

2 ホップからなる IEEE 802.15.6 無線ボディアエリアネットワークにおける ポーリングプロトコルの性能評価

鈴木 隆 宏

日本福祉大学 健康科学部

Performance evaluation of a polling protocol in a two-hop IEEE 802.15.6 wireless body area network

Takahiro Suzuki

Faculty of Health Sciences, Nihon Fukushi University

Abstract: This paper assesses application-level QoS (Quality of Service) in the case where emergency, medical, and background data are transferred with a polling MAC (Media Access Control) protocol in an IEEE 802.15.6 two-hop wireless BAN (Body Area Network). In the two-hop wireless BAN some of nodes transmit data MPDUs (Mac Protocol Data Units) to the hub directly and the others send data MPDUs to the hub via a relay node. By simulation, we compare the performance of a priority polling scheme and a non-priority polling scheme. Numerical results show that the priority polling scheme can improve average MU (Media Unit) delay for emergency and medical transmission. Furthermore, this paper proposes a dynamic channel allocation scheme and shows MU-delay-performance for two-hop nodes can be improved if surplus channel capacity for one-hop transmission allocates the relay node for two-hop transmission.

Keywords: IEEE 802.15.6, wireless body area network：無線ボディアエリアネットワーク, polling protocol：ポーリングプロトコル, performance evaluation：性能評価, two-hop communication：2 ホップ通信

1. はじめに

ヘルスケアやエンタテインメントなどの分野の通信アプリケーションの実現手段として、無線ボディアエリアネットワーク (BAN: Body Area Network) の必要性が高まり^{1)–3)}, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) の 802 標準化委員会は、2012 年に IEEE 802.15.6 標準無線 BAN 規格を発表している⁴⁾. この規格は、人に装着された機器や人の体内に埋め込まれた機器からの近距離・小電力通信をサポートすることを目的としている。さらに、複数の BAN の共存や、人を対象

とした HBAN (Human Body Area Networks) と車両を対象とした VBAN (Vehicle Body Area Networks) の相互接続を目的として、IEEE 802.15.6 の拡張規格である IEEE 802.15.6ma の検討も行われつつある⁵⁾. 本研究では、2012 年に策定された IEEE 802.15.6 標準の一つの無線 BAN を対象としている。一つの無線 BAN は、一つのハブと一つまたは複数のノードからなり、ハブとノードとの通信手段としては、1 ホップの直接通信と、中継ノードを介した 2 ホップ通信とが規定されている。本論文では、データを発生して通信を行う末端のノードを

中継ノードと区別するために端末ノードと呼ぶ。

IEEE 802.15.6 標準の範囲は、OSI (Open Systems Interconnection) 参照モデルの物理層およびデータリンク層の媒体アクセス制御 (MAC: Media Access Control) 副層である。ハブと端末ノードとのデータ通信には、共有無線回線 (以下、無線チャネルと記す) が用いられ、MAC プロトコルを用いたアクセス制御が行われる。IEEE 802.15.6 標準では、MAC プロトコルとして、ハブやノードが分散制御でデータ通信を行うランダムアクセス方式と、ハブが無線チャネルの集中制御を行う方式とがある⁴⁾。ランダムアクセス方式としては、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) あるいはスロット付きアロハが用いられる。集中制御方式としては、ハブが非予約で端末ノードにデータ送信の問い合わせを行うポーリング方式や、予め端末ノードがハブに送信チャネルの予約を行いハブにより割り当てられた期間でデータ通信を行うスケジューリング方式が定められている。

さらに、IEEE 802.15.6 標準 MAC では、エマージェンシーデータ、メディカルデータ、音声およびビデオデータを通常のデータより高い優先度で送信できるように、UP0 (User Priority 0) から UP7 までの 8 段階の優先度を規定している⁴⁾。UP7 は最も優先度が高くエマージェンシーデータやメディカルインプラントレポートの送信を対象としている。IEEE 802.15.6 標準においてエマージェンシーデータの具体的な内容が規定されているわけではないが、生体情報の異常値に対するアラートの送信などが考えられる⁶⁾。また、UP6 と UP5 はメディカルデータの送信を、UP4 と UP3 はそれぞれ音声とビデオの送信を対象としている。ベストエフォートデータには UP2 と UP1、バックグラウンドデータには UP0 が割り当てられている。

また、IEEE 802.15.6 標準 BAN のハブは、スーパーフレームありビーコンモード、スーパーフレームありノンビーコンモード、スーパーフレームなしノンビーコンモードの三つのアクセスモードのいずれかで動作する⁴⁾。これらのうち、スーパーフレームありビーコンモードでは、無線チャネルの時間軸は、スーパーフレーム単位に分割され、ハブは各スーパーフレームの開始時点で全ノードに時刻同期情報を含むビーコンを送信する。さらに、一つのスーパーフレームは、無線チャネルの使い方により EAP (Exclusive Access Phase)、RAP

(Random Access Phase)、MAP (Managed Access Phase) などの各期間に分割され、これらの期間の情報もビーコンに記される。スーパーフレーム内の EAP や RAP は、ランダムアクセス方式でデータを送信する期間であり、RAP ではすべての優先度のデータを、EAP では UP7 のデータのみを送信できる。一方、MAP は、ハブによる集中制御でチャネルが管理され、非予約のポーリング方式や、予約ベースのスケジューリング方式でデータ通信が行われる。

1 ホップ通信を想定した IEEE 802.15.6 標準 MAC プロトコルの性能解析については、すでに文献 7) - 11) で行われている。文献 7)、8) では、スケジューリング方式の無線 BAN を対象として理論解析を行い、文献 7) では MAC フレーム長とエネルギー効率との関係を、文献 8) では、エネルギー効率に加えて、MAC レベルのスループットやフレーム遅延について評価している。文献 9)、10) では、CSMA/CA 無線 BAN のマルコフ解析が行われており、文献 9) ではトラヒックの優先度を考慮した MAC レベルのスループットや遅延、文献 10) では、優先度に応じた新しいバックオフ時間の割り当て方式について検討している。さらに、文献 11) では、ノードが常にデータを持っているという前提で、CSMA/CA プロトコルとポーリングプロトコルを用いた場合の、MAC フレーム遅延や端末ライフタイムを理論解析およびシミュレーションにより評価している。さらに、文献 12) では、無線回線のパスロスのある場合とない場合について、ポーリングプロトコルとランダムアクセスプロトコルとの性能比較をシミュレーションにより行っている。

IEEE 802.15.6 標準 MAC を用いたエマージェンシーデータの性能評価については、文献 6)、13)、14) で行われている。これらの文献では、1 ホップの無線 BAN を対象として、エマージェンシートラヒックを考慮して、MAC レベルの性能をシミュレーションにより評価している。文献 6) では、UP7 エマージェンシーノードと UP6 メディカルノードを考慮して、CSMA/CA とポーリングを組み合わせた MAC プロトコルの遅延性能を評価している。文献 13) では、UP7 データを発生するノードとノーマルデータを発生するノードを考慮して、EAP 期間を動的に増減させる方式を提案している。文献 14) では、ノードが UP0 から UP6 のいずれかのデータを発生する期間と UP7 データを発生する期間とを繰

り返すという仮定のもとに、CSMA/CA プロトコルの性能を評価している。さらに、筆者は、文献 15) において、CSMA/CA プロトコルを用いた 1 ホップ通信を対象として、エマージェンシーデータ、メディカルデータ、バックグラウンドデータを考慮して、MU (Media Unit) スループット、平均 MU 遅延および MU 遅延の変動係数を評価尺度として、アプリケーションレベル QoS (Quality of Service) の評価を行っている。ここで、MU はアプリケーションレベルでの情報単位を意味し一つまたは複数の MPDU (Mac Protocol Data Unit) で送信される¹⁶⁾。

