

# 医療等社会システムのセキュリティ・デペンダビリティを確保維持するマルチレイヤ ICT の研究開発 Research and Development of Multi-layer ICT to Sustainably Guarantee Security and Dependability of Medical and Other Social Systems

## 研究代表者

河野隆二 国立大学法人横浜国立大学  
Ryuji Kohno, Yokohama National University

## 研究分担者

今井秀樹<sup>†</sup> 落合秀樹<sup>††</sup> 杉本千佳<sup>††</sup> 伊田省悟<sup>†††</sup>  
Hideki Imai<sup>†</sup> Hideki Ochiai<sup>††</sup> Chika Sugimoto<sup>††</sup> Shogo Ida<sup>†††</sup>  
<sup>†</sup>中央大学 <sup>††</sup>横浜国立大学 <sup>†††</sup>株式会社日本ジー・アイ・ティー  
<sup>†</sup>Chuo University <sup>††</sup>Yokohama National University <sup>†††</sup>Nippon GIT

研究期間 平成 24 年度

## 概要

医療、エネルギー、交通などのライフラインとなる命に関わる Life Critical な社会システムに対する意図的な攻撃や干渉妨害に必要なセキュリティ、デペンダビリティの条件やレベルを定義、設定し、処理能力・消費電力に制約がある医療用ボディアエリアネットワーク (BAN) などでもその条件やレベルを満たす物理層から上位層の要素技術とマルチレイヤ垂直統合技術を、フィンランドの CWC と CWC 日本などの既に確立された EU-日本の共同体制を活用して研究開発する。さらに、本年 2 月に国際標準化を達成した BAN (IEEE802.15.6) のセキュアシステムの試作、治験や技術基準適合証明などの法的認証や社会実験を短期間で実現し、車両制御用ハーネスなどの Life Critical システムへ水平展開し、国際ビジネスを EU-日本共同で展開する。

### 1. まえがき

想定外のサイバー攻撃や危機に対しても安全で信頼できるセキュア(Secure)でデペンダブル(Dependable)な医療などの社会システムを構築し持続発展させるために、従来のアプリケーション層暗号・認証技術ばかりでなく、処理能力や消費電力の制限されたデバイスに適した UWB などの物理層セキュリティ技術および MAC 層セキュアプロトコルなどの上位層技術との垂直統合最適化を研究開発し、EU-日本共同による社会実験、臨床検査により薬事法の治験、電波法の技術基準適合証明などの国際的な法制化や医療以外への水平ビジネス展開を短期間で実現する。

### 2. 研究開発内容及び成果

まず、本事業による全体の研究開発内容及び到達目標を概説し、その後本年度の達成状況を詳細に述べる。

- ① 医療ネットワークの情報セキュリティ定義：医療用 BAN などの医療ネットワークに求められる固有な情報セキュリティが対象とすべき、驚異となるサイバー攻撃や干渉妨害を分析整理し、各攻撃や干渉妨害に応じて達成すべきセキュリティレベルを定義する。
- ② 医療ネットワークセキュリティの制約下のレイヤ別最適方式設計：各攻撃や干渉妨害の問題に応じて、導入可能な対策技術を物理層からアプリケーション層にわたり分類整理し、各問題解決に複数のレイヤの対策技術が存在する場合に、BAN の組み込み型デバイスを前提にした計算処理能力と消費電力の制限下で、最適な方式設計を行なう。
- ③ 国際標準医療 BAN セキュリティのマルチレイヤ統合最適化による更新：IEEE802.15.6 で国際標準化された BAN の物理層と MAC 層技術スペックを満たした上で、ネットワーク層以上の上位層で対処可能な方式設計と、国際標準の物理層・MAC 層の更新 (amendment) を含むマルチレイヤ統合最適化による

方式設計を、産業化に必要な経済性や技術共有性を基に理論によるフィジビリティスタディを行なう。

- ④ 国際標準医療 BAN セキュリティの臨床試験：臨床試験に必要な実用システムの試作に基づくフィジビリティスタディを、EU と日本で同時に行なう。
- ⑤ 欧州 ECMA 標準と日本 ARIB 標準の医療 BAN セキュリティの実証実験：国際標準 IEEE802.15.6 に準拠した医療用 BAN の試作および、マルチレイヤ統合最適化した BAN の試作を比較評価し、ETSI の欧州 ECMA 標準と日本の電波産業会 ARIB 標準として、IEEE802.15.6 に対して上位互換性のある適切な標準案の策定と EU と日本において同時並行で推進する。
- ⑥ 欧州 ECMA 標準と日本 ARIB 標準の医療 BAN セキュリティの薬事法治験と電波法技術基準適合証明：さらに、上位互換性のある標準案の薬事法に対する治験と電波法に対する技術基準適合証明を、フィンランド・オウル大学 CWC と横浜国立大学・CWC 日本が有する PMDA (医薬品医療機器総合機構) と NICT (情報通信研究機構) との連携を活用して、比較的短期間で実施する。

