

# 伝送速度が不均一な直列センサーネットワークにおける 転送スケジュールの最適化

木村 亮太<sup>†</sup> 鶴 正人<sup>†</sup>

<sup>†</sup>九州工業大学情報工学府 〒820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4  
E-mail: †kimura@infonet.cse.kyutech.ac.jp, ††tsuru@cse.kyutech.ac.jp

あらまし 通信インフラが未整備の地域や通信インフラを利用するコストに見合わない状況で、線的な領域を監視するセンサネットワークとして、センサと接続した中継ノードを直列に配置し、中継ノード間の簡易な無線通信を用いて、その両端にあるゲートウェイの片方までセンサデータを運ぶマルチホップ無線ネットワークを考える。ただしゲートウェイからサーバまでは信頼性のある通信インフラが使える。このような環境では、各無線リンクでの減衰やフェージング、リンク間干渉によりパケット損失が多発し、各ノードが無秩序にパケットを中継転送しても非効率でサーバへのパケット到達率は低い。先行研究では、ノードの位置やリンクの損失率を考慮し、ACKを使わない計画冗長転送によってパケット損失に対処する場合のパケット到達率を最大化するスロット割り当てと、FECを使うパケット転送とを組み合わせる手法を提案したが、リンクの伝送速度が均一の場合のみを扱った。そこで本研究では、リンクの伝送速度が不均一な場合も扱えるように拡張したパケット転送スケジュールを提案する。これにより、伝送速度が異なるリンクだけでなく、物理伝送速度が同じでも干渉によって実効伝送速度が異なるリンクも扱える。その有効性や課題を、現実に近い無線環境シミュレーションによって分析・評価した。

キーワード マルチホップ無線通信, パケット転送スケジューリング, リンク伝送速度, パケット損失率

## Optimal transfer schedule in a tandemly-connected sensor network with heterogeneous transmission rates

Ryota KIMURA<sup>†</sup> and Masato TSURU<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology 680-4 Kawazu, Iizuka-shi,  
Fukuoka, 820-8502 Japan

E-mail: †kimura@infonet.cse.kyutech.ac.jp, ††tsuru@cse.kyutech.ac.jp

**Abstract** As a sensor network to monitor a large elongated area in case that a communications infrastructure is unavailable or too costly, a multi-hop wireless network model is considered in which relay nodes accommodating sensors are arranged in tandem and connected by simple wireless links, and deliver the sensor data to gateways at both ends of the line. The gateways can reliably send the data to a server using an infrastructure. In such environments, since packet losses often happen due to attenuation/fading on each link and interference among links, an unscheduled packet forwarding is inefficient and the success ratio of packet delivery to the server. In our previous report, we proposed a packet transfer scheduling consisting of a slot allocation based on node positions and link loss rates, which maximizes the success delivery ratio of all sensor data when using planned retransmissions without ACK against packet losses, and a packet forwarding scheme based on FEC, but it is only for homogeneous links with the same transmission rate. Therefore, in this report, we propose an enhance version of the packet transfer scheduling to adapt to heterogeneous links including not only links with different physical transmission rates but with variable effective transmission rates depending on interferences. Simulations reflecting realistic wireless communications were used for evaluation, and have shown the usefulness of our proposal and some issues to be solved as well.