2 ホップを想定した IEEE 802.15.6 標準 BAN の検討は文献 17) - 20) で行われている。文献 17) では、2 ホップ無線 BAN を対象として、エラー訂正符号やそれを用いたエラー制御方式について検討している。また、文献 18), 19) では、2 ホップ無線 BAN における 1 ホップ通信から 2 ホップ通信への切り替え方式について検討している。さらに、文献 20) では、送信ノードから宛先ノードへの直接通信に失敗した時に中継ノードが再送を行う協調通信について検討している。これらの文献では、エネルギー効率や MAC レベルの遅延性能を評価しているが、複数種類のトラヒックを考慮していない。

本論文では、ハブ、中継ノードおよび端末ノードからなる一つの無線 BAN を対象とする。そして、端末ノードからハブに向けて、1 ホップまたは 2 ホップで、エマージェンシーデータ、メディカルデータおよびバックグラウンドデータが転送される状況を想定し、シミュレーションによりアプリケーションレベル QoS の評価を行う。アプリケーションレベル QoS の性能評価尺度としては、MU スループットおよび平均 MU 遅延を用いる。MAC プロトコルに関しては、エマージェンシーデータの 2 ホップ通信を考えた場合に、ランダムアクセス方式では衝突や隠れ端末の問題があり、予約方式では予約のオーバーヘッドが発生するため、本論文ではポーリングプロトコルを採用する。また、アクセスモードとしては、スーパーフレームありビーコンモードを採用しているが、ポーリング MAC プロトコルの性能評価が主な目的であるため、シミュレーションでは、スーパーフレームの全期間が MAP であるという仮定を置いている。さらに、2 ホップ通信用の中継ノードのチャンネル割り当て期間は、予め予約ベースのスケジューリング方式で決め

られていると仮定している。

本論文では、まず、1 ホップ通信と 2 ホップ通信のチャンネル容量比がアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響を検討するため、中継ノードのチャンネル割り当て期間と MU スループットおよび平均 MU 遅延との関係を調べる。次に、エマージェンシーデータおよびメディカルデータを発生するノードに対する優先制御や、エマージェンシーノードへの連続ポーリングの遅延改善効果を検討する。本論文のシミュレーションでは、エマージェンシーデータを UP7、メディカルデータを UP5、バックグラウンドデータを UPO としている。そして、2 ホップ通信を伴う無線 BAN において、エマージェンシーデータをできるだけ低遅延で通信できる方法について考察する。さらに、本論文では、1 ホップ通信用または 2 ホップ通信用のいずれかの無線チャンネル期間が余った場合に他の期間に割り当てる動的チャンネル割り当て方式を考察する。そして、1 ホップ用チャンネル期間が余っている状況での 2 ホップ通信の性能改善効果について検討する。

本論文は、IEEE 802.15.6 標準で規定されている 2 ホップ通信を用いた無線 BAN を対象として、ポーリングプロトコルを用いた場合の基本性能の改善効果について検討したものである。本論文は、具体的な 2 ホップ BAN の応用例を想定して性能を評価しているものではないが、2 ホップ BAN の応用例としては、病院等で近隣の二人のデータを一つの HUB で収集するシステムが考えられる。このようなデータ収集を二つの HUB で行うことも考えられるが、その場合には BAN 間の電波干渉対策が必要となる。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2 節では本論文のシミュレーションで対象とした無線 BAN のシステム構成と、ポーリングプロトコルを用いたデータ送信手順について説明する。そして、3 節ではシミュレーション条件について述べ、4 節ではシミュレーション結果を示す。さらに、5 節では、本研究で考案した動的チャンネル割り当て方式について説明し、その性能改善効果を考察する。最後に、6 節に本論文の結論と今後の課題を示す。

2. 2 ホップ通信を考慮したポーリングプロトコル

本節では、本論文のシミュレーションで対象とした無線 BAN のシステム構成と、本論文で考えたポーリング

プロトコルのデータ通信手順について説明する。IEEE 802.15.6 標準には、ポーリングプロトコルを用いた1ホップのフレーム送信手順については詳細に記載されているが、2ホップ通信に関しては、1ホップの場合と同様に通信するという記述しかないため、本論文では具体的な手順を考案してシミュレーションを行っている。本節では、OSIの用語であるMPDUを、IEEE標準の用語であるフレームと記す。

2.1 無線BANのシステム構成

本論文のシミュレーションでは、図1のような一つの無線BANを対象としている。一つの無線BANには、一つのハブ、ハブと直接通信を行えるノード群、中継ノードを介してハブと2ホップで通信を行えるノード群が含まれる。以下、本論文では、ハブと1ホップで通信を行えるノードを1ホップノード、中継ノードを介して2ホップで通信を行うノードを2ホップノードと呼ぶ。さらに、一つのノードは、エマージェンシーデータ、メディカルデータ、バックグラウンドデータのいずれかをハブに転送すると仮定し、発生データの種類によって、エマージェンシーノード、メディカルノード、データノードと呼ぶ。図1で、端末ノード1から3は1ホップノード、端末ノード4から6は2ホップノードである。また、端末ノード1および4はエマージェンシーノード、端末ノード2および5はメディカルノード、端末ノード3および6はデータノードである。なお、本論文のシミュレーションでは端末ノード数を変化させて性能評価を行っている。

一つのノードからハブへの通信を1ホップで行うか2ホップで行うか、および2ホップ通信においてどのノードを中継ノードとするかは、一般的にはハブとノードの距離や電波伝搬環境に依存し、ハブとノードとの接続設定の段階で決められるものである。しかし、本論文のシミュレーションでは、複数メディアを考慮した2ホップ通信の研究の第1歩として、2ホップ通信を行うノードはすべて同一の中継ノードを経由してハブにデータフレームを転送すると仮定している。

2.2 ポーリングプロトコルを用いたデータ送信手順

以下に、1ホップ通信および2ホップ通信の両方を考慮したポーリングプロトコルのデータフレーム送信手順を述べる。

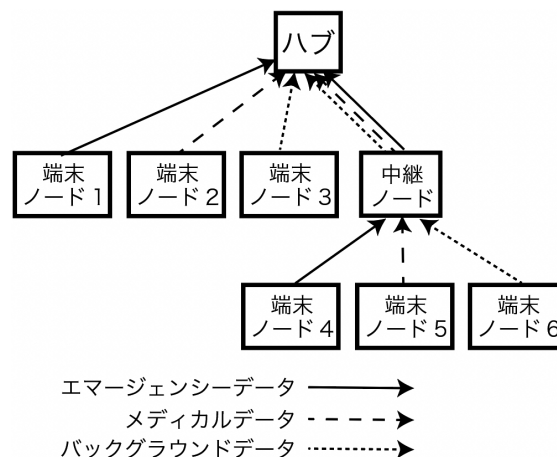


図1 無線BANのシステム構成

無線チャンネルの時間軸は、固定時間のスーパーフレーム単位に分割されている。一つのスーパーフレームは、ハブが1ホップノードにポーリングを行う期間と、中継ノードが2ホップノードにポーリングを行う期間とに分けられる。一つのスーパーフレームの開始時点で、ハブはビーコンフレームをすべての1ホップノードおよび中継ノードに送信する。ビーコンには、同期用の時刻情報および中継ノードへのチャンネル割り当て期間の情報が含まれている。ハブはビーコン送信後に、1ホップノードに対して順にIEEE 802.15.6標準のPollフレームを用いてポーリングを行う。Pollフレームを受信したノードが送信すべきデータフレームを持っている場合、SIFS (Short Interframe Spacing) の後にデータフレームを送信する。ハブはデータフレームを誤りなく受信するとSIFSの後にI-ACK (Immediate Acknowledgment) フレームを返す。そして、SIFSの後に次の1ホップノードに対してポーリングを行う。ハブが一つのノードにポーリングしたにも関わらずタイムアウト期間内にデータフレームを受信できない場合にも次のノードにポーリングを移す。さらに、本論文のシミュレーションでは、一つのエマージェンシーノードに対する連続ポーリングの性能改善効果を調べている。連続ポーリングを行う場合には、ハブがノードから受信したデータフレームのヘッダのMore Data フィールドが1の場合には、ノードがまだ送信すべきデータフレームを持っていると判断して、I-ACKフレームの代わりにPoll+I-ACKフレームを送信して同じノードを連続してポーリングする。More Data フィールドが0の場合には、ハブはノードがこれ以上送信すべきデータフレームを持っていないと判断し