### H24年度：物理層から上位層セキュリティ要素技術の構築とマルチレイヤ統合最適化セキュアBANのセキュリティ開発、臨床研究と社会実験の実施、欧州標準化開始

本研究開発では、H24年度、物理層セキュリティ技術から MAC 層、ネットワーク層などの上位層セキュリティ要素技術の研究開発とそれらに跨がるマルチレイヤ統合最適化技術を研究開発した。その成果を国際標準規格 IEEE802.15.6 に対する Amendment とした医療 BAN に関する基本仕様策定と開発、および治験準備としての臨床試験、評価、および治験機器概要書を行うことを目標とした。

従来、血糖値や心電などの生体情報計測器は、データを装置取扱い者自らが管理する必要があったが、インパルス

UWBを用いた医療用BAN機器の製品化により、データを自動的にネットワークに接続し、さらに電子カルテとのインタフェースを標準化することで、情報共有を簡易化し、患者や病院スタッフらの負荷を飛躍的に軽減することを目指した。

無線技術としては、無線LANや携帯電話・PHSが代表的であるが、これら従来の無線通信装置は使用する電波の電力が10mW以上と大きく、病院内での機器への電磁波干渉やサイバー攻撃によるバイタル情報のダメージが懸念される。本事業で開発するインパルスUWBは、電波出力が0.01mW以下と大幅に低く、他の電子機器への影響は皆無と考えられる。また、超広帯域に拡散された周波数スペクトルにより、意図的な妨害電波などに対しても周波数ダイバーシティ効果に基づくAnti-Jamming機能が得られる。

また、従来の狭帯域な無線通信と比べ、インパルスUWBは3GHz以上の広い帯域を用いることで、病院内や一般屋内、あるいは人体上での利用において、反射の影響が少なく、安定した無線通信環境を確保できる。さらに、10GHz近くの高い無線周波数を用いるため、人体表面での電波減衰が大きく、人体への侵襲性もほとんど無視できる、といった利点を有する。

無線BANを身につけて、オフィス、家庭などのあらゆる環境における日常生活におけるユビキタス医療環境における心電図、SPO2などのバイタル情報を1日24時間センシングし、インスリンポンプなどを遠隔コントロールする社会人実験を、みなとみらい21地区の横浜三井ビルディングなどにおいて実施し、国際標準IEEE802.15.6に準拠した無線BANに、クロスレイヤのセキュリティ最適化を考案したマルチレイヤ最適化技術を実装したデペンダブルBANシステムの社会実験により、基本性能の確認を行った。

また、薬事法対応上のステップとしては、まず、医療用BAN機器を横浜市立大学附属病院内の実際の医療現場において臨床研究を実施し、評価や実証試験を行った。その際に、無線通信装置としての課題を抽出し、実用化に向けた改良、開発を行った。

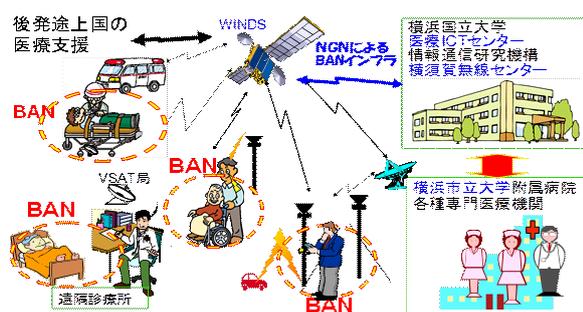


図1 無線BANによる医療ICTが開くデペンダブルユビキタス医療(BANと既存インフラの融合によるオフィス、家庭、病院環境などあらゆる環境におけるセキュアな医療センシング・コントロールの実現)

## 2.1 国際標準 IEEE802.15.6 に準拠した無線ボディアリア・ネットワーク(BAN)の実装と、セキュリティ・デペンダビリティを確保するマルチレイヤ最適化技術の研究開発

横浜国立大学は、これまでに横浜市立大学医学研究科、附属病院と連携し、グローバルCOEプログラム「情報通信による医工融合イノベーション創生」世界拠点において、

医療生体情報をICT技術で収集する先駆的研究が行われてきた。同拠点では、図1に示すように、BANをユビキタス医療ネットワークのコアと位置づけ、BANの要素技術であるUWB無線、デバイス、センサ、メカトロ、イメージングなどの基礎研究から、消費電力や計算処理能力に制限のある医療用BANに適した情報セキュリティ技術の研究開発と、臨床導入、グローバルビジネスに有効な国際標準化、UWB無線システムのための電波法技術基準策定、医事・薬事法に基づく治験などに、H20年度より既に多くの成果を上げてきた。

### (1) デペンダブル社会システムのためのセキュア無線BANの国際標準化活動

横浜国立大学は、図2に示すように、2007年よりボディアリアネットワーク(BAN)の国際標準化会議IEEE802.15.6において、我が国の特許技術を含む国際標準案を提案し、インパルスUWB無線変復調、ハイブリッドARQ誤り制御、CAP/CFPハイブリッドMACプロトコルなどを最終標準に採用することに成功した。その結果、2012年2月に標準化が完了するに至り、標準準拠のBANの量産化のために、モジュール、デバイスの開発と、臨床導入に必要な治験に向けた準備を整えてきた。IEEE802の国際標準化では、インターオペラビリティを達成するために最小限満たすべき物理層とMAC層の技術基準だけが標準化されており、BANの情報セキュリティは暗号化方式AESとCameriaの導入がオプションとして定められているだけである。