**Key words** Multi-hop wireless communications, packet transfer scheduling, link transmission rate, packet loss rate

## 1. まえがき

通信インフラが届いていない山間部の送電用鉄塔網や地中管網等を遠隔監視する場合に、センサと繋いだ中継ノードを、簡易な無線通信によって直列につなぎ、その両端にあるゲートウェイを経由して中央サーバとつなぐ形態が考えられる。この方法は敷設・運用共に低コストであり、有望である。しかし、中継ノード設置の物理的制約は大きく、ノード間距離や無線環境によってはパケット損失が無視できず、特に中継段数が多くなるとパケット損失による性能劣化が著しい。よって、各センサとサーバ間の単純な end-to-end パケット転送では非効率であり、信頼性も低く、実効転送レートも小さいので、アプリケーションの要求を満たさない可能性がある。我々のグループでは、図1のような、通信インフラが届いていない環境での直列マルチホップ無線ネットワークを対象とし、無線環境が劣悪な場合の性能や信頼性を最適化する中継方式の実現を目指している。その第一段階として、パケット損失率が高い場合でもサーバへのパケット到達率を向上させるパケット転送スケジューリングを提案し、モデルシミュレーションにおける効果が確認された。また Scenargie シミュレータを使用することで提案したスケジューリング手法が現実環境でも有効性があることが確認できた。[1][2] そこで本研究では、先行研究で同一(同種)とされていた伝送速度について、リンクの伝送速度が不均一な場合も扱えるように一般化を行う。これにより、導出された転送スケジューリングを用いて伝送速度が異なるような直列センサーネットワークにおいてもサーバへのパケット到達率を向上させ、信頼性を高めることを目的とする。また、Scenargie シミュレータを使用してより現実に近い環境でシミュレーションを行い、提案手法と従来手法、および ACK を用いた手法を比較することで、スケジューリングの有効性を評価する。

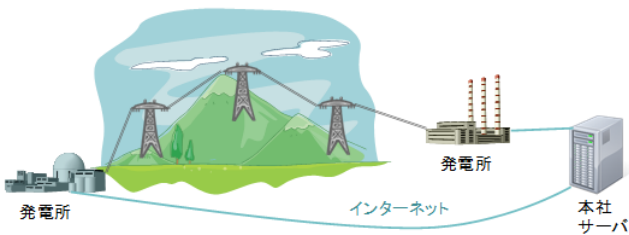


図1: 想定環境 [1]

## 2. 直列マルチホップ無線通信モデル

本研究では、無線リンクを介して各ノードが直列に接続されており、それらを中央サーバが管理して連携させるマルチホップ伝送モデルをモデル化する。これを直列マルチホップ無線通信モデルと呼ぶ。このモデルでは図2のような左側と右側の両方の端に配置された2つのゲートウェイと任意の数のノードが存在する(このときのノード数を  $n$  とする)ときのネットワークを考える。

各ノード  $N_i$  及びゲートウェイ(以下 GW)  $X, Y$  は無線リ

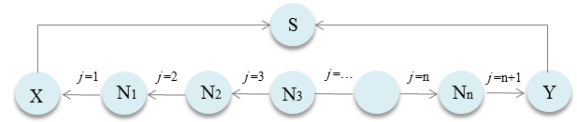


図2: 直列マルチホップ無線通信ネットワークモデル

ンク  $j(j = 1, 2, \dots, n + 1)$  で接続されている。各リンクの損失率は  $q_1 \sim q_{n+1} (0 < q_j \leq 1)$ , 伝送速度は  $b_1 \sim b_{n+1}$  で表す。サーバ  $S$  と両端の GW はパケット損失が発生しないインフラネットワークで接続されている。各ノードは  $X, Y$  のいずれかを介してサーバにパケットを届けることを目標とする。

ある一定期間  $D$  秒を1サイクルとし、各ノードはサイクルの先頭で同一長のパケットを1個ずつ生成する。1単位時間をスロットと呼び1スロットを  $U$  秒とする。これにより1サイクルのスロット数  $T$  は  $T = D/U$  となる。伝送速度から算出される各リンク  $j$  で1パケット送信に必要なスロット数を  $T_j$  とする。各リンク  $j$  は各パケットを  $T_j \times U$  秒以内に隣接ノードへ無線リンクを介して転送を行う。パケットは  $D$  秒以内に生成ノードから直列マルチホップ無線ネットワークの両端にある2つの GW のいずれかへ蓄積転送方式で中継され、GW から信頼性のあるインフラネットワークを介して中央サーバ  $S$  へ届けられる。同一タイムスロット時間内に2つのノードが送信を行う場合、同方向送信は2ノード分間を空けることで干渉の影響を抑える。サーバ  $S$  は、ノード数・送信可能時間・各リンクの損失率と伝送速度の全てを知っているものとする。