て次のノードにポーリングを移す。本論文のシミュレーションでは、一つのスーパーフレームにおいて、1 ホップノード用の無線チャンネル容量が十分にある場合には、ハブはすべての1 ホップノードに対して1 度のポーリングを行うと仮定している。これは、IEEE 802.15.6 標準の 1-periodic ポーリング方式に対応している。ハブがすべての1 ホップノードに対するポーリングを終えるか、1 ホップノード用のチャンネル期間が終了すると、ハブはそのスーパーフレームでのポーリングを終了する。

次に、中継ノードは、2 ホップ通信用に割り当てられたチャンネル期間を用いて、2 ホップノードに対して順にポーリングを行う。本論文のシミュレーションでは、中継ノードのチャンネル割り当て期間は、予約ベースのスケジューリングにより予め決められていると仮定している。IEEE 802.15.6 標準では、チャンネル割り当て期間の予約は、ハブとノードとの間で、コネクション要求フレームとコネクション割り当てフレームを交換すること

により行われる⁴⁾。中継ノードは、2 ホップ通信用のチャンネル割り当て期間の冒頭で、IEEE 802.15.6 標準の T-Poll フレームをすべての2 ホップノードに向けて送信する。Poll フレームにはペイロードがないが、T-Poll フレームにはペイロードを含めることができ、時刻同期情報などを入れることができる。その後、ハブによる1 ホップノードへのポーリングと同じ手順で、中継ノードが2 ホップノードに対してポーリングを行う。中継ノードがすべての2 ホップノードに対するポーリングを終えるか、2 ホップノード用のチャンネル割り当て期間が終了すると、中継ノードはポーリングを終了する。なお、IEEE 802.15.6 標準では、Poll フレーム、T-Poll フレーム、I-ACK フレームなどの制御フレームは中継の対象ではないので、本研究でも1 ホップ通信を仮定している。

図 2 に上述のポーリングプロトコルを用いたデータフレームの送信例を示す。図 2 には、図 1 の無線 BAN 構成において、各端末ノードが順にポーリングされ、

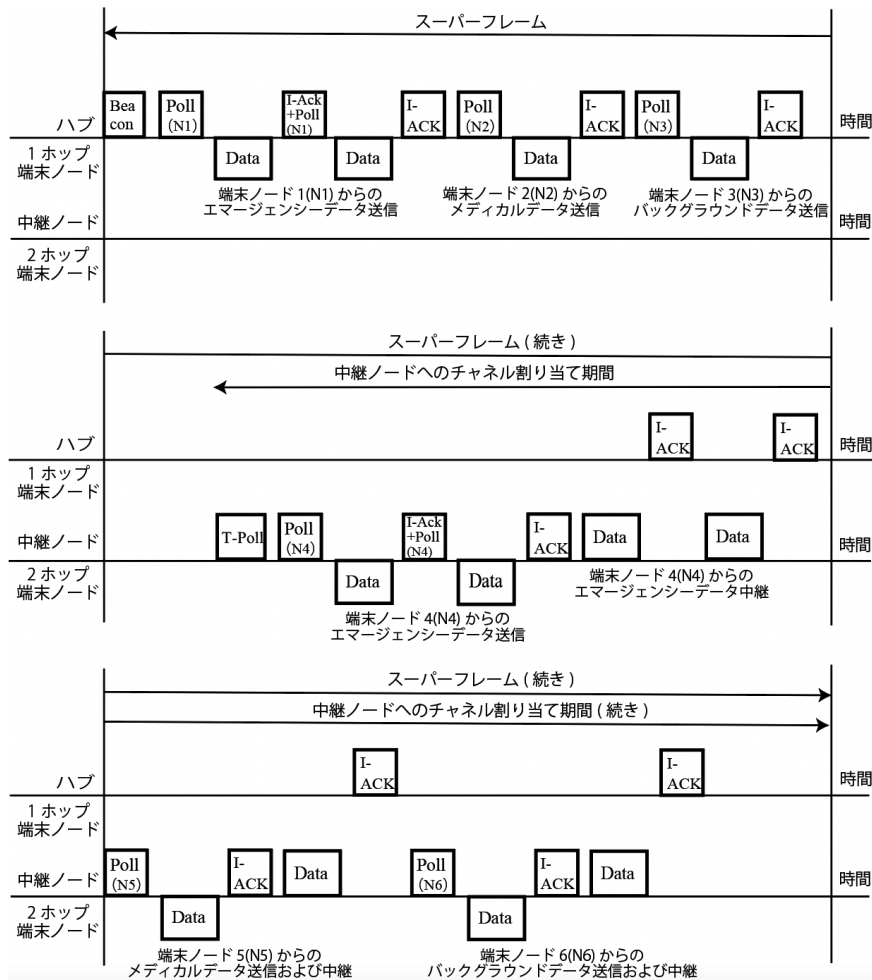


図 2 ポーリングプロトコルを用いた 1 ホップおよび 2 ホップのデータ通信

データフレームを送信する様子を示している。ただし、エマージェンシーノードに対しては、2度まで連続してポーリングが行われるという仮定を置いている。

図2では、まず、ハブが1ホップノードである端末ノード1から3に対してポーリングを行っている。最初に、ハブは端末ノード1に対して、2度のポーリングを連続して行っており、端末ノード1は二つのデータフレームをハブに送信している。このデータフレームにはエマージェンシーデータが入っている。ハブは、端末ノード1へのポーリングが終了すると、続けて、端末ノード2, 3に対して順にポーリングを行っている。ポーリングされた端末ノード2, 3は、それぞれデータフレームをハブに送信している。端末ノード2, 3の送信したデータフレームには、それぞれメディカルデータとバックグラウンドデータが入っている。その後、中継ノードへのチャンネル割り当て期間になると、中継ノードは、2ホップノードである端末ノード4から6に対してポーリングを行っている。中継ノードは、まず、端末ノード4に対して、2度のポーリングを連続して行っており、端末ノード4はエマージェンシーデータの入った二つのデータフレームを中継ノードに送信している。中継ノードは、端末ノード4から二つのデータフレームを受信すると、それらをハブに転送している。続けて、中継ノードは、端末ノード5, 6に対して順にポーリングを行っている。中継ノードは、端末ノード5, 6から、それぞれメディカルデータまたはバックグラウンドデータの入ったデータフレームを受信すると、それをハブに転送している。

ポーリングの順序に関しては、IEEE 802.15.6標準には具体的な記載がないが、本論文のシミュレーションでは、優先度なしと優先度付きのポーリングアルゴリズムを考えている。優先度なしの場合には、ハブあるいは中継ノードは、端末ノードの発生データの優先度に関係なくラウンドロビンで順にポーリングを行う。一方、優先度付きの場合には、スーパーフレーム毎に、エマージェンシーノード、メディカルノード、データノードの順でポーリングが行われる。