2012年2月の無線BANの国際標準化IEEE802.15.6の成功に続き、本事業では、物理層情報セキュリティ機能を有するUWB技術に、MAC層セキュアプロトコルやネットワーク層冗長ルーティングなどの上位層セキュリティ技術を用いたBAN医療機器を開発し、薬事認定を受けることは、本機器の国内ビジネス展開はもとよりワールドワイドにもビジネスを拡張する好機と捉え、フィンランド・オウル大学無線システム研究所CWCおよび、スイスCSEM(社)と連携して、日本-EU共同研究開発により、欧州ETSIにおけるe-Healthプロジェクトで協調している。さらに、横浜国立大学とオウル大学CWCおよびオウル大学が横浜に2012年3月に開設したCWC日本(株)が連携し、本事業代表者河野が、平成24年7月に米国サンディエゴで開催されたIEEE802.15 Plenary Meetingにおいて、制御通信遅延時間、誤り率や場所率(outage Probability)などの通信性能の平均値ではなく、最悪値を充分高信頼に保証することにより、医療に適したBANをその他の自動車内部のセンサ、アクチュエータ、コントローラのためのLife CriticalなMachine-to-Machine(M2M)の無線化に拡大する国際標準化活動をIEEE802.15 WNG(Wireless New Generation) Plenaryにおいて、新グループIG(Interest Group)の設立を提案した。

さらに、河野は、本事業に一環として、平成25年3月米国フロリダ・Orlandoで開催されたIEEE802.25 Plenaryにおいて、BAN国際標準IEEE802.15.6をさらにセキュアでデペンダブルにする改良(Amendment)を中心とするために、IGを開催し、IEEE802.15.6のAmendment 802.15.6aへの移行を提唱し、承認された。

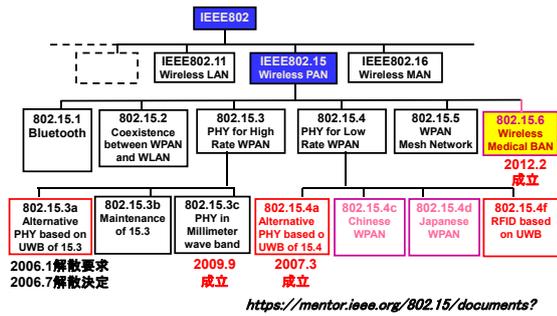


図2 無線ボディエリアネットワーク(BAN)の国際標準規格IEEE802.15.6 (H24年2月成立、H25年3月改良に関するAmendmentのIG/TG開始)

一方、フィンランド・オウル大学 CWC(Centre for Wireless Communications)は、第3世代携帯電話を世界で最初に NOKIA(社)と共に世界に発信した実績や、欧州 ECC の IST プロジェクトにおいて、MAGNET beyond、UBISENSE、などに中心的に参画し、UWB 無線分野では EUWB プロジェクトでUWB 伝搬測定、モデル化、物理層、MAC 層の最適化などに貢献してきた。ETSI の eHealth プロジェクトでは、スイスの CSEM と共に BAN の物理層変復調方式、ダイバーシティ方式、情報セキュリティ技術に関して中心的な役割を果たしてきた。CWC は、2008 年より医療への高信頼無線 ICT の導入プロジェクト WiMeC(Wireless Medical Communications)を実施しており、図3に示すように、EU を中心に日本、米国との連携により、医療 ICT 分野の標準化、法制化に貢献している。特に、2012 年 4 月に Academy of Finland による CoE(Center of Excellence)プログラムに申請し、WiMeC を発展させた WiDeCo(Wireless Dependable Communications for Medical and Health search)プロジェクトを開始している。オウル大学は、100% 出資して日本研究所として CWC 日本(株)を 2012 年 3 月に横浜に開設し、EU 日本との連携プロジェクトを中心に、Dependable 無線 ICT の研究開発、標準化、法制化、国際ビジネスをコーディネートを中心に EU-日本連携活動を行っている。本事業「国際標準準拠 UWB 無線を用いた BAN 医療機器の研究開発」はその中核に位置づけられ、横浜国立大学と共に事務局の役割を果たし、特に、図3に示すように、フィンランドの CWC と日本の CWC-Nippon が欧州と日本の連携事業をコーディネートし、欧州と日本の双方のプロジェクトを管理している。