あるノード  $m$  と  $(m + 1)$  でネットワークを分離でき、ノード  $(1, 2, \dots, m)$  で生成されたパケットは  $X$  宛てとなり、その他のノード  $m + 1, m + 2, \dots, n$  で生成されたパケットは  $Y$  宛てとなる。これを  $((m, n - m)$  分離モデルと呼ぶ)。

## 3. 提案手法

パケット転送スケジューリングは、主にタイムスロット割り当てと転送パケット選択の2つから構成される。タイムスロット割り当てではどのタイミング(スロット)でどのノードがパケット転送を行うかを決定する。無線による干渉を避けるため、あるノードの転送中には近接ノードは送信を行わないことが望ましい。転送パケット選択では、割り当てられたスロットで自身が保持しているパケットの内、どのパケットを転送するかを決定する。

パケット転送スケジューリングの理論的な性能指標の1つは、あるノード  $k$  からサーバへのパケット到達率  $M_k$  である。本研究では各ノードからの全てのパケット到達率の積  $\prod_{k=1}^n M_k(x)$  を最大化することを目的とする。これは各ノードからのパケット到達率の対数和の最大化であり、また各リンクでのパケット損失が独立に発生している場合はすべてのノードからのパケット到達率の最大化を意味する。

提案するパケット転送スケジューリングの概要について説明していく。提案手法では肯定応答(ACK)などを用いる自動再送要求を使用しない(できない)ことを前提とし、損失に対する対応として冗長転送を行う。タイムスロット割り当てを全ての

パケット到達率の積  $\prod_{k=1}^n M_k(x)$  の最大化をもとに、各パラメータから静的に決定していく。

### 3.1 静的スロット割り当て

提案手法における静的スロット割り当てについて説明する。先に述べたように無線干渉を考慮して同一方向への同時送信は3ノード以上離れている場合のみ行う。この条件下で全パケット到達率が最大になるような静的スロット割り当てを計算していく。3-5モデルの片側、3ノードの場合(図3)の静的スロット割り当ての例は以下図4のようになる。

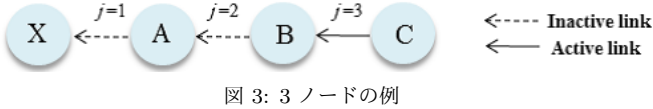


図 3: 3 ノードの例

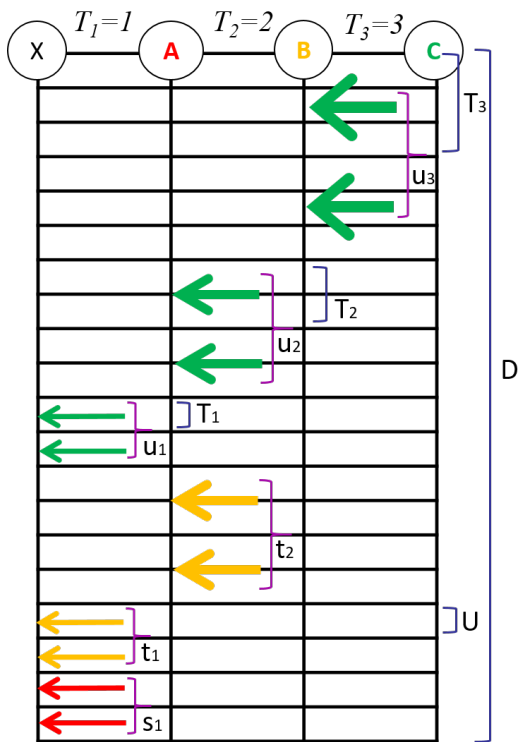


図 4: 3 ノードの場合の送信スロット例

これを定式化する。

- $(s_j)$ :  $s_j$  はリンク  $j$  上のパケット A の送信回数。
- $(t_1, t_2)$ :  $t_j$  はリンク  $j$  上のパケット B の送信回数。
- $(u_1, u_2, u_3)$ :

