

無線センサーネットワークにおける端末の送信タイミング自律的決定方式の検討

増田聖乃[†] アサノデービッド^{††} 不破泰^{†††}

[†] 信州大学大学院総合理工学研究科 〒380-8553 長野市若里 4-17-1

^{††} 信州大学電子情報システム工学科 〒380-8553 長野市若里 4-17-1

^{†††} 信州大学総合情報センター 〒390-8621 松本市旭 3-1-1

E-mail: †{17w2084f,david,fuwa}@shinshu-u.ac.jp

あらまし 長野県塩尻市に ICT を活用して安全・安心な地域を構築する事を目的とした無線センサーネットワークが運用されている。小学生が持つ子機や、山中に埋まっているセンサーなどの端末を開発し、600 台中継機によって中継網が構築されている。これらは小学生の位置情報や山中の土中水分量を取得するために使用されている。このようなシステムを登山者を守るシステムに応用していきたい。山には、多くの中継機を設置できないので少ない中継機でたくさんの端末のパケットを中継しなければならない。しかし、端末増加にともない、端末パケットの衝突が増加し、パケット損失率が増加してしまう。また、衝突が起これば端末が再送をし、余計に多くのパケットが生成されてしまう。この衝突を減らすために、各端末は、無秩序にパケットを送信するのではなく、互いに衝突しないような送信タイミングを確立するようなプロトコルが必要である。このプロトコルを使用し、登山者を守るシステムのトポロジーでのパケット損失率がどのように変わったのか報告する。

キーワード センサーネットワーク、プロトコル、地域見守り

Evaluation of an Autonomous Transmission Timing Decision Scheme for Wireless Sensor Networks

Satono MASUDA[†], David ASANO^{††}, and Yasushi FUWA^{†††}

[†] Graduate School of Science and Technology, Shinshu University 4-17-1, Wakasato, Nagano, 380-8553 Japan

^{††} Dept. of Electrical and Computer Engineering, Shinshu University 4-17-1, Wakasato, Nagano, 380-8553 Japan

^{†††} Integrated Information center, Shinshu University 3-1-1 Asahi, Matumoto, 390-8621 Japan

E-mail: †{17w2084f,david,fuwa}@shinshu-u.ac.jp

Abstract At present, a wireless sensor network utilizing ICT is being operated in Shiojiri City, Nagano Prefecture with the aim of realizing a safe and secure community. For this network, terminals for elementary school students and sensors buried in the mountains were developed and a relay network of 600 transponders was constructed. Using this network, the location of elementary school students and moisture content of the soil in the mountains is being collected. We would like to apply this system to protect mountain climbers. Many transponders cannot be installed in the mountains, so a few transponders must relay packets from many terminals. However, as the number of terminals increases, packet collisions increase, which in turn causes an increase in packet loss rate. Also, when a packet collision occurs, terminals transmit again, so extra packets are generated. In order to reduce collisions, each terminal should not send packets randomly, but should establish a transmission timing that does not conflict with other terminals. We report how the packet loss rate using the topology of a system to protect climbers changes with this type of protocol.

Key words wireless sensor network, protocol, regional protection

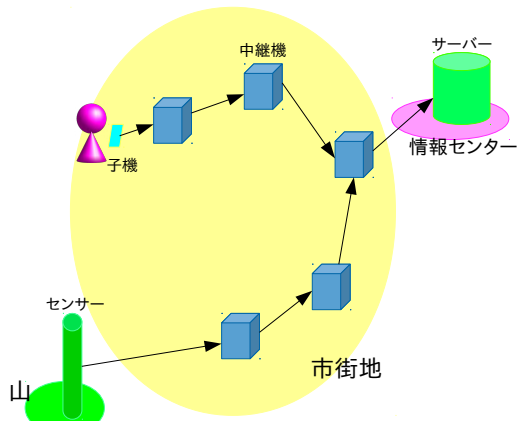


図1 地域見守りシステム構成
Fig.1 Configuration of regional protection system

1. 背景

現在、安全で安心な地域作りを ICT を用いて、多くの自治体で行っている。人や山にセンサーを取り付け、このセンサーからの情報を定期的を取得し、状況を判断するセンサーネットワークを構築し、収集した情報から地域住民向けにサービスを提供している。センサーネットワークは、センサーを有する端末と、データをサーバーまで中継する中継機で構成されている。