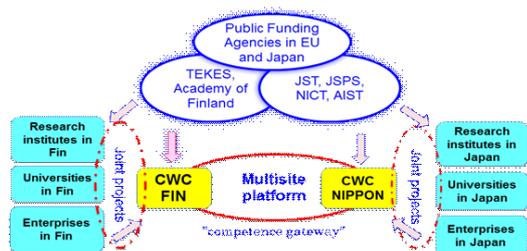


図3 フィンランド・オウル大学 CWC と CWC 日本が欧州と日本の間の本プロジェクト推進

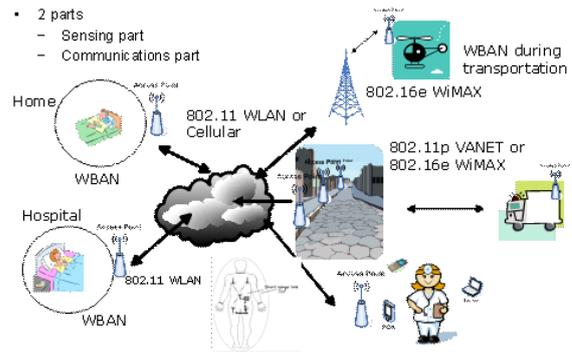


図4 無線 BAN と既存ネットワークによるデペンダブル医療ネットワーク(ETSI e-Health プロジェクト)

さらに、横浜国立大学と CWC 日本は、本事業の一環として、フィンランド・オウル大学 CWC とスイス CSEM(社)と共に、EU における ETSI の eHealth Project に続く、Smart BAN Project の開始を平成 24 年 12 月 Geneve で開催された ETSI eHealth Project に参加し、医療のみならず、医療に適応できるデペンダビリティとセキュリティを保証できるデペンダブル BAN の医療以外への応用(図5参照)へ発展させることを提案し、平成 25 年 3 月に Smart BAN プロジェクトの発足が承認された。これと連動して、BAN に基づくデペンダブル医療ネットワークの国内業事申請および国際的な電波法・薬事法に対する認証活動を行う。これと並行して、国内外の市場調査を実施し、臨床現場と市場要請に応じた仕様設定、製造コスト、製品価格を決定などの具体的なグローバルビジネスの創生をプロモートしている。



図5 医療用無線 BAN の医療以外のデペンダブル M2M 制御通信ネットワークへの応用(BAN of Things: 人体の BAN から物の BAN、車の Body などへ拡張的に応用)

## 2.2 無線ボディエリア・ネットワーク(BAN)のデペンダビリティ・セキュリティ化のためのマルチレイヤ垂直統合最適化技術に関する研究開発

ユビキタス医療の根幹をなすボディエリアネットワーク(BAN)の物理層から MAC 層、アプリケーション層にわたる要素技術を研究し、BAN のセキュリティとデペンダビリティを確保するために、図6に示すように、物理層、MAC 層および上位層のマルチレイヤ統合最適化技術の多様な研究開発を行った。

各レイヤにおけるセキュリティ技術について、実施した研究をまとめる。

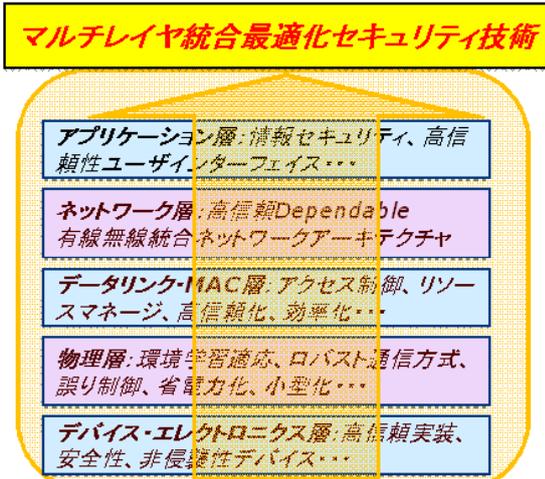


図6 デペンダブル無線 BAN のセキュリティ強化のためのクロスレイヤ・マルチレイヤ垂直統合最適化技術

- 1) 物理層セキュリティ技術として、UWB 無線やアレーアンテナなどによる耐干渉性、Anti-Jamming ならびに、通信路誤り制御符号の符号化・復号による誤り検出・訂正能力を利用した方式の考案と性能評価を実施した。
- 2) MAC 層セキュリティ技術として、種々のバイタル情報における医療上の重要度に応じた優先制御を導入して、アクセス制御するセキュア MAC プロトコルを考案した。
- 3) ネットワーク層セキュリティ技術として、サイバー攻撃に対して E2E のルーティングに組織的な冗長度を導入したロバストルーティングなどを考案と性能解析を行なった。
- 4) アプリケーション層セキュリティ技術として、BAN を構成するコーディネータと小型組込みノード (Embended node) の小計算容量や低消費電力などの制限や要求を満たすような軽いセキュリティ (暗号、認証) の考案と性能解析を行なった。
- 5) さらに、上記の各レイヤにおける情報セキュリティ技術の独立な最適化の従来からのパラダイムを超えて、物理層からアプリケーション層の複数間のクロスレイヤ・マルチレイヤの統合最適化設計という新たなパラダイムを拓き、そのためのデザイン規範、デザイン手順の構築を研究した。