$u_j$  はリンク  $j$  上のパケット C の送信回数。

ここで各リンクにおける伝送速度の違いについて考える。リンク  $j$  における伝送速度を  $b_j$  とする。同方向の送信に利用する各リンク  $j$  の伝送速度  $b_j$  の最小公倍数  $B$  を用いて、パケットサイズ  $M$  から 1 スロット時間  $U$  (1 単位時間) を決定する。  $U$  が決定したことにより 1 サイクルのスロット数  $T$  が 1 サイクル時間  $D$  を用いて決定する。

$$U = \frac{M}{B} \quad (1)$$

$$T = \frac{D}{U} \quad (2)$$

また、各リンクで 1 パケットの送信に必要なスロット数  $T_j$  は以下のようになる。

$$T_j = \frac{B}{b_j} \quad (3)$$

これによってスロット数に関する以下の条件式が導かれる。

- 条件:  $T_1 s_1 + T_1 t_1 + T_2 t_2 + T_1 u_1 + T_2 u_2 + T_3 u_3 = T$ ,  
 $s_1, t_1, u_1 \in \{1, 2, \dots, T - (2T_1 + 2T_2 + T_3)\}$ ,  
 $t_2, u_2 \in \{1, 2, \dots, T - (3T_1 + T_2 + T_3)\}$ ,  
 $u_3 \in \{1, 2, \dots, T - (3T_1 + 2T_2)\}$ .

以上の条件から各ノードのパケット到達率は  $M_1, M_2, M_3$  となる。各リンクの損失率リンク 1, 2, 3 が  $q_1, q_2, q_3$  ( $0 < q_j \leq 1$ ) に対応しているとする。

$$M_3(u_1, u_2, u_3) = (1 - q_1^{u_1})(1 - q_2^{u_2})(1 - q_3^{u_3}) \quad (4)$$

$$M_2(t_1, t_2) = (1 - q_1^{t_1})(1 - q_2^{t_2}) \quad (5)$$

$$M_1(s_1) = 1 - q_1^{s_1} \quad (6)$$

全ノードからのパケット到達率の最大化問題は  $x = (s_1, t_1, t_2, u_1, u_2, u_3)$  と設定すると以下のようになる。

$$\prod_{k=1}^3 M_k(x) \quad (7)$$

$$T_1 s_1 + T_1 t_1 + T_2 t_2 + T_1 u_1 + T_2 u_2 + T_3 u_3 = T$$

$$s_1, t_1, u_1 \in \{1, 2, \dots, T - (2T_1 + 2T_2 + T_3)\}$$

$$t_2, u_2 \in \{1, 2, \dots, T - (3T_1 + T_2 + T_3)\}$$

$$u_3 \in \{1, 2, \dots, T - (3T_1 + 2T_2)\}$$

また以下の式によって導出することができる実数解を得るためにラグランジュ未定乗数法を用いる。

$$u_1 = t_1 = s_1 = -\frac{\log(1 - \frac{\alpha \log q_1}{T_1})}{\log q_1} \quad (8)$$

$$u_2 = t_2 = -\frac{\log(1 - \frac{\alpha \log q_2}{T_2})}{\log q_2} \quad (9)$$

$$u_3 = -\frac{\log(1 - \frac{\alpha \log q_3}{T_3})}{\log q_3} \quad (10)$$

$$T = 3T_1 u_1 + 2T_2 u_2 + T_3 u_3 \quad (11)$$

(8) - (11) 式によって  $\alpha$  を決定することができる。

(8) - (11) 式によって求められた  $\alpha$  を (8) - (10) 式の実数解を求めることができ (7) 式を最大化できる。しかしこれでは静的スロット割り当てには使用できないため、最終的な整数解を見つけるために、上記の実数解の近くの整数値をチェックする。

その中で (7) 式が最大化される整数解を使用する.

3-5 モデルでのもう一方, 5 ノードの場合についても説明する. 3 ノードを超えると干渉回避条件をクリアした同時送信が可能になる. 図 5 に 5 ノードの場合のスロット割り当て例を示す.