長野県塩尻市では、図1のような地域見守りシステムがあり、小学生が持つ子機や、山中にある土中水分量を測るセンサー、または、登山者が持つ子機など様々な端末を開発し、また、600台以上の中継機からなるセンサーネットワークのための中継網を構築を行い、安心安全の地域づくりのためのアプリケーション [1] を運用してきた。

小学生の子機では、保護者はリアルタイムで子供の位置が分かり、安全に登下校しているか自宅にいても確認ができる。山中にあるセンサーでは、大雨の中山に行かなくても、センサーから送られてきた土中水分量から土砂崩れが起きそうかなど素早く察知し、情報を地域住民に伝達することができる。

また、このようなシステムを山で登山者を遭難から守るシステムにも応用していきたいと考えている。山では、あまり多くの中継機を設置することは難しいため、少ない中継機で多くの端末の packets を処理しなければならない。1つの中継機に対して、端末が増加すると、端末間で中継機に送信する packets の衝突が増加し、その結果損失率も増加する。packet 損失が増加した場合、欲しい情報が取得できなくなり、安心安全な地域づくりとはほど遠くなってしまいます。そのため、packet の混雑を減らし、効率よく送信を行いたいと考えている。

よって、端末同士の packet が互いに衝突しないような送信タイミングを決定するプロトコルの開発が求められている。このようなプロトコルと従来のプロトコルでの packet 損失率を比較し、評価を行った。

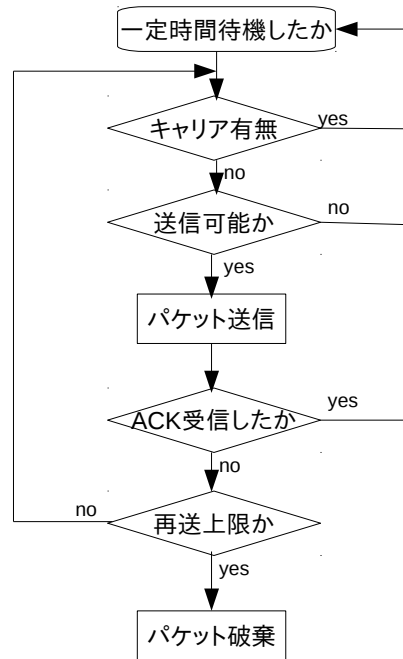


図2 従来プロトコル
Fig.2 Conventional protocol

2. 従来プロトコル

端末は、独自のタイマーを持っており、一定間隔で送信を行う。この一定間隔の時間を端末独自のタイマーで管理しており、このタイマーがタイムアウトしたら、キャリアセンスを行い packet を送信する。端末独自のタイマーを使用しているため、送信タイミングは、端末ごと独立である。また、中継機は、端末からの packet 受信後、その端末に対して ACK を送信し、中継機 packet を他の中継機へ送信を行う。

図2は、地域見守りシステムでの端末の packet 送信プロトコルのフローチャートである。端末は、一つ前の packet 送信時から一定の送信間隔分待機した時にキャリアセンスを行う。キャリアがあったときは、packet を送信することせず、キャリアがなくなるまで待機する。キャリアがないことを確認できたなら、ランダム時間が生成される。そして、その端末が ACK 受信待機状態ではないのか、一つ前の packet を送信したときから端末の定期送信間隔分待機したか、また、先ほど生成されたランダム時間が終了しているのかを確認し、送信可能状態であるとき、端末の packet を送信する。packet 送信終了したら、その端末は、ACK 受信待機状態になる。ACK を受信したならば、再度定期送信間隔分待機するようになる。しかし、ACK を一定時間内に受信できなかった場合、再送を行う。ACK を受信するまで行うが、ACK を受信するまでに再送上限回数に達した場合、その packet は破棄される。

