

Doctoral Thesis

博士論文

**Dependable and Energy Efficient QoS
Control System
for Medical Wireless Body Area Networks**

**医療用無線ボディエリアネットワークのための
高信頼・エネルギー高効率な QoS 制御システム**

March 24, 2017

2017 年 3 月 24 日

14SD106

Kento TAKABAYASHI

高林 健人

Supervisor: Professor Ryuji KOHNO

指導教官：河野隆二 教授

Department of Physics, Electrical & Computer Engineering,
Graduate School of Engineering,
Yokohama National University

Kohno Laboratory

横浜国立大学大学院 工学府 物理情報工学専攻 河野研究室

Abstract

The ratio between the old and young in the global population is more rapidly increasing than that in the past. This is raising concerns regarding the increasing cost of medical care. It is also thought that people will become increasingly health conscious in the future. Meanwhile, portable devices such as smart phones, tablets, and wearable devices have become widespread. Health monitoring systems employing wearable vital sensors and using wireless communication (also known as m-health or m-IoT) have received significant attention in recent years. It is expected that m-IoT will allow continuous monitoring of the user's physical condition and help preempt serious illnesses. In the field of m-IoT systems, the wireless body area networks (WBANs) is a key technology. Extensive work on the standardization of such systems has been carried out.

In a WBAN system, a wearable vital sensor node can use a range of sensor types, all of which have different data rates. The allowable communication error ratio or delay depends on the application used. IEEE Std. 802.15.6 defines eight levels of user priorities. The Quality of Service (QoS) control must ensure that different types of data can be communicated as efficiently as possible at a satisfactory quality level. The optimal QoS control of input data is therefore an important factor in sensor data transmission.

To address this requirement, we have proposed an optimal QoS control scheme employing a multiplexing layer for priority scheduling and a decomposable error control coding scheme that can adapt to varying channel conditions. The multiplexing module controls the different types of QoS requirements such as required error ratio and delay according to the following priorities by changing the number of data copies of Weldon's ARQ and combination of decomposable codes. The target WBAN is a wearable device comprising multiple sensors whose output data is transmitted using a common medium access control (MAC) and physical (PHY) layer. Simulations are conducted to evaluate the performance of the proposed system and to compare its performance with that of a system based on IEEE 802.15.6. Then, we present a theoretical analysis and

optimization of the proposed method, and derive a lower bound on throughput and an upper bound on the residual bit error rate for both the proposed system and the standard system.

In addition, several performances of the proposed scheme are evaluated in a multiple WBANs environment, representing a more practical situation. A further study investigate the energy efficiency of the proposed scheme using computer simulations. Energy efficiency is an important factor because WBAN nodes are small and their battery capacity is limited. To complete the performance evaluation of the proposed scheme, this study quantitatively evaluate the RBER and energy efficiency of our proposed system under a WBANs channel model not only in a general case, but also in the worst-case scenario.

Furthermore, we evaluate some performances of our QoS control scheme in the case of a multi-hop WBAN based on IEEE Std. 802.15.6. IEEE Std. 802.15.6 supports a two-hop extension. Then, a WBAN extended to multihop communication is studied in order to increase the lifetime of a WBAN. However, many studies of a multihop WBAN focus on an energy-efficient MAC or routing protocol, and then they do not consider an error controlling. As a result of computer simulations, our proposed scheme has better performances than the standard scheme. Then, numeral results show both systems have the best performance in case that communication distance on the first hop is equal to that on the second hop.

Finally, we analyze and optimize performance of our QoS control scheme in a cross-layer design for WBANs. A cross-layer approach is one of the most important technique in order to optimize satisfied QoS of various types of data. In this study, we focus on cross-layer design between PHY and MAC layers. Slotted ALOHA is focused on as a random access protocol, because slotted ALOHA is adopted in UWB-PHY of IEEE802.15.6 and Smart BAN. Then, TDMA (Time Division Multiple Access) is considered as a scheduled access protocol. Numerical results show our proposed scheme has better performances than the standard scheme. Additionally, the case utilizing a schedule access protocol has basically better performances than a random access protocol except delay performance.

In the final chapter, we conclude our doctoral thesis, and then describe future work and prospects about this study and a related research field.

あらまし

近年の先進国における高齢人口の急速な増加や生産年齢人口の減少，それに伴った医療費の高額化などが世界的な社会問題となりつつある．そのため，多くの人々が可能な限り長く健康を維持し，自立して暮らすことができ，病気になっても質の高い医療・福祉サービスを享受し，住み慣れた地域で安心して暮らすことができることに加え，経済成長をも成し遂げることができる社会の実現が重要となっている．ところで，自動車・家電・ロボット・施設などあらゆるモノがセンサと無線通信機能を搭載してインターネットにつながり，情報のやり取りをすることで，モノのデータ化やそれに基づく自動化等が進展し，新たな付加価値を生み出す「モノのインターネット」(IoT: Internet of Things)が近年大きな注目を集めている．とりわけ，上記のような社会情勢から，体内外に装着したバイタルセンサやカプセル内視鏡などの医療・ヘルスケア機器・ロボットを用いた在宅医療や遠隔医療システムを構築するための医療・ヘルスケア IoT に注目が集まっている．例えば，2012年には医療・ヘルスケア IoT システムの一つとして知られる「無線ボディエリアネットワーク」(WBANs: Wireless Body Area Networks)の標準規格の一つである「IEEE802.15.6」が策定された．また，欧州における標準化組織である欧州電気通信標準化機構 (ETSI: European Telecommunications Standards Institute)においても，Smart Body Area Networks (Smart BAN)の標準化が進められている．これらの規格では取り扱うデータに対して数段階の優先度を設定することが可能になっている．しかしながら，これらの優先度に応じた QoS (Quality of Service) の具体的な制御手段は実装依存である．また本研究の対象としている IEEE802.15.6 の超広帯域 (UWB: Ultra Wide Band) 無線システムでは，物理層において二つのモード (default mode と High QoS mode) が定められているだけである．一般に，WBANs ではヘルスケアに必要なバイタルデータや医療機器の制御データといったデータの他，スポーツ用途やエンターテイメント用途，ネットワーク制御用データなどの幅広いデータを扱う．しかしながら，これらのデータに要求される QoS は各々大きく異なっており，現在の規格では十分対応しきれない．