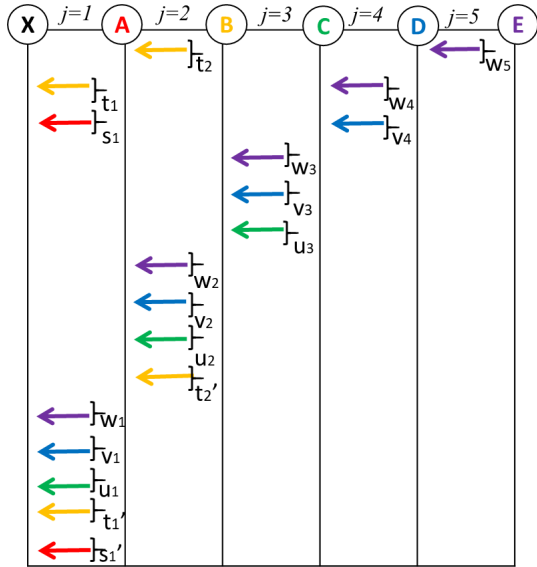


図 5: 5 ノードの場合の送信スロット例

3 ノードの時と同様に全パケット到達率を最大化していく. 最大化の式と条件は以下ようになる.

$$\prod_{k=1}^5 M_k = (1 - q_1^{s_1+s'_1})((1 - q_1^{t_1+t'_1})(1 - q_2^{t_2}) + (1 - q_1^{t'_1})(1 - q_2^{t'_2})(q_2^{t_2}))(1 - q_1^{u_1}) + (1 - q_2^{u_2})(1 - q_3^{u_3})(1 - q_1^{v_1})(1 - q_2^{v_2}) + (1 - q_3^{u_3})(1 - q_4^{u_4})(1 - q_1^{w_1})(1 - q_2^{w_2}) + (1 - q_3^{w_3})(1 - q_4^{w_4})(1 - q_5^{w_5}) \quad (12)$$

$$T_1 s'_1 + T_1 t'_1 + T_2 t'_2 + T_1 u_1 + T_2 u_2 + T_3 u_3 + T_1 v_1 + T_2 v_2 + T_3 v_3 + T_4 v_4 + T_1 w_1 + T_2 w_2 + T_3 w_3 + T_4 w_4 + T_5 w_5 = T \quad (13)$$

$$T_2 t_2 = T_5 w_5 \quad (14)$$

$$T_1 (s_1 + t_1) = T_4 (w_4 + v_4) \quad (15)$$

上記の最大化問題を解くことでスロット割り当てを得る.

### 3.2 転送パケット選択

今回の転送パケット選択は全パケット到達率を最大化するため, 保持しているすべてのパケットを均等回数送信するものとする. また送信は自身のパケットから始め, 自身に近いノードのパケットから順に行う.

## 4. 比較手法

### 4.1 従来手法

従来手法では各リンクの伝送速度は同一と仮定されている. 伝送速度が不均一なモデルにこのような手法を適用する場合, スケジューリングは最も遅いリンクに合わせて行われる必要がある. したがって従来手法におけるスケジューリングは, 同方向に送信するリンクの内最も遅いリンクの伝送速度を  $b_l$  とし, その方向に送信するリンクはすべて伝送速度  $b_l$  を持つものとする. この条件のもとで 3.1 で述べた手法に基づいてスロット割り当てを行う.

### 4.2 U-ACK

U-ACK(Unlimited-ACK) では, 自動再送要求に基づいたパケット転送を行う. まず事前に時間内に送信可能な回数のみを決めておく. この際どのリンクで何回転送が行われるかは不明のため, 最も遅いリンクでの転送を想定して最大送信回数を決める. モデル分離後, 各ゲートウェイに対して遠いノードから順番に自身の送るべきパケットを送信する. 保持しているパケットすべてに ACK が返されるまでは再送を繰り返し, ACK によって自身のパケットがすべて到達したことを知ると送信を終了する. また, 各ノードの送信回数の合計が設定した上限値に達した場合も送信を終了する.

