方法とパケット到着率についての関係を図 4.4 に、ノード配置方法と end-to-end 遅延についての関係を図 4.5 に、ノード配置方法と sink における重複受信パケット数の関係を図 4.6 にそれぞれ示す。



- Sink (1)
- Relay Candidate nodes (50)
- Source (1)

図 4.1 配置方法 1



- Sink (1)
- Relay Candidate nodes A (25)
- Relay Candidate nodes B (25)
- Source (1)
- Relay Candidate nodes C (10)
- Relay Candidate nodes D (10)
- Relay Candidate nodes E (10)

図 4.2 配置方法 2

- Sink (1)
- Relay Candidate nodes A (10)
- Relay Candidate nodes B (10)
- Relay Candidate nodes C (10)
- Relay Candidate nodes D (10)
- Relay Candidate nodes E (10)

図 4.3 配置方法 3

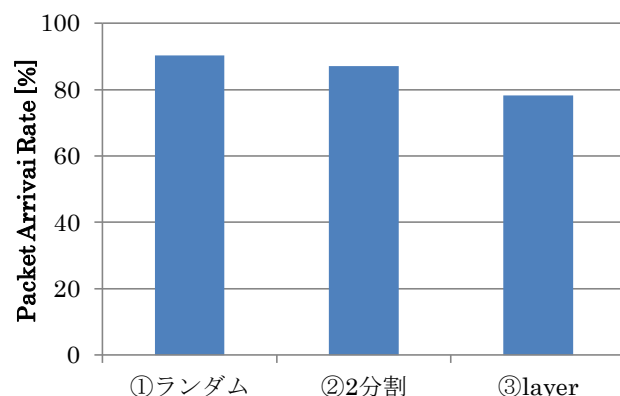


図 4.4 ノード配置方法とパケット到着率の関係

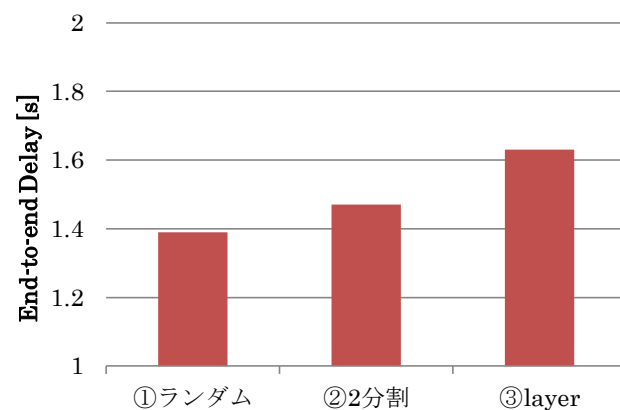


図 4.5 ノード配置方法と end-to-end 遅延の関係

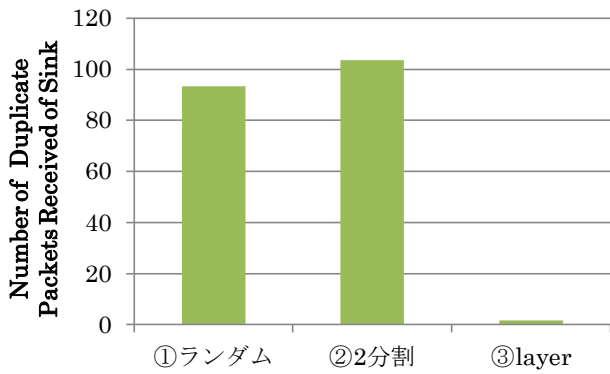


図 4.6 ノード配置方法と重複受信パケット数(sink)の関係

まず、パケット到着率について評価する。図 4.4 より中継ノードをランダムに配置した場合に最も高いパケット到着率を示すことがわかる。その理由として、2 分割、layer 配置の場合、転送候補ノードが見つからなくパケットロスが起きる可能性が高くなり、結果的に低いパケット到着率につながっていると考えられる。実際に、2 分割配置、layer 配置の場合のシミュレーションログ画面からは、パケットロス起きている場面はノードが疎の部分が発生しており、転送候補ノードが見つかっていないことが見られた。

次に end-to-end 遅延について評価する。図 4.5 より、ランダム配置、2 分割配置については、ほぼ同じ遅延時間を示しているが、layer 配置の場合に大きな end-to-end 遅延時間につながる事が分かる。この理由として、他の 2 パターンの配置方法に比べて、layer 配置は実際に通る中継ノードの数が多い可能性が高く、そのため大きな遅延につながっていると考えられる。実際にシミュレーションログ画面からは、layer 配置の場合は常に 5 つの中継ノードを通過して sink に到達しているのに対して、ランダム配置、2 分割配置の場合は、4 つの中継ノードを通過して sink に到達している場合が多く、中には中継ノードが 3 つ場合も存在することが見られた。また、layer 配置は、試行回数による値の差がほとんど見られなかったのに対して、ランダム配置、2 分割配置は、試行回数によって値のばらつきが見られた。