上記のようなプロトコルだと、登山者のようなたくさんの端末を使用するような環境のとき、送信タイミングが同じ端末が増え、packet の衝突が起り、packet の再送が続き、たく

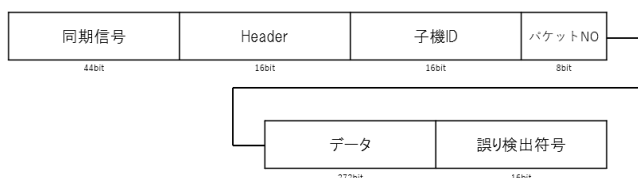


図 3 端末の送信パケット構成

Fig. 3 Packet configuration of terminal

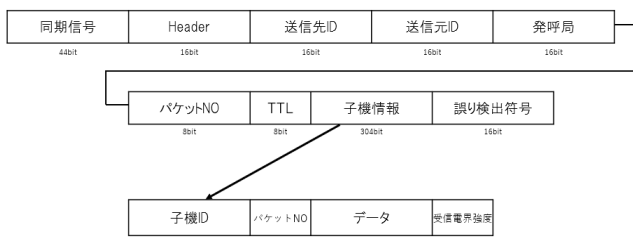


図 4 中継機の送信パケット構成

Fig. 4 Packet configuration of transponder

さんのパケットが生成され、ネットワークが混み、より一層衝突が起りやすくなる。それによって、パケット損失率が多くなってしまふ。

2.1 パケット構成

見守りシステムで使用されている端末と中継機が送信するパケットの構成について説明する。図 3 は、端末の送信パケットである。同期信号と誤り検出符号を除く 39Byte で構成される。Header の中には電文種別とデータ長が入る。子機 ID には端末自身の ID を入れ、パケット NO には、このパケットはこの端末の何個目のパケットかの数値を入れる。最後に山にあるセンサーで取得した土中水分量などを挿入するためのデータ部を確保した。

また、中継機の送信パケットを図 4 に示す。中継機は、同期信号と誤り検出符号を除く 48Byte で構成される。送信先 ID には、予めルーティングテーブルによって決められた中継先の中継機の ID が入る。送信元 ID には、中継機自身の ID が入る。発呼局 ID には、最初に端末からパケットを受信した中継機の ID が入る。TTL は、発呼元の中継機で 0AH に設定され、中継されるごとに 1 減らし、0 になったらパケットを消失される。端末情報の中には、発呼局で受け取った端末パケットの ID とパケット NO、データが入っており、この端末からのデータを受信した中継機の受信電界強度が最後に格納されている。

3. 改良プロトコル

前節で説明したように、端末が増えることによって、端末同士の送信タイミングが被ってしまい、パケット衝突が起りやすくなり、パケット損失率が増加してしまう。

このパケット損失率を抑えるために、[2] にて各端末の送信タイミングを決定し、決定したあとは、その送信タイミングで送信を行うことを提案している。[2] では、損失率を減らすことに成功している。このプロトコルを今回の登山者のトポロジーで使用する。