3. シミュレーション条件

本論文では、一つの無線BANのノードからハブに、1ホップまたは2ホップで、エマージェンシーデータ、メディカルデータ、バックグラウンドデータが送信され

表1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
MPDU 転送レート	971.4 kbps
PLCP ヘッダ転送レート	91.9 kbps
1ホップ通信のMACヘッダ長	9 バイト
2ホップ通信のMACヘッダ長	18 バイト
PLCP ヘッダ長	31 ビット
PLCP プリアンブル長	90 ビット
データ MSDU 長	228 バイト
I-ACK MSDU 長	3 バイト
T-Poll MSDU 長	3 バイト
ポーリングタイムアウト	153 us
ACK タイムアウト	153 us

る場合を想定して、シミュレーションによりポーリングプロトコルの性能を評価している。本研究で用いたシミュレーションプログラムは、筆者がC言語を用いて開発している。表1にシミュレーションで用いた物理レベルおよびMACレベルのシステムパラメータを示す。本論文では、IEEE 802.15.6標準のNarrow bandを用いた物理規格のうちデータ転送レートが971.4kbpsのものを用いている⁴⁾。この表で、2ホップ通信のMACヘッダ長が1ホップ通信の2倍になっているのは、2ホップ通信の場合には、端末ノードからハブに届けられる通常のMPDUの外側に、端末ノードー中継ノード間あるいは中継ノードーハブ間の通信のためのMACヘッダが付与されるためである。

本論文のシミュレーションでは、さらに以下の仮定を置いている。

1. 無線BANには、一つのハブ、一つの中継ノードおよび複数の端末ノードが含まれる。端末ノードは1ホップまたは中継ノードを介した2ホップでハブと通信が可能であり、発生するトラヒックの種類によりエマージェンシーノード、メディカルノード、データノードに分類される。1ホップでハブと通信可能なエマージェンシーノード、メディカルノード、データノードの数をそれぞれ N_{E1} , N_{M1} , N_{D1} 、2ホップでハブと通信を行えるエマージェンシーノード、メディカルノード、データノードの数をそれぞれ N_{E2} , N_{M2} , N_{D2} で表す。
2. すべてのエマージェンシーノードは、エマージェンシーデータを含むエマージェンシーMUをランダムに発生する。一つのエマージェンシーノードが発生するエマージェンシーMUの平均ビットレ

トを B_E kbps とし, エマージェンシー MU サイズを L_E バイトの固定長とする.

3. すべてのメディカルノードは, CBR (Constant Bit Rate) でメディカルデータを発生し, MU 発生レート 6.25MU/s で一つのメディカル MU を構成する. メディカルデータとしては, ビットレート 10kbps の VSM (Vital Sigh Monitoring) データを想定する³⁾. この数値例の下では, 一つのメディカル MU サイズは 200 バイトとなる.
4. すべてのデータノードは, バックグラウンドデータを含むバックグラウンド MU をランダムに発生する. 一つのデータノードが発生するバックグラウンド MU の平均ビットレートを 10kbps とし, バックグラウンド MU サイズを 200 バイトの固定長とする.
5. 上記の仮定 2 から 4 の三種類の端末ノードで発生した MU はすべて UDP/IP で送信される. 一つのノードで発生した各 MU は高々 200 バイトのセグメントに分割され, 一つまたは複数の UDP データグラムが構成される. 一つの UDP データグラムは一つの MPDU で送信される. 本論文では, UDP ヘッダ長を 8 バイト, IP ヘッダ長を 20 バイトとしている. これらの条件の下では, 一つの MPDU は高々 228 バイトとなる. 上記の仮定 2 から 4 のもとでは, 一つのメディカル MU およびバックグラウンド MU は一つの MPDU で送信される. エマージェンシー MU については, L_E の値により一つまたは複数の MPDU で送信される. さらに, 本論文ではノード内でのプロトコル処理時間はデータ転送時間と比較して十分小さく無視できると仮定する.
6. ハブによる 1 ホップノードへのポーリング, および中継ノードによる 2 ホップノードへのポーリングは, 一つのスーパーフレームで一つのノードに対して 1 度のみ行われる. ただし, エマージェンシーノードに対してのみ, 同じノードに最大 S_E 回連続してポーリングできる. ポーリングされた 1 ホップノードおよび 2 ホップノードが送信すべきデータ MPDU を持っている場合には, 1 度のポーリングにつき一つのデータ MPDU のみを送信できる. また, 一つのスーパーフレームの 1 ホップ通信あるいは 2 ホップ通信のチャンネル期間終了までに, 一連の Poll フレーム, データ MPDU および

I-ACK フレームを交換できる時間的余裕がない場合には, ハブまたは中継ノードは端末ノードへのポーリングを行わない.

7. 無線チャンネルのビットエラーレートを 10^{-4} とする. また, 各ノードは, MPDU の転送には $(63, 51)$ BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) コードを, PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) ヘッダの転送には $(31, 19)$ BCH コードを用いる⁴⁾. この符号の場合, ブロック当たり 2 ビットまでの伝送誤りを受信側で自動訂正できる. 誤ったビット数が許容値を越えた場合には, 受信側は送信側に対して I-ACK の返送ができないので, MPDU の送信に失敗したことになる.
8. 端末ノードおよび中継ノードが伝送誤りにより MPDU の送信に失敗した場合には再送を試みる. 一つの MPDU の最大再送回数を 4 とする. 一つのノードが 4 度めの再送で I-ACK を受信できない場合には MPDU は捨てられる. また, すべてのノードの送信バッファサイズを 100MPDU とし, あるノードの送信バッファが一杯の時に, 新たな MPDU を発生した場合には, その MPDU はバッファオーバーフローにより捨てられる. さらに, 一つの MU から構成された一つまたは複数のすべての MPDU がハブで正しく受信できない場合には, その MU はハブで再構成できずに欠落する.

4. シミュレーション結果

本節では, シミュレーション結果を用いて, 中継ノードへのチャンネル割り当て期間やポーリングプロトコルにおける優先制御のアプリケーションレベル QoS への影響を調べる. 性能評価尺度としては, MU スループットおよび平均 MU 遅延を用いる. 本論文では, MU スループットを, 端末ノードからハブに転送された MU の 1 秒当たりの平均ビット数, 平均 MU 遅延を, 端末ノードで一つの MU が発生してから, ハブがそれを受信し終えるまでの平均時間と定義する. 以下のシミュレーション結果は, 20 回のシミュレーションの平均値であり, 1 回のシミュレーション期間を 100 秒としている.