## 5. シミュレーションによる評価

本研究で現実的な無線環境を模擬したシミュレーションを行うため, Space-Time Engineering(STE) が提供する Scenargie [3] というシミュレータを使用する. 前節で示した提案手法, 従来手法, U-ACK についてそれぞれシミュレーションを行い, その結果から手法の性能を評価していく.

### 5.1 シミュレーションの各種設定

直列センサネットワークにおけるノード数  $n$  を 8 とする. また, 1 サイクル時間  $D$  は, 従来手法の最短送信可能回数が 15 回であることから, その倍数 45 回 (冗長化 3 回分) と従来手法の 1 スロット時間を用いて  $D=0.0132$  に固定する. 各リンクのパラメータが異なる 2 つの Case を用いてシミュレーションを行う. Case1 はセンサ列の両端に損失率が高く高速なリンクが存在する場合, Case2 は左端にのみそのようなリンクが存在する場合となっている. 各リンクのパラメータを以下の表 1,2 に示す.

表 1: 各リンクの損失率

Case	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$	$q_8$	$q_9$
1	0.6	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.6
2	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2

表 2: 各リンクの伝送速度

Case	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$	$q_8$	$q_9$
1	16.2	3.5	6.3	3.5	3.5	6.3	3.5	3.5	16.2
2	16.2	6.3	3.5	3.5	3.5	6.3	3.5	3.5	6.3

この時の各ノードからのパケット到達率, 1 サイクルに全パケットが GW に届いた確率を求める.

また, Scenargie の詳細設定は以下のように行う.

- 各ノードは 802.11g の規格を使用する
- 各ノードの送信電力は 20[dbm] に設定する.
- 各ノード受信電力は-100[dbm] に設定する.
- 提案手法, 従来手法では ACK による自動再送要求及びキャリアセンスは行わず, ブロードキャストで送信する
- 伝送速度は変調方式によって変動させる.
- パラメータは Scenargie を用いて以下の方法で決定する
  - 2つのノード A, B 間で CBR アプリケーションでのパケット送信を 1000 回行う
  - 損失率:送信された 1000 回のパケット受信失敗率
  - 伝送速度:アプリケーションレベルでの遅延時間の平均以上の条件で Scenargie による実測を行い, 実際にリンクに設定した損失率と変調方式に対応する干渉がない場合のパラメータを表 3 に示す.

表 3: 各リンクのと距離の対応

損失率	0.1	0.2	0.6
変調方式	BPSK0.5	QPSK0.5	64QAM0.75
ノード間距離 [m]	937	769.04	373.96
伝送速度 [Mbps]	3.5	6.3	16.2

## 5.2 シミュレーション方法

干渉の影響でパケット伝送の遅延が発生し, それによって実効伝送速度が変わる. 提案手法ではその速度に合わせた最適なスケジュールを求めたいが, 実効伝送速度を事前に予測するのは困難である. よって, まず無干渉時の伝送速度の 66% の値を用いて導出したスケジュールに従ってシミュレーションを行い, それによって得られた各リンクの実効伝送速度及び損失率の実測値を用いて再スケジュールリングを行う.

従来手法でも同様に, 1 回目の実行による損失率を用いて再スケジュールリングを行う.

## 5.3 シミュレーション結果

3. 及び 4. で述べた手法によってスケジュールを求め, スケジュールに沿ったシミュレーションを行う. さらに提案手法, 従来手法では実測値によって再スケジュールリングを行いそのスケジュールに沿ったシミュレーションを最終的な結果とする.

実際にシミュレーションを行った結果について見ていく. まず, 図 6, 7 に Case1, Case2 それぞれの全パケット到達率を示す.

まず Case1(両端に損失率が高く伝送速度が速いリンクが存在する場合)について考える. この model では全手法で 4-4model の到達率が高いことがわかる. よって 4-4model について比較すると提案手法の到達率が最も高く手法の有効性が見て取れる. 従来手法に比べ 20% 以上到達率が向上しており, 伝送速度の考慮が重要であると言える.