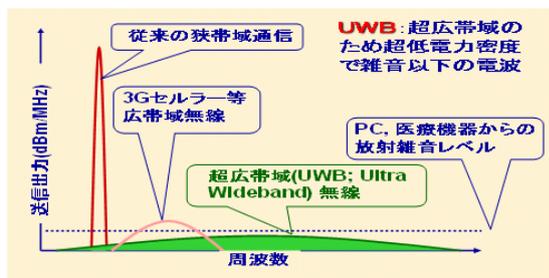


図7 超広帯域(UWB)無線と従来無線の電力スペクトル密度の比較

超広帯域(Ultra Wide Band:UWB)無線技術は、図7に示すように従来の無線に比べて遙かに超広帯域(500MHz以上、比帯域幅 20%以上)な無線電波を用いるため、電力スペクトル密度が極めて低く、PCや医療機器から放射される不要輻射電波よりも低密度であるために、人体近傍や

病院内の環境で人体に対する侵襲性がなく、医療機器に与える干渉もないばかりか、外部からの干渉、妨害にロバストな特長を持つ。この特長は、医療用ボディエリアネットワーク(BAN)が満たすべき、情報セキュリティ、信頼性などの Dependability を担保し、従来は人体や医療機器に対する電波干渉(EMC)を理由に医療現場への無線応用の制限を、UWB無線はブレイクする革新的な無線技術として期待されている。

しかし、実用化には多くの超えなければならないハードルがあり、技術的には超広帯域の信号生成、情報変復調方式、MAC 層のプロトコル、トポロジー、ネットワークアーキテクチャなどの要素技術、UWB 用の RF 回路、アンテナなど設計や制作、さらに最適設計のための伝搬測定やモデル化などの多数の課題があり、申請者たちは長年にわたり新規性の高い技術を研究開発してきた。法制度面でも従来からの電波法では規定が無く、1次利用システムとの共存を可能にする技術条件の策定や電波法改正などにも貢献してきた。また、実用化のために、十分大きな市場規模を開拓するための国際標準化 IEEE802.15.4a(低速UWB無線 PAN)や、IEEE802.15.6(無線 BAN)を、独自研究開発した特許技術をコアした標準成立に成功してきた。

特に、医療応用を前提にする場合、一般の無線応用とは異なり、医療機器として認定されるためには、薬事法に基づく治験を経て承認される必要がある。さらに、医療情報に関する情報セキュリティガイドラインについても承認が必要である。しかし、従来なかった UWB 無線による医療機器に対する技術条件も治験の手順もなく、それらの策定にも貢献する必要がある。すなわち、人体、医療機器に対する侵襲性、干渉を測定する方法、許容数値基準の研究から入り、客観的な安全性を合法的に保証する治験の手順も研究する必要がある。これは、技術に精通しつつ、医療分野の安全性を習得し、その合法性を保証する規制を科学する工学、医学、法学の Multidisciplinary な学問領域である規制科学(Regulatory Science)の研究教育にも貢献するものである。

社会的意義も大きく、UWB 無線技術を利用した UWB-BAN は、物理層情報セキュリティ性、信頼性の高い無線通信が実現でき、医療現場における機器の無線化を実現する。手術室での有線配線によるスパゲティ状態を改善し、事故や過誤の防止、医薬品や医療機器の在庫管理など、患者や医療従事者、病院などの医療機関、自治体などにおける問題の改善に有効である。

インパルス UWB は国際標準規格化されており、これに準拠することで普及促進が見込まれ、量産化も可能となり、コスト低減につながる。本事業の支援により、BAN 医療機器の薬事認定取得が図れると、電波法、薬事法ならびに、医療情報セキュリティガイドラインのすべてへの準拠を初めて実現でき、今後、これに続く医療無線機器の治験の効率化が容易になり、デバイスラグの解消につながる。さらに、BAN を利用したユビキタス医療ネットワークインフラストラクチャの構築の起点として、本事業の実施は極めて重要である。

以下では、本事業において達成した研究成果を取りまとめる。

#### (12-1) デペンダブル BAN の QoS レベルに応じた異なる要求条件を満たすハイブリッド MAC プロトコルにおけるスーパーフレーム内の CAP と CFP の割合の最適化の研究

本研究は、人体周辺の無線 BAN(Body Area Network)

の国際標準化 IEEE802.15.6 が対象とする医療用で優先される高信頼性、非医療用の高速性のような異なる複数の QoS の要請を満たすために、MAC 層において Contention Free 型と Contention Base 型プロトコルを組合せた Hybrid プロトコルにおけるフレーム内の両プロトコル区間の最適比率の導出とその算出に必要なトラフィック推定法を考案し、その性能解析をまとめたものである。