4.1 中継ノードのチャンネル割り当て期間の影響

本論文では, まず, 2 ホップ通信のための中継ノードのチャンネル割り当て期間について考察する. 中継ノード

のチャンネル割り当て期間が長い程、2ホップ通信のチャンネル容量が大きくなり、1ホップ通信のチャンネル容量が小さくなる。

図3から図6に、中継ノードのチャンネル割り当て期間と、エマージェンシーMUスループットおよび平均エマージェンシーMU遅延との関係を示す。これらの図では、スーパーフレーム長を50ms、エマージェンシーMUの平均ビットレートを $B_E=10\text{kbps}$ としている。また、エマージェンシーノードおよびメディカルノードの数を $N_{E1}=N_{M1}=N_{E2}=N_{M2}=2$ とし、データノード数に関しては、図3および図4では $N_{D1}=N_{D2}=5$ 、図5および図6では $N_{D1}=8$ 、 $N_{D2}=2$ としている。さらに、これらの図では、エマージェンシーMU長に関して $L_E=200$ バイトと $L_E=400$ バイトの2通りの場合を示している。 $L_E=200$ の場合には、一つのMUが一つのMPDUで送信されるが、 $L_E=400$ の場合には一

つのMUが二つのMPDUで送信される。ただし、エマージェンシーMUの平均ビットレートは一定であるので、エマージェンシーMU長が2倍になると、MUの発生レートは2分の1になることに注意されたい。ポーリングアルゴリズムとしては、優先度なしのラウンドロビンを用いている。

まず、図3から図6より、中継ノードのチャンネル割り当て期間が長すぎると1ホップノードのエマージェンシーMUスループットおよび平均エマージェンシーMU遅延が劣化し、短すぎると2ホップノードの性能が劣化することがわかる。エマージェンシーMUスループットが劣化している領域では、チャンネルが過負荷でありMPDUの欠落が発生している。このような領域の平均エマージェンシーMU遅延は図4および図6の縦軸の範囲よりもはるかに大きな値となるため、これらの図には示されていない。なお、筆者はメディカルMUお

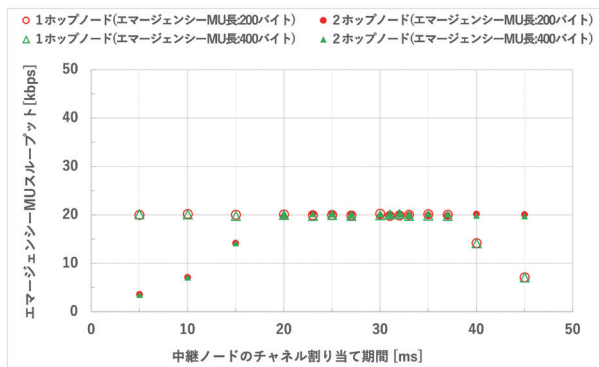


図3 中継ノードのチャンネル割り当て期間とエマージェンシーMUスループットとの関係： $N_{E1}=N_{E2}=N_{M1}=N_{M2}=2$ ， $N_{D1}=N_{D2}=5$ ， $B_E=10\text{kbps}$ 。

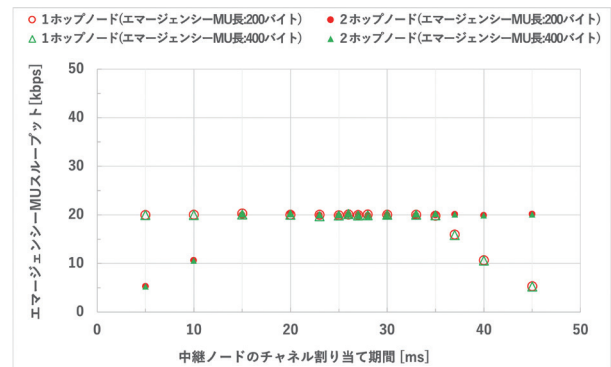


図5 中継ノードのチャンネル割り当て期間とエマージェンシーMUスループットとの関係： $N_{E1}=N_{E2}=N_{M1}=N_{M2}=2$ ， $N_{D1}=N_{D2}=8$ ， $B_E=10\text{kbps}$ 。

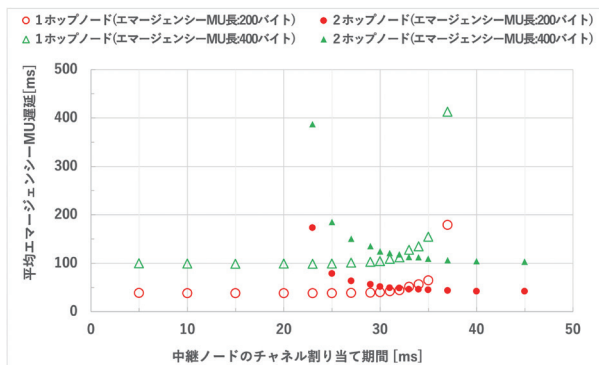


図4 中継ノードのチャンネル割り当て期間と平均エマージェンシーMU遅延との関係： $N_{E1}=N_{E2}=N_{M1}=N_{M2}=2$ ， $N_{D1}=N_{D2}=5$ ， $B_E=10\text{kbps}$ 。

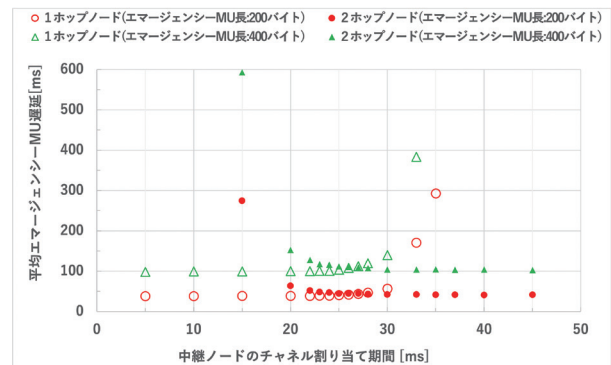


図6 中継ノードのチャンネル割り当て期間と平均エマージェンシーMU遅延との関係： $N_{E1}=N_{E2}=N_{M1}=N_{M2}=2$ ， $N_{D1}=N_{D2}=8$ ， $B_E=10\text{kbps}$ 。

よびバックグラウンド MU の性能についても同様の傾向が見られることを確認している。これは、ポーリングアルゴリズムとして、優先度なしのラウンドロビンを用いているからである。

次に、図 4 および図 6 を用いて、中継ノードへの適切なチャンネル割り当て期間について考察する。1 ホップノードと 2 ホップノードの平均エマージェンシー MU 遅延が共に最小に近い値となる中継ノードのチャンネル割り当て期間は、図 4 の場合には 30 ~ 33ms 付近、図 6 の場合には 23 ~ 27ms 付近である。これらの図では、すべての端末ノードの平均ビットレートは 10kbps であるので、図 4 の場合には、1 ホップノード全体および 2 ホップノード全体の平均ビットレートは共に 90kbps、図 6 の場合には、1 ホップノード全体の平均ビットレートは 120kbps、2 ホップノード全体の平均ビットレートは 60kbps である。従って、データ MPDU 自身の通信に必要なチャンネル容量は、図 4 の条件の下では 2 ホップノード用が 1 ホップノード用の 2 倍必要であり、図 6 の条件の下では 2 ホップノード用が 1 ホップノード用と同じだけ必要となる。ただし、図 4 において、1 ホップノードと 2 ホップノードの平均エマージェンシー MU 遅延の合計値は、中継ノードのチャンネル割り当て期間が 33ms より少し小さな 30 ~ 32ms 付近で一番小さくなっている。これは、2 ホップ通信の場合にはデータ MPDU は 2 度の通信が必要であるが、ポーリング処理は端末ノード-中継ノード間の通信で一度のみ行われることに起因している。図 6 の場合には図 4 の場合と比較して無線 BAN 全体のチャンネル負荷が低いため、中継ノードのチャンネル割り当て期間を 23 ~ 27ms 付近で変化させても、平均エマージェンシー MU 遅延の値はさほど変わらない。

なお、本節では、1 ホップノード数と 2 ホップノード数との比を変化させて、中継ノードへのチャンネル割り当て期間について議論したが、1 ホップノード全体あるいは 2 ホップノード全体のトラヒック量は、ノード数だけでなく、各ノードの MPDU 発生レートや MPDU サイズにも依存する。このため、一般的にはこれらも考慮して中継ノードへのチャンネル割り当て期間を決める必要があり、その際、一つのデータ MPDU の HUB への送信に、2 ホップノードの場合には 1 ホップノードよりも 2 倍程度のチャンネル容量が必要となることを考慮すべきである。