そこで，私は WBANs における複数データの優先度に合わせた QoS 実現手法についてこれまで研究してきた．具体的には，WBANs の国際標準規格である

IEEE802.15.6 の UWB-PHY で規定されている default mode (Hybrid ARQ を用いないモード) においても Hybrid ARQ を適用し, 優先度毎に ARQ (Automatic Repeat reQuest) や FEC (Forward Error Correction) の使い方を選択できるように修正を施すことで QoS パラメータの有効活用を行えるようにした. この際, 複数のデータを同時に扱えるように multiplexing layer を設け, この層に設置した MUX コントローラが事前に設定された QoS パラメータに従い誤り制御や遅延制御を行う. 加えて, 誤り訂正符号として Decomposable code, 再送プロトコルとして Weldon's ARQ と呼ばれる手法を用いた. この提案方式では, Weldon's ARQ のデータコピーの数や Decomposable codes の組み合わせ方により, 異なる QoS を持つデータが多重化して送られるシステムにおいて, 必要とされる QoS の制御が可能となった. 加えて, この方式の理論解析と最適化を行った. また, より現実的な環境として複数の WBANs が共存し, 互いに干渉を与えてくる環境を想定した場合の評価も行った. この際, Decomposable codes の組み合わせ方を拡張してより低符号化率の誤り訂正符号を構成出来るようにしたことにより, 誤り訂正能力を向上させて, より強力な干渉が与えられた場合でも高信頼性を持たせた. 加えて, 本 QoS 制御方式の Energy Efficiency(消費電力あたりのスループット)を幾つかの変調方式において評価した. Energy Efficiency とは, 単位エネルギーに対して, どの程度の情報量を正確に送れるかを測る指標である. 無線ボディエリアネットワークではノードは非常に小さく, 同時にバッテリー容量も小さいことが想定される. そのため, Energy Efficiency を評価することは非常に重要である. スケジュールアクセス方式の MAC プロトコルを想定し, 計算機シミュレーションにより, 結果として標準規格と比較して各々の QoS を柔軟に満たすことが出来, なおかつ最悪ケースにおける特性保障が出来ることも示せた.

また, IEEE802.15.6 で規定されている 2 ホップ通信を適用した場合の本方式の性能評価についても行った. 本規格ではハブ-ノード間のシングルホップによる通信が不可能な場合に備えて, 他のノードを一度だけ経由することができる. しかしながら, 多くのマルチホップ WBAN の研究では, 低消費電力な MAC プロトコルやルーティング手法が主な対象であり, 誤り制御方式についての研究は少ない. 加えて, IEEE802.15.6 を基にしたマルチホップ WBAN の性能評価も少ない. 本研究では, IEEE802.15.6 に基づいた 2 ホップまで拡張された WBAN における, 我々が提案してきた QoS 制御方式と標準規格の通信距離に関する性能評価を異なる優先度のデータにおいて行った. この際, 提案方式においては, 事前に設定されたパラメータに基づいて再送を行う方式と, プリアンブルを用いて推定したチャンネル SNR を用いて各データの QoS に基づいた誤り訂正符号の符号化率を設定した場合とで比較した. 計算機シミュレーションの結果, プリアンブルから推定したチャンネル SNR から誤り訂正符号の符号化率を決定した方式を用い, 2 ホップとも

同じ距離で通信を行った場合の特性が最も良いことが確認できた。

最後に、本 QoS 制御方式における、異なる MAC プロトコルを適用した際のクロスレイヤでの性能解析と最適化を行った。クロスレイヤでのアプローチは、様々な種類のデータの QoS を最適化する上では重要な手法の一つである。これまでの研究ではスケジューリングアクセス方式の MAC プロトコルを前提に考えてきたが、IEEE802.15.6 ではランダムアクセス方式とのハイブリッド MAC プロトコルが適用されている。そのため、各 MAC プロトコルにおける自らの提案 QoS 制御方式を物理層・MAC 層のクロスレイヤで評価・解析を行った。ランダムアクセス方式には slotted ALOHA を想定する。これは、IEEE802.15.6 の UWB-PHY や Smart BAN での適用が想定されているためである。また、スケジューリングアクセス方式には解析の単純化のため TDMA を想定した。性能解析の結果、基本的にはスケジューリングアクセス方式の方が良い特性が得られ、ランダムアクセス方式における限界値も確認できた。加えて、ある条件化での最大送信回数の最小値も求めることができた。

第 1 章では本研究の背景、目的について述べた後、本論分の章構成について説明する。第 2 章では IEEE802.15.6 における、本研究との関連事項について述べる。第 3 章では本論文におけるシステムモデルについて述べる。第 4 章では、本論文における提案 QoS 制御方式について述べ、次の章でその理論解析と最適化について述べる。第 6 章ではこの方式における Decomposable codes の拡張について述べ、より現実的な環境における Energy Efficiency を含めた性能評価について述べる。さらに第 7 章は IEEE802.15.6 で規定されている 2 ホップ通信を適用した場合の本方式の性能評価について述べる。続く章では、本方式における PHY-MAC でのクロスレイヤ解析について説明する。最後に本論文をまとめ、今後の研究課題と将来への展望について述べる。