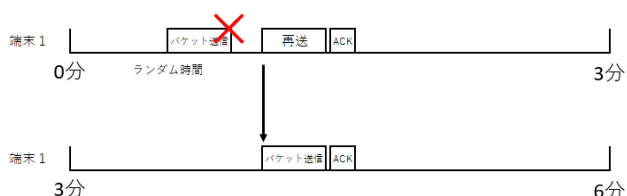


図 5 タイミング決定

Fig. 5 Timing determination

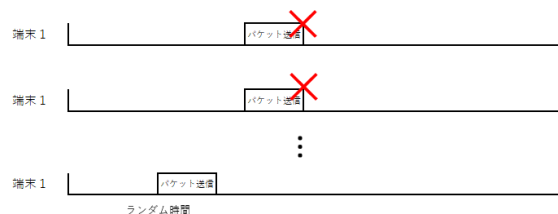


図 6 失敗した場合

Fig. 6 In case of failure

まず、端末は従来通りランダムな時間でパケット送信を行う。このとき、端末は、中継機からの ACK で正しく送信できたかを判別している。この中継機からの ACK を受信したならば、このタイミングでは、他の端末と送信のタイミングが被っておらず、衝突が起きないということである。そのため、このタイミングを維持し送信を行えば衝突でパケットの損失はおきないということである。この ACK を受信した端末は、このタイミングを維持し、ACK を受信できなかった端末は、次送信可能なタイミングを模索する。このように送信タイミングを決定した端末を増やしていく。

例えば、図 5 のように端末 1 が従来プロトコル通りランダム時間後送信を行った。端末 1 は、1 回目の送信では、ACK が返ってこず、再送をした。再送を行ったら、ACK を受信できたので、次のタイミングではそのタイミングで送信をしている。端末 1 は、このタイミングを維持していく。同じ手順で各端末が送信タイミングを決定する。

タイミングが決定している端末と決定していない端末が衝突を起こしてしまう可能性があるがタイミングが決定している端末は、再送をせずこのパケットは諦め、次も同じタイミングで送信を行う。このとき、タイミングが決定していない端末は、再送を行い、送信が完璧に行われた場合、そのタイミングで次回から送信することになるため、タイミングが決定している端末とはタイミングが重なることはない。しかし、タイミングを決定している端末が何回も失敗してしまえば、損失率増加に繋がってしまうので失敗可能な上限回数を決め、上限を超えてしまった場合、そのタイミングを破棄し、再度衝突が起きないタイミングを探すようになる。

図 6 は、先ほどの図 5 の端末 1 がタイミング決定後、パケット送信を失敗した図である。一回失敗した場合、そのあともタイミングを維持し、送信を行うが、そのあとも失敗してしまい、失敗上限回数に到達した時、そのタイミングを捨て、新たにラ

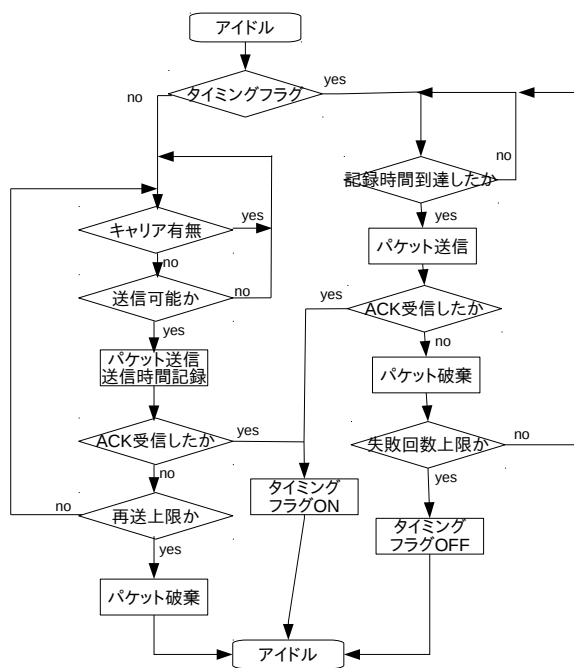


図 7 改良プロトコル
Fig. 7 Improved protocol

ンダム時間後送信を行っていく。

これを各端末が行い、各々タイミングを決定したならば、そのタイミングを維持しながら送信を行うため、パケットの損失を減らすことができると考えた。

改良プロトコルのフローチャートを図 7 に示す。改良前との違いは、端末のパケットを送信するタイミングを記録し、次のパケット送信するときには、その記録したタイミングで送信を行うことである。そこで、タイミング決定フラグを追加し、タイミングフラグが立っているかどうかでこの端末は、タイミングが決定しているかを区別している。