4.2 ポーリングの優先制御および連続ポーリングの影響

次に、ポーリングの優先制御および一つのエマージェンシーノードへの連続ポーリングの影響を調べる。図 7 から図 9 に、 $N_{E1}=N_{M1}=N_{E2}=N_{M2}=2$ として、1 ホップデータノード数 N_{D1} および 2 ホップデータノード数 N_{D2} の両方の値を、 $N_{D1}=N_{D2}$ という条件の下で変化させた場合の、1 ホップノードおよび 2 ホップノードの平均 MU 遅延の値を示す。図 7 は平均エマージェンシー MU 遅延、図 8 は平均メディカル MU 遅延、図 9 は平均バックグラウンド MU 遅延を表している。これらの図では、エマージェンシー MU の平均ビットレートを $B_E=10\text{kbps}$ とし、エマージェンシー MU 長を $L_E=400$ バイトとしている。この条件の場合、一つのエマージェンシー MU は二つの MPDU で送信されるため、エマージェンシーノードへの連続ポーリングを行う場合には $S_E=2$ としている。さらに、図 4 のシミュレーション結果を踏まえ、スーパーフレーム長を 50ms、中継ノードのチャンネル割り当て期間を 32ms としている。

まず、図 7 を用いて平均エマージェンシー MU 遅延について考察する。この図から、優先制御を行った場合には、データノード数が増えても遅延性能は劣下しないが、優先制御を行わない場合には遅延性能が劣下することがわかる。図 7 は、データノード数が 4 を越えて増加すると、優先制御を行わない場合には平均エマージェンシー MU 遅延の値が増加することを示している。優先度付きポーリングでは、エマージェンシーノードに対して最も高い優先度を付与しており、各スーパーフレームで必ずエマージェンシーノードから順にポーリングが行われる。一方、優先度なしの場合には、前のスーパーフレームですべての端末ノードにポーリングし切れなかった場合には、ノードの種類に関係なく続きのノードからポーリングが行われる。このため、データノード数が増えるとエマージェンシーノードのポーリング間隔が増加してしまう。さらに、図 7 から、エマージェンシーノードへの連続ポーリングを行うと、平均エマージェンシー MU 遅延の値をかなり改善できることがわかる。この図のシミュレーション条件の下では、一つの MU は二つの MPDU に分割されて送信される。このため、一つのエマージェンシーノードに対して、2 回連続してポーリングが行われれば、伝送誤りが起きない限り、一つのスーパーフレームで一つの MU の送信を完了できる。エマージェンシー MU は、できるだけ早く送信す

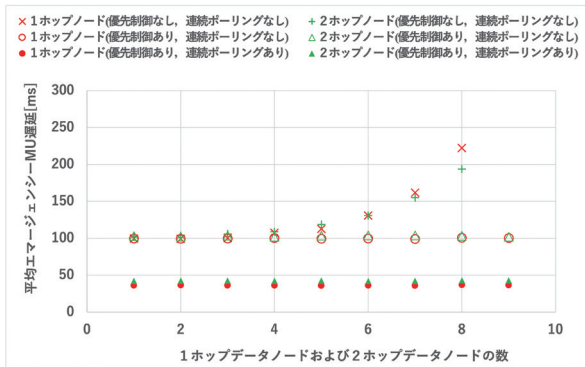


図7 データノード数と平均エマージェンシー MU 遅延との関係： $N_{E1}=N_{E2}=N_{M1}=N_{M2}=2$, $N_{D1}=N_{D2}$, $B_E=10\text{kbps}$, $L_E=400$ バイト。

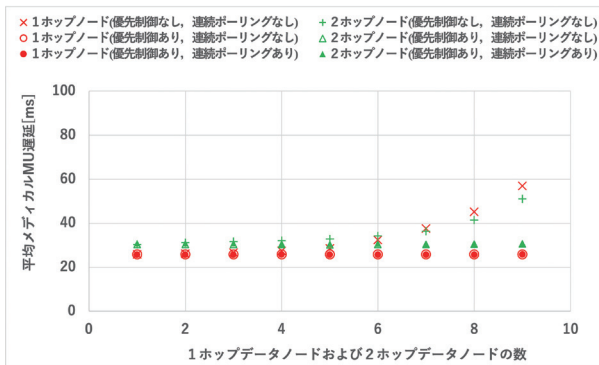


図8 データノード数と平均メディカル MU 遅延との関係： $N_{E1}=N_{E2}=N_{M1}=N_{M2}=2$, $N_{D1}=N_{D2}$, $B_E=10\text{kbps}$, $L_E=400$ バイト。

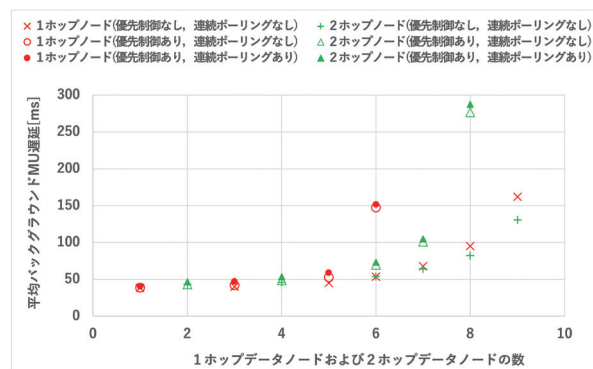


図9 データノード数と平均バックグラウンド MU 遅延との関係： $N_{E1}=N_{E2}=N_{M1}=N_{M2}=2$, $N_{D1}=N_{D2}$, $B_E=10\text{kbps}$, $L_E=400$ バイト。

ることが欠かせないため、優先制御や連続ポーリングの機能は重要である。

次に、図8を用いて平均メディカル MU 遅延について検討する。この図からも、データノード数が4を越えると、優先制御を行わない場合には平均メディカル MU 遅延が上昇することがわかる。一方、優先制御を行う場合には、平均メディカル MU 遅延の値は上昇していない。これは、優先制御を行う場合には、ハブまたは中継ノードが、メディアカルノードに対してデータノードよりも優先的にポーリングを行うため、エマージェンシー MU とメディカル MU の合計トラフィック量がチャネル容量を越えなければ、メディカル MU の性能は劣下しないからである。また、図8は、エマージェンシーノードに対して連続ポーリングを行っても、平均メディカル MU 遅延の値は殆ど劣下しないことも示している。この図の条件の下では、エマージェンシー MU およびメディカル MU のトラフィック量が小さいため、エマージェンシーノードへの連続ポーリングの平均メディカル MU 遅延への影響は非常に小さくなっている。文献3)によると、メディカルデータに求められる遅延時間は250msであるため、本研究のシミュレーション条件の下ではこの遅延制限を満たしている。

最後に、図9を用いて、平均バックグラウンド MU 遅延について調べる。この図から、データノード数の大きな領域で優先制御を行うと、優先制御を行わない場合と比較して平均バックグラウンド MU 遅延の値が大きく劣下することがわかる。特に、データノード数が5を越えた場合の1ホップノードの平均バックグラウンド MU 遅延や、データノード数が7を越えた場合の2ホップノードの平均バックグラウンド MU 遅延は急激に増加している。これは、データノードの優先度が、エマージェンシーノードやメディカルノードよりも低いため、データノード数が多くなると、一つのデータノードのポーリング間隔が大きくなってしまいうからである。平均バックグラウンド MU 遅延が急激に増加している領域では、無線チャネルは過負荷になっている。