次に Case2(左端のみに損失率が高く伝送速度が速いリンク

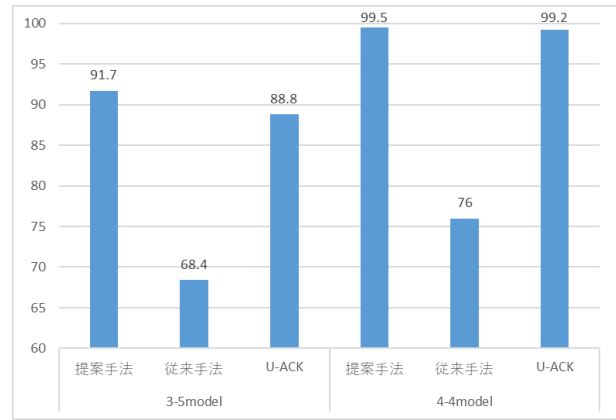


図 6: Case1 の全パケット到達率

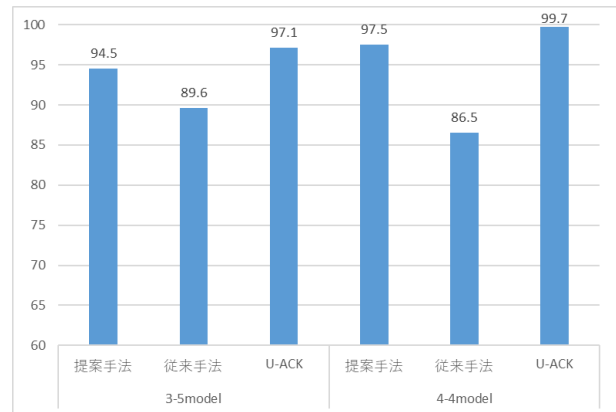


図 7: Case2 の全パケット到達率

が存在する場合)について見ていく. この Case では従来手法では 3-5model のほうが到達率が高いが, 提案手法および U-ACK では 4-4model のほうが到達率が高くなっている. 提案手法では損失率だけでなく伝送速度も考慮してスケジューリングを組んでいるため, スロットをより柔軟に割り当てることができ全体の送信回数を増やすことができる. したがって伝送速度が速いリンクでは低い損失率を補うことができる.

Case ごとと比較すると Case1 では提案手法が U-ACK よりも高い到達率を達成しており, Case2 では逆の結果となっている. しかし到達率はともに 97% を超えておりほぼ同等の効果が得られていると考えられる. ACK を用いる手法に比べて提案手法では, 各ノードはスケジュールに合わせて送信するのみでよく, 負荷が少ないといえる. 低負荷で ACK と同等の効果が得られていることから本手法は有効である. また, 損失率が高く伝送速度が速いリンクが多く存在する環境では伝送速度考慮の効果が大きく, 提案手法の有効性が強いといえる.

各 Case とも干渉による遅延時間の増加がみられる. 例として Case1 3-5model の各リンクの損失率を以下の図 8 に示す.

図 8 に示す設定値は初回のスケジューリングにおける設定値(無干渉時の実測値)である. 干渉発生の影響は同方向及び逆方向の同時送信による影響を受けやすい 3-5model でより大きくなる. 特に逆方向については干渉を考慮できていないため,  $N_2-N_3$  間 ( $q_3$ ) 及び  $N_4-N_5$  間 ( $q_5$ ) で大きな遅延が発生している. また同時送信を行い, スケジューリングによっては逆方向



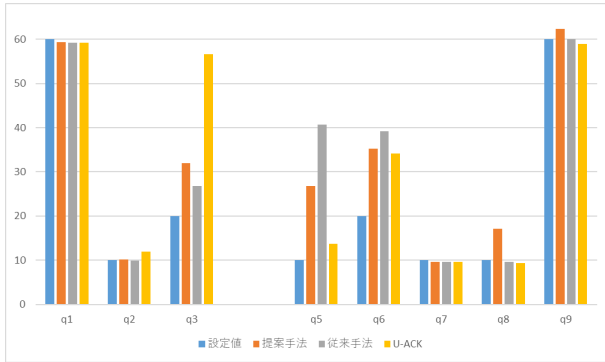


図 8: Case1 3-5model の各リンクの損失率

からも干渉を受ける  $N_5-N_3$  間 ( $q_6$ ) でも遅延時間は増加する。これら为了避免するためには、逆方向送信での干渉の考慮や、距離による干渉回避条件などを精査しなければならない。