タイミングフラグが立っていない時のフローチャートは、従来とはあまり変わらず、送信時に送信時間の記録を行い、ACK 受信した際には、タイミング決定フラグを立てるということを追加している。主に追加したことは、図 7 の右側の部分である。タイミングフラグが立っているときは、キャリアセンスを行わず、先ほど決定したタイミングが来たら、キャリアの有無に関わらずパケットの送信を行う。ACK が受信されたら、次のタイミングが来るまで待機する。しかし、ACK が受信されなかったら、再送を行わずパケットを破棄する。このパケット送信は、失敗とし、失敗回数をカウントする。この失敗の上限を決め、上限に達していなければ、再度同じタイミングで送信を行う。失敗回数上限に達してしまったら、このタイミングではパケット送信しても失敗すると認識し、このタイミングを破棄し、タイミング決定フラグを下ろす。再度、新しくタイミングを模索する。

4. 理想的な通信

改良プロトコルでは、効率的に送信を行いたいため、送信タ

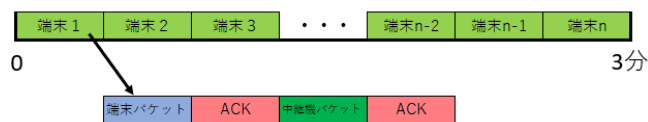


図 8 理想的な通信
Fig. 8 Ideal communication

イミングの決定を行っている。また、パケットを正確に送信したいと思い、提案に至った。

このようなプロトコルの理想の通信を図 8 に示す。これは、端末からサーバーまで 2 ホップで到達する場合である。

中継機 1 台と端末 1 台について、パケットを送信したい場合、自分自身の端末パケットの送信、それに対する ACK、その端末情報が格納された中継機パケットの送信、それに対する ACK がひとつのまとまりとなる。

そのため、1 台の端末が中継機に対して送信中だった場合、他の端末は、このまとまり中に送信を行うと送信失敗となってしまいます。このまとまり完了後、他の端末は送信を行う。

よって、図 8 のように 1 台の端末の送信まとまりが終わり次第、他の端末 1 台が送信を行えば、効率的に送信ができると考えた。

また、端末からサーバーまで 3 ホップの場合、上記のまとまりに、もう 1 台分の中継機パケット送信、それに対する ACK を付加する。この場合には、端末は、合計 6 パケット分の時間を待つ必要がある。

しかし、他の端末の送信に対して、邪魔をせず送信を行うので最も効率的と言えると考えた。

5. 結 果

従来プロトコルと改良プロトコルでのシミュレーション結果を示す。従来プロトコルと改良プロトコルについて、中継機 4 台のときと中継機 3 台のときのルーチングでのパケット損失率を求めた。端末台数を 10 台から 100 台または 110 台まで変更し、パケット損失率の変化をみる。

各パラメータ設定は表 1 とのように設定した。パケット生成間隔は、上記で記述した定期送信送信間隔であり、3 分と設定した。シミュレーション上時間は、3000 分とし、1 つの端末から 1000 個のパケットが生成するようにした。3000 分を 1 回とし、各端末台数で 10 回ずつ行い、10 回のパケット損失率の平均を出した。端末がパケットを送信し ACK を受信できなかったときの再送回数の上限は、7 回とし、送信タイミングを決定したあと、そのタイミングで送信を行っていくが、送信失敗し、そのタイミングを消去する送信失敗回数の上限は、3 回とした。