最後に sink における重複受信パケット数について評価する。図 4.6 より、ランダム配置、2 分割配置の場合は sink において過去に受信したものと同一のパケットを何度も受信しているのに対して、layer 配置の場合は、その数がほぼ 0 になっていることがわかる。このような冗長パケットの発生要因として、複数の転送候補ノードがとても近いことがあげられる。そのため、ノード密集エリアが発生しやすいランダム配置や 2 分割配置においては多くの冗長パケットが発生していると考えられる。以上より、layer 配置は他の 2 つの配置方法に比べて、効率的にルーティングが行われる可能性が高いといえる。本実験の目的である受信重複パケット数の減少は、ノードの配置方法を layer 型にすることにより、達成することができた。

5. シミュレーション実験(ルーティングプロトコル性能比較)

ノードの平均移動速度を 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0m/s と変化させてルーティング プロトコル(AODV、DSDV、DBR)による性能の比較・評価を行った。移動方向についてはノード毎にランダムに与えられると仮定する。また移動に関しては x、y 方向のみとし、z 方向には移動しないと仮定する。表 5.1 に実験に使用したパラメータを示す。

表 5.1 実験パラメータ

トランスポートプロトコル	UDP
ルーティングプロトコル	AODV、DSDV、DBR
MAC 伝送レート	80[bps]
パケットサイズ	32[byte]
対象範囲	300×300×300 [m]
中継候補ノード数	50
ノード転送可能範囲 R	100[m]
ノード配置方法	layer 配置 (5layer)
Holding time 係数 δ	R/2
Holding time しきい値	0.7 [seconds]
シミュレーション時間	600 [seconds]
パケット送信開始時間	100 [seconds]
試行回数	25

シミュレーション結果から得られたノード平均移動速度とパケット到着率についての関係を図 5.1 に、ノード平均移動速度と end-to-end 遅延についての関係を図 5.2 に、ノード平均移動速度とネットワーク全体のエネルギー消費量の関係を図 5.3 にそれぞれ示す。

なお、エネルギー消費量を評価するにあたり、本稿の第 3 章で述べた式(2)、(3)を ns-3 に組み込み、音圧を指数として各ノードの送信電力を求めることができたようにした。また伝搬損失 TL についても以下の式(4)、(5)、(6)のように変更を加えた[4]。ここで d はノード間距離、f は周波数である。なお本実験では周波数を 10kHz としている。

水深 H が浅い($H \leq 100\text{m}$)場合:

$$TL = 10\log d + \alpha d \times 10^{-3} \quad (4)$$

水深 H が浅い($H \leq 100\text{m}$)場合:

$$TL = 20\log d + \alpha d \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$\alpha = 0.1 \frac{f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4}f^2 + 0.003 \quad (6)$$