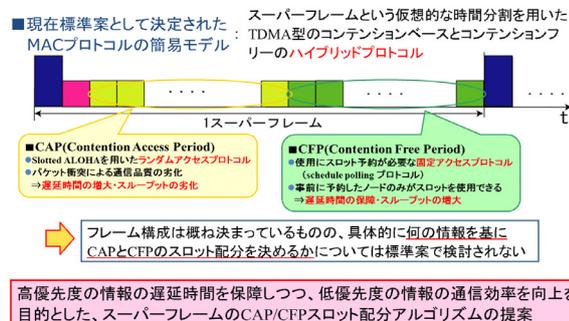


図 8 BAN の MAC プロトコルにおけるスーパーフレーム内の CAP と CFP のスロット比率最適化

BAN は緊急な医療情報から日常的な医療情報までそれぞれに求められる要求条件や QoS が異なり、これに応じて複数の優先度の情報が混在する複雑なネットワークである。特に緊急情報や医療情報は生命にかかわる情報であるため、確実かつ低遅延な伝送が求められる。その一方で動画や音声など大きな情報量を持つトラフィックも存在する。従って BAN の環境に応じた MAC プロトコルが必要不可欠である。本研究では、国際標準化ワーキンググループ IEEE802.15.6 で標準案とされる MAC プロトコルに着目し、7 段階に定義された優先度の異なる情報に対して最適な CAP (Contention Access Period)、CFP (Contention Free Period) スロット配分比率の決定法について提案する。提案法では先ず高優先度のトラフィックを推定し、優先的に CFP を割り当てる。その後 CAP の負荷具合を閾値とし、低優先度に割り当てられる CFP を導出する。この提案により、高優先度のパケットは高信頼低遅延で通信を行うことができ、低優先度のパケットは可能な限り CFP を使えるため、トータルの通信効率の向上を達成した。

本研究では、スーパーフレーム内における優先度の高い医療用パケットのための CAP (Contention Access Period) と非医療用 CFP (Contention Free Period) の割合をトラフィックに応じて、優先度ごとの遅延時間、スループットを考慮して最適化した。

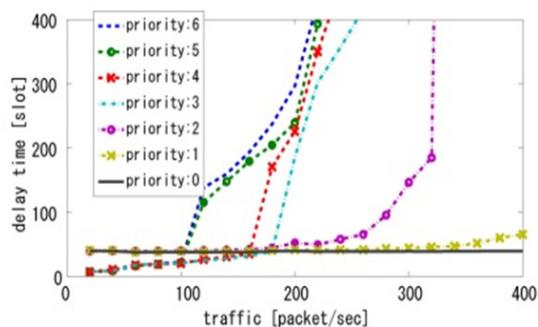


図 9 ハイブリッド CAP/CFP プロトコルのトラフィックに対する遅延時間特性

図 9 では、高優先度の遅延時間を保障でき、低優先度はランダムアクセスでの通信を余儀なくされ、遅延時間が発散している。

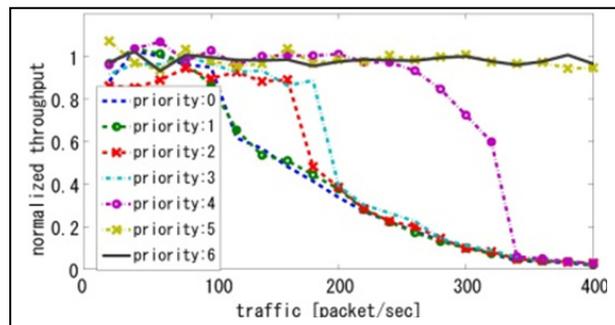


図 10 ハイブリッド CAP/CFP プロトコルのトラフィックに対するスループット特性 (正規化スループット = 正しく伝送されたパケット数 / 総送信パケット数)

図 10 では、高優先度は CFP で通信を行えているので、パケットのロスがほとんどなく正規化スループットは 1 付近に確保され、低優先度はランダムアクセスでの通信のため、正規化スループットはトラフィック増加とともに減少している。

本研究は、BAN における異なる QoS 要求を満たす MAC プロトコルであり、BAN のデペンダビリティ、セキュリティの高度化に有効な成果として、学会で発表され評価を得ている。

### (12-2) 無線 BAN に適した送受信情報伝送の一体化による通信プロトコル

近年、小型化・軽量化技術や無線通信技術が進み人体周辺の無線小型機器が急速に発展している。これらの技術的進歩によって、医療分野での利用が特に期待されており、高齢化や生活習慣病等のために体内もしくは体外に医療用無線機器を身につけた状態での生活が行われることが想定される。このような背景から人体周辺による無線通信 WBAN (Wireless Body Area networks) が研究されるようになり、これらの物理層技術及び MAC 層技術での研究の成果として 2012 年に IEEE802.15.6 という BAN のための標準規格が策定された。この IEEE802.15.6 による BAN は双方向での通信を行うことが可能であり、様々な情報を双方の機器に提供することができる。しかし、現在までの IEEE802.15.6 では通信スロットが別々に割り振られておりこの双方向による性能を十分に生かしきれていない。これはある一定の制約条件が満たされるような状況では、従来の方式では効率の低下が起きてしまうことから現手法では十分でないことが想定される。そこでこの条件下において、双方向通信における送受信の一体化を行うことを提案した。この手法はノードとコーディネータの保持するデータに対して相互的に送受信を行うものであり、送受信が頻繁に行われるノードに適応できると考えられる。さらに条件によって送受信の一体化に加えて ACK の省略とノードのグループ化という提案手法を加えることで通信遅延の更なる改善が行うことができる。CK の省略では一般的にノードとコーディネータからの送信への返答による ACK を代用・省略することで通信回数を 4 回から 2 回に減らすことができる。そして、ノードのグループ化では情報を収集するノードとそのデータを用いるノードを纏めてグループ化し、送受信を行わせることで纏めたグループ内の遅延を改善することが可能である。最後にシミュレーションを行うことによってこの提案手法が特