表 1 シミュレーションで使ったパラメータ
Table 1 Parameters used in simulation

パケット生成間隔	3 分
シミュレーション上時間	3000 分
再送上限回数	7 回
失敗上限回数	3 回

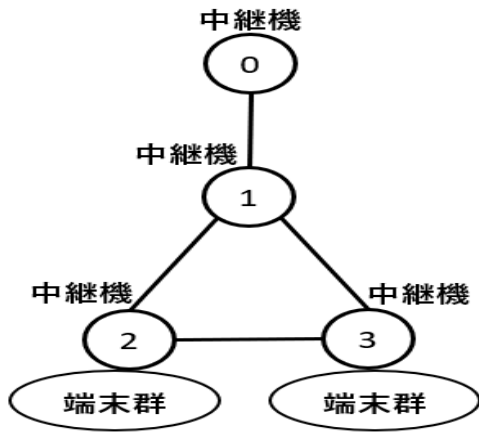


図 9 中継機 4 台の構成

Fig. 9 Four transponder topology

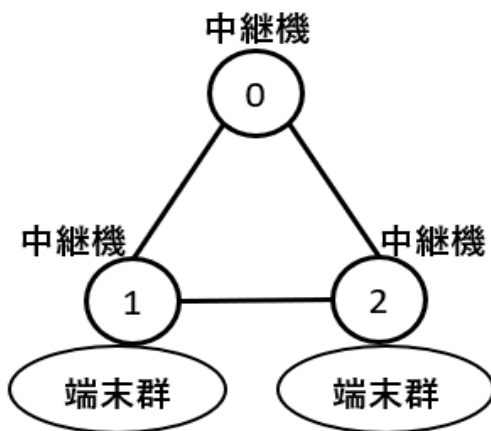


図 10 中継機 3 台の構成

Fig. 10 Three transponder topology

また、中継機と端末の構成を示す。図 9 は、中継機 4 台、図 10 は、中継機 3 台である。線で繋がっているところは、さらし状態である。また、端末群は半分ずつにグループ分けし、近くの中継機は、さらし状態だが、遠くの中継機は、隠れ状態である。各端末同士は、隠れ状態である。中継機 0 は、有線でサーバーと繋がっていると考えている。

図 11 は、中継機 4 台のときの端末パケット損失率、図 12 は、中継機 3 台のときの端末パケット損失率の結果である。青色のグラフが従来プロトコル、オレンジ色のグラフが改良プロトコルである。また、縦軸がパケット損失率、横軸が端末台数である。

全体的に大幅に損失率を減らすことができた。中継機 3 台のとき、端末台数が 30 台までならほぼ 0% だった。少ない端末台数のときは、パケット損失率を大幅に下げることができるが、端末台数を増加するにつれ、従来プロトコルと提案プロトコルの損失率の差は狭まってしまう。

また、3 分という時間で最大何台の端末が収容できるか計算を行った。図 3 のように端末パケットは 47byte、この端末パケットに対して中継機からの ACK は 13byte、図 4 のように