提案手法および U-ACK で最も高い到達率を示した Case2 4-4model の各ノードからのパケット到達率を以下の図 9 に示す。

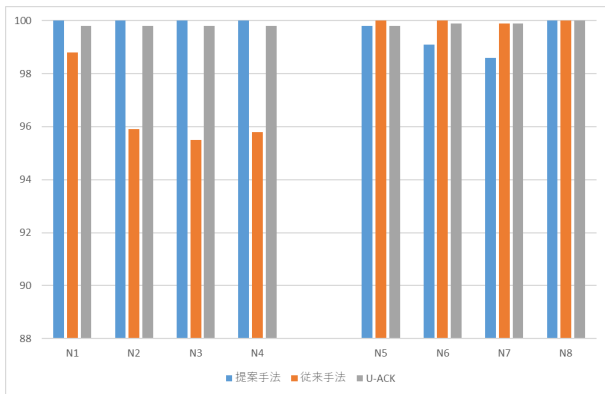


図 9: Case2 4-4model の各ノードからのパケット到達率

図 9 の左方向への送信を見ると  $N_6, N_7$  からのパケットの到達率が低いことがわかる。これらのノードからのパケットはその下位リンクも通るが、 $N_8$  のパケットが 100% 到達している。このことから  $N_6, N_7$  は自身のノードからのパケット送信時に損失している場合が多いと考えられる。 $N_6, N_7$  のパケットはいずれも自身のノードから隣接ノードへ損失率が低く低速のリンクを通過して送信され、この場合割り当てられる送信回数は少ない。また各ノードは自身のパケットから送信し始めるため、自身のパケットが最も上位のノードから遅延して送られてきたパケットの影響を受けやすい。したがって同一ノードから送信されるパケットの中では最も損失する可能性が高くなる。この問題を避けるには転送パケットの選択手法を考える必要がある。現在はスケジュールから遅れてくる上位のパケットを考慮し、自身のパケットから始め、自身に近いノードのパケットから順に送信を行っている。しかしより均等に送信を行うためには保持しているパケットを 1 回ずつ送信するサイクルを繰り返して複数回送信の方が良いと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では信頼性の低い無線リンク有する直列センサネットワークにおけるパケット転送スケジュールの最適化について議論した。ノードの位置とリンクの損失率に加えリンクの伝送速度も考慮した数学的最適化に基づいたスケジューリングを行っている。また実際にスケジューリングに沿ったシミュレーションも行っている。これにより AKC を用いる自動再送要求と同等の全パケット到達率を達成し手法の有効性を示した。

本研究では同方向に送信するノード同士の干渉回避しか行っておらず、またその条件も十分とは言えない。全体の干渉回避条件を精査することでさらにスケジューリングの精度を向上させることができるだろう。また、今回使用した全パケット到達率も有用な指標の 1 つではあるが、資源の有効活用という面ではスループットという指標も重要である。このことも考慮したスケジューリングの考案も今後の課題である。

なお、本研究は JSPS 科研費 16K00130 の助成を受けたものである。

## 文 献

- [1] 松原尚平, 鶴 正人, “数珠繋ぎセンサーネットワークのためのメッセージ転送スケジュールと前方消失訂正,” 信学技報 NS2016-141, pp.1-6, 2017 年 1 月.
- [2] Agussalim, Masato Tsuru, “Message Transmission Scheduling on Tandem Multi-hop Lossy Wireless Links,” Proc. IFIP WWIC2016 (LNCS9674), pp.28-39, April 2016.
- [3] Space-Time Engineering, “Space-Time Engineering”, (<https://www.spacetime-eng.com/jp/>), 2018 年 6 月 13 日現在