以上より、優先制御や連続ポーリングを行えば、高優先度トラフィックの性能が改善されるが、低優先度トラフィックの性能は劣下すると言える。しかし、エマージェンシーデータは、できるだけ早急に送信することが必須であるため、優先制御や連続ポーリングの機能は重要である。

5. 動的チャンネル割り当て方式の性能評価

IEEE 802.15.6 標準では、予約によるチャンネル割り当てでは、ハブとノードとの間で、コネクション要求フレームとコネクション割り当てフレームを交換することによって行われる⁴⁾。前節では、シミュレーション期間中は、一つのスーパーフレームの中継ノードのチャンネル割り当て期間を固定して性能評価を行っている。しかし、無線 BAN の一時的なトラヒック変動に応じて動的なチャンネル割り当てを行えば、2 ホップ通信の性能を改善できる可能性がある。そこで、本節では、チャンネルの使用状況に応じて、動的に中継ノードのチャンネル割り当て期間を変更する方式を考案し、シミュレーションによりその改善効果を調べている。

5.1 動的チャンネル割り当て方式

本論文で考案した動的チャンネル割り当て方式について以下に述べる。

一つのスーパーフレームで、ハブがすべての 1 ホップノードへのポーリングを終了したにも関わらず、まだ 1 ホップ通信用のチャンネル期間が残っている場合には、ハブはそのスーパーフレームの残りの期間をすべて 2 ホップ通信用に割り当てる。このために、ハブはチャンネル割り当て期間および時刻同期情報を入れた T-Poll フレームを中継ノードに送る。中継ノードは T-Poll フレームを受け取るとハブに対して I-ACK を返送する。そして、中継ノードは 2 節の手順と同様に 2 ホップノードのポーリング処理に移る。即ち、最初にすべての 2 ホップノードに T-Poll フレームを送信してから、定められたアルゴリズムで、2 ホップノードを順にポーリングする。

一方、一つのスーパーフレームで、中継ノードがすべての 2 ホップノードへのポーリングを終了したにも関わらず、まだ 2 ホップ通信用のチャンネル期間が残っている場合には、中継ノードはハブにポーリングの終了を伝える。このために、中継ノードは最後に 2 ホップノードから受信した MPDU のヘッダの More Data フィールドを 0、Last Data フィールドを 1 として、ハブに転送する。ハブは中継ノードからその MPDU を受信すると、中継ノードが残りのチャンネル割り当て期間を放棄したと判断する。そして、ハブがまだそのスーパーフレームの 1 ホップノードのポーリングを終了していない場合には、そのスーパーフレームの残りの期間を用いて、1 ホップノードのポーリングを再開する。

5.2 動的チャンネル割り当て方式のシミュレーション結果

図 10 から図 12 に、 $N_{E1}=N_{M1}=N_{E2}=N_{M2}=N_{D1}=2$ として、2 ホップのデータノード数 N_{D2} の値を変化させた場合の、2 ホップノードの平均 MU 遅延の値を示す。図 10 は平均エマージェンシー MU 遅延、図 11 は平均メディカル MU 遅延、図 12 は平均バックグラウンド MU 遅延を表している。これらの図では、 $B_E=10\text{kbps}$ 、 $L_E=400$ バイト、 $S_E=2$ とし、エマージェンシーノードに対する連続ポーリングを実行している。さらに、スーパーフレーム長を 50ms とし、中継ノードのチャンネル割り当て期間を 32ms を基本として動的に変化させている。

図 10 から、優先制御を行わない場合には、動的制御を行う場合の方が行わない場合よりも、平均エマージェンシー MU 遅延の値が小さいことがわかる。このシミュレーション条件の下では、1 ホップ通信用に割り当てられたチャンネル容量に余裕があるため、余ったチャンネル容量を 2 ホップ通信用として割り当てた方が平均エマージェンシー MU 遅延の値が小さくなる。特に、2 ホップデータノード数が多い場合には、2 ホップ通信用チャンネルの負荷が高くなるため、動的制御の改善効果が大きくなる。この結果は、2 ホップデータノード数が一時的に増加しても、チャンネル割り当て期間の動的制御を行えば、動的制御を行わない場合と比較して、MU 遅延の劣下を小さく抑えられることを意味している。一方、図 10 において、優先制御を行う場合には、動的制御による遅延性能の改善効果は見られない。これは、優先制御を行う場合には、スーパーフレーム毎にエマージェンシーノードからポーリングが行われるため、動的制御を行わなくてもエマージェンシーノードに対して、十分な送信機会が与えられるからである。

さらに、図 11 の平均メディカル MU 遅延についても、平均エマージェンシー MU 遅延の場合と同様の傾向が見られる。即ち、2 ホップデータノード数が増加すると、優先制御を行わない場合には動的制御による改善効果が見られるが、優先制御を行う場合には改善効果は見られない。図 11 において、優先制御を行う場合に動的制御を行うと、平均メディカル MU 遅延の値がわずかに上昇しているが、これは、CBR トラヒックであるメディカル MU の発生タイミングと、ポーリングのタイミングのずれが原因であると考えられる。

最後に、図 12 から、平均バックグラウンド MU 遅延

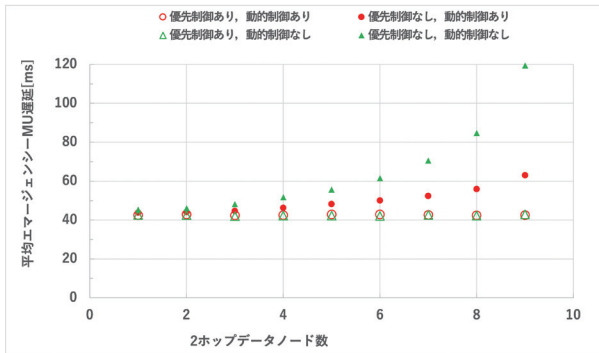


図10 2ホップのデータノード数と平均エマージェンシー MU 遅延との関係： $N_{E1}=N_{E2}=N_{M1}=N_{M2}=N_{D1}=2$, $B_E=10\text{kbps}$, $L_E=400$ バイト。

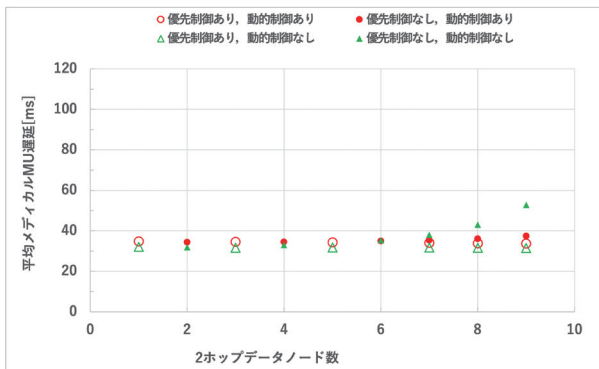


図11 2ホップのデータノード数と平均メディカル MU 遅延との関係： $N_{E1}=N_{E2}=N_{M1}=N_{M2}=N_{D1}=2$, $B_E=10\text{kbps}$, $L_E=400$ バイト。

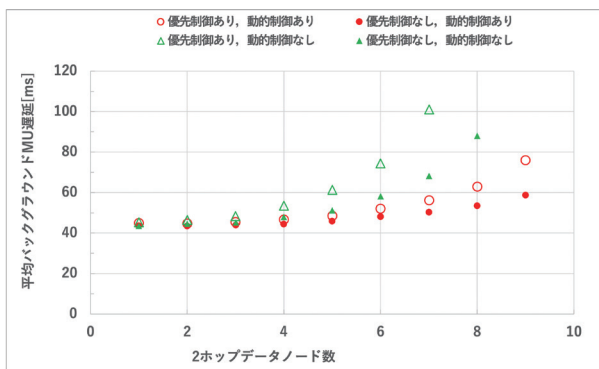


図12 2ホップのデータノード数と平均バックグラウンド MU 遅延との関係： $N_{E1}=N_{E2}=N_{M1}=N_{M2}=N_{D1}=2$, $B_E=10\text{kbps}$, $L_E=400$ バイト。