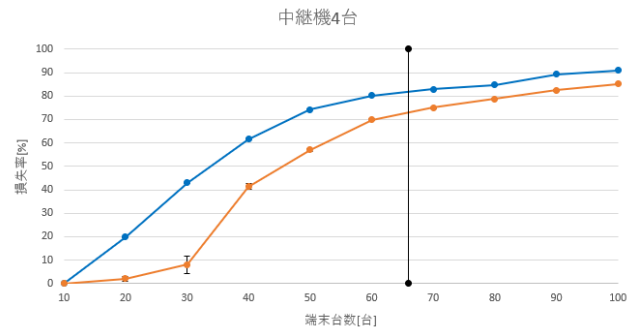


図 11 中継機 4 台での損失率

Fig. 11 Packet loss rate of the four transponder topology

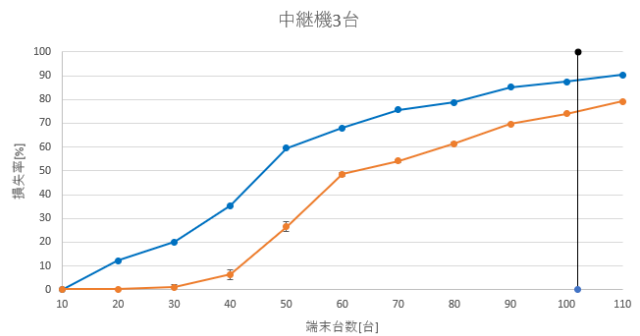


図 12 中継機 3 台での損失率

Fig. 12 Packet loss rate of the three transponder topology



図 13 改良プロトコルでの端末送信タイミング

Fig. 13 Terminal transmission timing with improved protocols

中継機パケットは 56byte、この中継機パケットに対して中継機からの ACK は、16byte である。また、1byte 送信するのに 8/600 秒かかる。図 8 のように 2 ホップの場合、1 つの端末の合計 byte 数は、132byte である。132byte 送信するのに 1.76 秒かかる。そして、3 分をこの数字で割ると 102 となり、2 ホップの場合、102 台格納できることになる。また、3 ホップの場合、1 つの端末の合計 byte 数は、204byte となり、送信するのに 2.72 秒かかる。そして、3 分をこの数字で割ると 66 となり、66 台格納できることになる。これらの数値は、図 8 のように 3 分で時間の無駄なく端末がパケット送信した場合である。

図 11 と図 12 の黒い線が理想台数のところである。現在の改良プロトコルでは、端末を上記のような理想台数にすると 70% 以上のパケット損失が起こってしまっている。改良プロトコルでは、どのようなタイミングで送信されているかを図 13 に示す。図 13 は、図 10 のトポロジーのとき、改良プロトコルでの端末の送信タイミングが決定しているときの図である。

図 8 のような理想的な通信とはほど遠く、端末 1 タイミングと端末 2 タイミングの隙間があるが、1 パケット分もなく、この隙間が時間の無駄となる。確かにパケット損失率は減らすことができたがこの差を埋めなければ、理想的な通信とは言えな

いと考えた。

6. ま と め

登山者を守るシステムとして、少ない中継機でたくさんの端末パケットを中継しなければならない環境でのパケット損失率を調べた。端末増加に伴い、端末パケットの衝突が増加し、パケット損失率が増加してしまうので、端末の送信タイミングを決定し、決定したあとは、そのタイミングを維持するプロトコルを使用した。この提案プロトコルと従来プロトコルでのパケット損失率を比較した。提案プロトコルでは、従来プロトコルよりも2つのトポロジーでパケット損失率を減らすことができた。送信タイミングを決定することは、パケット損失率を減少させることに繋がった。しかし、理想的な通信とはほど遠く、無駄な時間ができてしまうことが確認された。

7. 今後の課題

前節で説明した通り、改良プロトコルでは、時間の無駄が多くなり、端末台数を増やすと衝突が起り、パケット損失率も増加してしまう。各端末は、端末ごとのタイマーを持っており、それらは全て独立である。そのため、各端末のタイマーを全て共通にし、その一つのタイマーでタイミングを決定していけることができるならば、理想的な通信に近づけると考えた。

また、端末同士の不公平さにも着目する。ある端末は、損失率0%でも、ある端末は、損失率100%に近いという状況があった。ある端末のデータ取得はできるが、ある端末のデータは全く取得ができなくなってしまう。この全体の損失率が減らすことができても、特定の端末だけデータ取得ができないという状況になってしまっは意味がないため、この端末同士の不公平さも今後の課題とする。

文 献

- [1] 野瀬裕昭, 不破泰, 新村正明, 國宗永佳, 本山栄樹, 金子春雄, 無線 Ad-Hoc ネットワークによる地域見守りシステムの開発, 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J95-B pp.30-47
- [2] David ASANO, Daichi KUROYANAGI, Hikofumi SUZUKI, Eiki MOTOYAMA, Yasushi FUWA, A Pseudo-TDMA MAC Protocol Using Randomly Determined Transmission Times for Landslide Prediction Wireless Sensor Networks, IEICE TRANSACTIONS on Communications Vol.E97-B No.7 pp.1449-1456