定の条件下において有効であることを示す。

通信全体としてみた場合の送信したデータ量と通信に要した時間の特性を図 11 に示す。図 11 にてグループ内での通信データが制御ノードに届くまでの必要な所要時間について示されている。

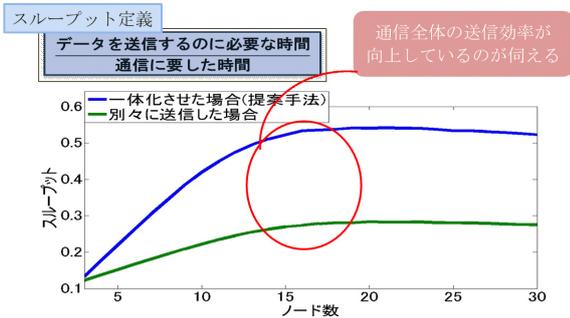


図 11 送受信情報伝送の一体化通信プロトコルのスループット特性、遅延時間特性

### (12-3) 医療機器高信頼制御のための通信に適したフレーム長可変 MAC プロトコル

本研究では、制御のための通信（制御通信）の無線化、特に、ロボットや無人台車などの制御や高度交通システム、ネットワークロボットの制御通信において、無線機器を多元接続するために不可欠なメディアアクセスコントロール制御(Media Access Control: MAC)プロトコルを考案し、性能解析を行った。

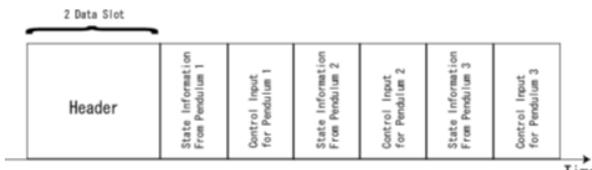


図 12 パケットフレームモデル

本研究では、医療用手術ロボットを制御対象とする場合に対応して、比較的動作を運動方程式で表現しやすい例として無線制御回転型倒立振子を用い、制御系の安定性を保つことができる高信頼な制御通信のための TDMA ベースとした MAC プロトコルの 3 種類を考案している。この制御対象はコントローラで生成された制御入力と制御対象で観測された状態量無線通信することでフィードバックループを形成して倒立振子が倒れないように制御するシステムである。

#### (1) 提案 1：通信路環境に応じた可変サンプリング周期 TDMA プロトコル

第 1 は、通信路の環境によって制御系のサンプリング周期を適応的に変更し、通信路の環境が悪く制御に必要な情報がロスしてしまう場合はサンプリング周期を上げて頻繁に送信するプロトコルである。この際、あまり頻繁に送信してもトラフィックを圧迫するため、通信路の環境が良い場合はサンプリング周期を下げ、トラフィックを低く抑えたままで振子の転倒確率を大きく改善することを示している。

#### (2) 提案 2：制御系のサンプリング周期を考慮した可変フレーム長 TDMA プロトコル

第 2 は、TDMA のタイムフレームを制御系のサンプリング周期を用いて決定し、制御系が次のサンプル点を迎える前に現在の情報を届けることができるように工夫したプロトコルである。本方式は、通信面からのアプローチとしてはこれが最良の特性を発揮することが示されている。

#### (3) 提案 3：データスロット割り当てアルゴリズム

第 3 のプロトコルは、データスロットに振子を割り当て、振子の状態に応じて優先度を付けてデータスロットを割り当てることにより、安定性の振子数に対するスケラビリティ向上を図るものである。これにより、振子の数が多く、高いトラフィック領域で特性改善が顕著であることが示されている。3 提案プロトコルは振子の転倒確率と  $L2$  ノルム、通信の遅延時間とその分散について計算機シミュレーションにより比較評価され、目的に応じて選択することがまとめられている。

以上のように、本研究は、回転倒立振子ばかりでなく多様な医療アクチュエーターを制御対象とした高信頼な制御通信に共通に活用できる MAC プロトコルとして広く応用できる成果として有効な成果を考案したものであり、学会発表などを通じて高い評価を得られている。