については、優先制御の有無に関わらず、動的制御による性能改善効果が見られる。特に、2ホップデータノード数が4以上の領域で、優先制御ありの場合には、動的制御の改善効果が大きくなっている。優先制御ありの場合にチャネル負荷が高くなると、データノードのポーリング間隔が著しく長くなるので、動的制御の改善効果も大きくなる。

6. 結論

本論文では、1ホップあるいは2ホップで端末ノードがハブに、エマージェンシーデータ、メディカルデータ、バックグラウンドデータを送信する状況を想定して、アプリケーションレベル QoS の評価をシミュレーションにより行った。性能評価尺度としては、MU スループットおよび平均 MU 遅延を用いた。

まず、スーパーフレーム当たりの中継ノードへのチャネル割り当て期間を変化させて、エマージェンシー MU スループットおよび平均エマージェンシー MU 遅延について調べ、1ホップ通信および2ホップ通信共に優れた性能を示すチャネル割り当て期間について考察した。次に、優先度なしポーリングと優先度付きポーリングとの性能比較や、一つのエマージェンシーノードへの連続ポーリングの性能改善効果を調べた。その結果として、優先制御を用いると、低優先度のデータノード数が増加しても、高優先度のエマージェンシーデータやメディカルデータの性能が劣下しないこと、および MU 長が大きく一つの MU が複数の MPDU によって送信される状況では、連続ポーリングによりエマージェンシーデータの MU 遅延を小さくできることを定量的に明らかにした。最後に、一つのスーパーフレーム内の1ホップ通信あるいは2ホップ通信のチャネル期間が余っている場合には、動的にチャネル割り当て期間を変える方式を考案し、平均 MU 遅延の改善効果を調べた。そして、1ホップ通信のチャネル容量に余裕がある場合には、チャネル割り当て期間の動的制御により、2ホップノードの平均 MU 遅延を改善できる可能性があることを定量的に示した。

今後の課題としては、中継ノードが複数ある状況や端末ノードが移動してコネクションの再設定が必要な状況を想定してシミュレーションを行うことが考えられる。本論文では1ホップおよび2ホップ通信が混在する環境における性能評価の第一歩として、中継ノードが一つ

である場合を対象としたが、電波伝搬の状況によっては、中継ノードが複数必要な場合や、人間の動作等によって、最適な中継ノードが動的に変化する場合も考えられる。この場合には、ハブおよび中継ノードと端末ノードとの接続の再設定が必要であり、ハブの中継ノードへのチャンネル割り当て期間も端末ノードの接続状況に応じて決める必要がある。さらに、本論文ではメディカルデータとしてビットレート 10kbps の VSM データを想定したが、ビットレート数十~数百十 kbps 程度の ECG (Electrocardiogram) や EEG (Electroencephalogram) などのメディカルデータを想定して評価を行うことも課題である。その際には、アプリケーションレベルの MU 発生レートや一つの MU 長、MAC レベルのスーパーフレーム長やプロトコルについても検討する必要がある。

参考文献

- 1) R. Cavallari, F. Martelli, R. Rosini, C. Buratti, and R. Verdone : A survey on wireless body area networks: technologies and design challenges, IEEE communications surveys and tutorials, vol. 16, no. 3, pp.1635-1657, Feb. 2014.
- 2) S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, and A. Jamalipour : Wireless body area networks: a survey, IEEE communications surveys and tutorials, vol. 16, no. 3, pp.1658-1686, Jan. 2014.
- 3) M. Patel and J. Wang : Applications, challenges, and prospective in emerging body area networking technologies, IEEE wireless communications, vol. 17, issue. 1, pp.80-88, Feb. 2010.
- 4) IEEE standard for local and metropolitan area networks - Part 15.6 wireless body area networks, IEEE Std., Feb. 2012.
- 5) M. Hernandez, R. Kohno, T. Kobayashi, and M. Kim : New revision of IEEE 802.15.6 wireless body area networks, in Proc. IEEE ISMICT'22, May 2022.
- 6) A. K. Jacob and L. Jacob : Enhancing reliability of emergency traffic in IEEE 802.15.6 wireless body area networks, in Proc. IEEE TENSYPMP'17, July 2017.
- 7) K. S. Deepak and A. V. Babu : Optimal packet size for energy efficient WBAN under m-periodic scheduled access mode, in Proc. IEEE NCC'14, pp.1-6, Feb. 2014.
- 8) T. Manna and I. S. Misra : Performance analysis of scheduled access mode of the IEEE 802.15.6 MAC protocol under non-ideal channel conditions, IEEE transactions on mobile computing, vol. 19, no. 4, pp.935-953, Apr. 2020.
- 9) P. Khan, N. Ullah, S. Ullah, and K. S. Kwak : Analytical modeling of IEEE 802.15.6 CSMA/CA protocol under different access periods, in Proc. ISCIT'14, Sept. 2014.
- 10) H. Fourati, H. Idoudi, and L. A. Saidane: A novel IEEE 802.15.6 CSMA/CA service differentiation, in Proc. IEEE/ACS AICCSA'16, Nov. 2016.
- 11) A. K. Jacob, G. S. Kishore, and L. Jacob : Contention versus polling access in IEEE 802.15.6 : delay and lifetime analysis, in Proc. NCC'15, Feb. 2015.
- 12) M. Kaur, R. Bajaj, and N. Kaur : Wireless body area network: performance analysis of polling access MAC protocol, in Proc. GCAT'21, Oct. 2021.
- 13) A. Khan, S. Ali, D. Shah, and A. Farhad : A self-adaptive superframe structure for emergency traffic based IEEE 802.15.6, in Proc. HONET-ICT'18, Oct. 2018.
- 14) F. Sallabi, M. Adnan, K. Shuaib, and M. Abdel-Hafez : Performance evaluation of IEEE 802.15.6 MAC under varying health emergency conditions, in Proc. IWCMC'21, June 2021.
- 15) T. Suzuki : Emergency data transmission with block ACK of IEEE 802.15.6 CSMA/CA, in Proc. ITS-CSCC'22, July 2022.
- 16) T. Suzuki, A. Noguchi, and S. Tasaka : Application-level QoS and QoE assessment of audio-video transmission with TXOP-bursting by IEEE 802.11e EDCA, IEICE Transactions on Communications, Vol. E92-B, No.8, pp.2600-2609, Aug. 2009.
- 17) K. Takabayashi, H. Tanaka, C. Sugimoto, and R. Kohno : Performance evaluation of error control scheme in multihop WBAN based on IEEE 802.15.6, in Proc. ISITA'16, Oct. 2016.
- 18) B. Kim and K. Kim : Design of temperature-aware routing for IEEE 802.15.6 based wireless body area

networks, in Proc. IEEE MASS'20, pp.497-505, Dec. 2020.

- 19) R. Pan, D. Chua, J. S. Pathmasuntharam, and Y. P. Xu : An opportunistic relay protocol with dynamic scheduling in wireless body area sensor network, IEEE Sensors Journal, Vol.15, No.7, pp.3743-3750, July 2015.
- 20) M. T. Aravind and L. Jacob : Energy efficient and reliable communication in IEEE 802.15.6 IR-UWB WBAN, in Proc. ICACCI'18, pp.2352-2358, Sept. 2018.