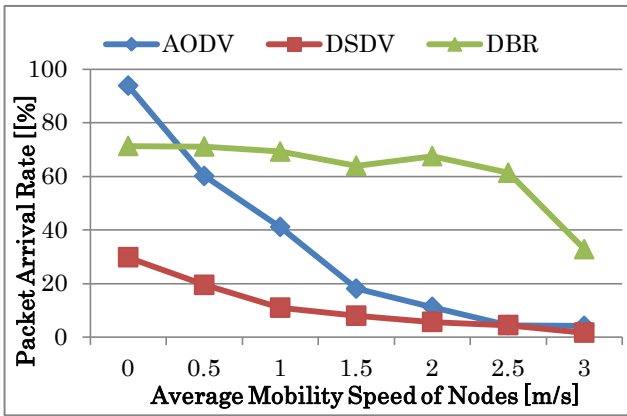


図 5.1 ノード平均移動速度とパケット到着率の関係

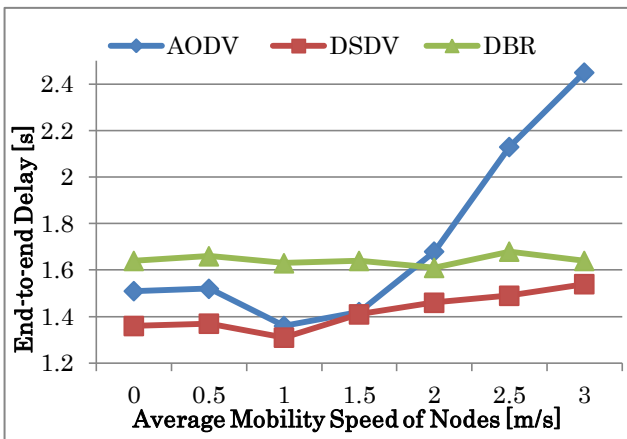


図 5.2 ノード平均移動速度と end-to-end 遅延の関係

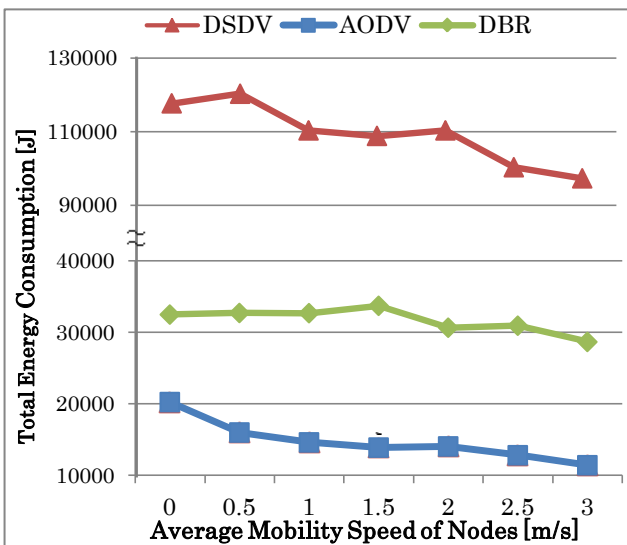


図 5.3 ノード平均移動速度とエネルギー消費量の関係

まずパケット到着率について評価する。図 5.1 よりノードの移動がない場合、つまりノードの移動速度が 0m/s の場合は AODV が非常に高く逆に DSDV が非常に低いことがわかる。さらにノードの移動がある場合は、どのルーティングプロトコルも移動速度の増加に伴い、減少傾向にあるが、DBR が最も減少率が低いことがわかる。その理由とし

て DBR はブロードキャスト方式のため、複数の転送可能な経路が存在し、ある経路が転送不可能になった場合でも他の経路をたどり、sink までパケットを転送することができるためであると考えられる。AODV や DSDV はノードの移動速度の増加によるネットワークポロジィの変化に伴ってコントロールパケットが増加してしまい、データパケットが転送できない状態になるためにネットワーク性能が低下してしまうと考えられる。

次に end-to-end 遅延について評価する。図 5.2 より DBR は、ノード移動速度に関わらず end-to-end 遅延時間はほぼ一定であることがわかる。その理由は、どのノード移動速度の場合も転送ノードは各 layer につき 1 つであり、sink-source 間のホップ数は変化しないためであると考えられる。一方で、AODV はノード移動速度の増加に伴い、end-to-end 遅延時間は増加傾向にあることがわかる。これは、ネットワークポロジィの変化が激しくなるに伴い、経路の切断、経路の作成の頻度が増すためであると考えられる。

最後にエネルギー消費量について評価する。図 5.3 よりノードの移動速度に関わらず、AODV、DBR、DSDV の順にネットワーク全体のエネルギー消費量は小さいことがわかる。特に DSDV は AODV に比べて 6~10 倍、DBR に比べて 3~4 倍と非常に高い値を示している。これは DSDV では頻繁にコントロールパケットが転送されるために、パケットの転送回数が他のルーティングプロトコルに対して多くなるためであると考えられる。さらに DBR が AODV よりも常に高い値を示している理由としては、DBR では sink-source 間において複数の経路が存在する可能性があり、複数のノードが同一のパケットを送信してしまう場合があるためであると考えられる。また図 5.1 のパケット到着率のグラフと合わせて考えると、パケット到着率の低下に伴って、ネットワーク全体のエネルギー消費量は小さくなることがわかる。

6. まとめ

ノードの配置方法とネットワーク性能の関係の調査実験からは、DBR の欠点の 1 つである冗長パケットの多さはノードの配置方法を layer 配置にすることにより、軽減することができることを確認した。さらにルーティングプロトコルの性能比較実験からは、パケット到着率と end-to-end 遅延の面では、ノード移動がない場合や移動速度が小さい場合は AODV が良い性能を示し、ノード移動が大きい場合は、DBR が良い性能を示すことを確認した。またエネルギー消費の面からはノードの移動速度に関わらず AODV が最も良い性能を示すことを確認した。

†1 早稲田大学 大学院 基幹理工学研究科 情報理工学専攻
†2 早稲田大学理工学研究所研究員 次席研究員

参考文献

- [1]Dario Pompili and Ian F. Akyildiz “Overview of Networking Protocols for Underwater Wireless Communications” 2009 IEEE
- [2]H. Yan、 Z. Shi、 and J. Cui、 “DBR: Depth-based routing for underwater sensor networks” IFIP Networking、 2008.
- [3] Lee F.、 Matthew G.、 Sandipa S.、 James P.、 Peter K.、 Keenan B. “The WHOI Micro-Modem: An Acoustic Communications and Navigation System for Multiple Platforms”、 OCEANS、 2005
- [4] Hanjiang L.、 Zhongwen G.、 Kaishun W.、 Feng H.、 Yuan F. “Energy Balanced Strategies for Maximizing the Lifetime of Sparsely Underwater Acoustic Sensor Networks”、 Sensors2009、 2009.