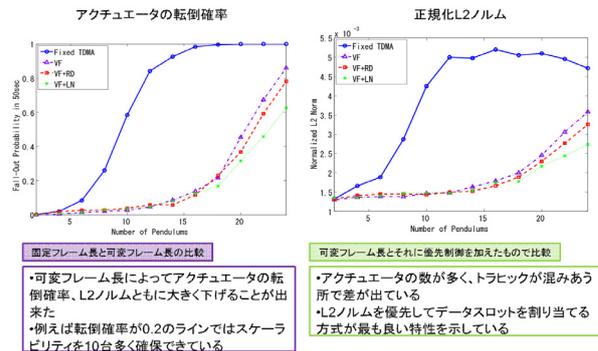


図 13 提案 MAC プロトコルの性能

#### (12-4) UWB 測位技術を用いたインプラントデバイスの位置推定

カプセル内視鏡をはじめとするインプラントデバイスの技術発展に伴い、そのデバイスを体内でコントロールする上で、正確な位置情報の取得が重要になる。特にドラッグデリバリーでは体内のナノサイズのロボットを遠隔操作するために位置情報が必須である。しかしながら、体内には脂肪や筋肉など電波の伝搬速度が異なる組織が存在し、自由空間中に比べ位置推定が非常に困難である。そこで、本研究では、分解能が高く高精度な測距が可能で UWB を用いて体内の伝搬速度の違いを考慮した位置推定方法を提案した。提案法では、CT や MRI などであらかじめ取得しておいた体内の断層画像を電波の伝搬速度推定、さらにマップマッチング法を用いた推定位置の補正により、高精度な測位が可能であることを示した。

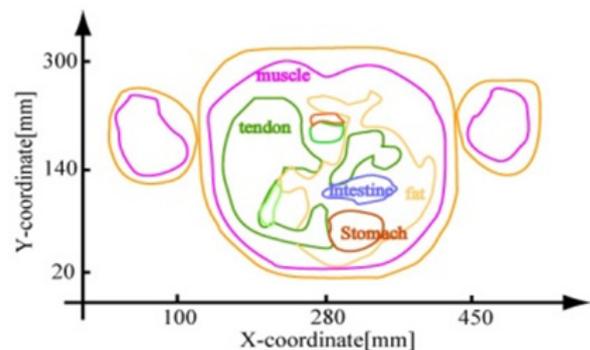


図 14 人体腹部の電波伝搬モデル

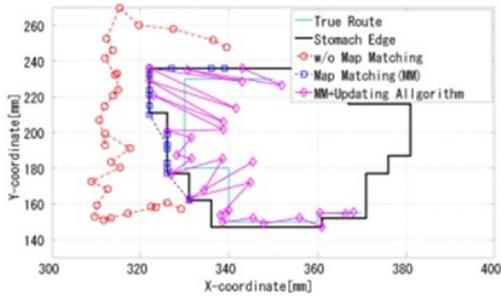


図 15 動的モデルにおけるトラッキング性能評価

本研究では、カプセル型内視鏡や血管カテーテルナビゲーションなどの医療用インプラントデバイスの無線制御に不可欠なデバイスの体内測位のために、MRI などの体内画像情報と UWB 通信測距を組み合わせた体内デバイスの測位方式を考案し、その考案とその性能解析を行った。本研究では、MRI、PET、CT による体内のスライス画像をもとに人体マップを作成し、臓器の複雑構造の境界を認識し、臓器ごとの比誘電率から伝搬速度、境界での反射、回折などを推定し、体内デバイスから発信した UWB 無線信号を複数の体外無線機で受信する電波測位をカーナビのように組合せて精度向上し、測位ノード選択により計算量と遅延を減少でき、動的環境に即したリアルタイム測位であり、体内ナビゲーションに適している。

### (12-5) UWB による NLOS 環境下でのデバイスのトラッキング

医療用ネットワークとして、デバイスの位置を推定することで、患者の行動調査や薬剤管理などに使われるシステムが注目されている。本研究では、TDOA ベースにした NLOS 環境下においても、より高精度な測位を可能とするアルゴリズムを提案する。位置推定精度を向上させるために、二つのアプローチを行う。一つ目として、全体の測距データより仮の位置を推定し、それを利用して大きな NLOS 遅延から段階的に補正しそれを繰り返す。二つ目として、ノードとタグの位置による幾何学的な影響により、真の位置から推定座標がシフトしてしまう問題を、各 NLOS 遅延補正をベクトル化し、それを補正することにより改善した。この検討をトラッキング実験により確認した。

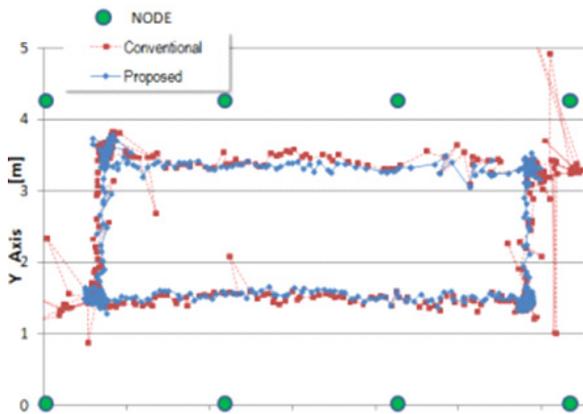


図 16 非見通し伝搬 (NO Line of Sight:NLOS)の影響の考慮した測位精度特性

### (12-6) 医療機器制御のための再送制限された HARQ 誤り制御法

生体情報などの医療用データの高信頼な伝送方法として BAN における HARQ による誤り制御法が注目されている。そこで、実際に取得された生体情報を用いてインスリンポンプなどの医療機器をフィードバック制御する場合に拡張し、リアルタイムな制御に対応できるような再送方式を提案した。HARQ では欠損データの再送が行われるが、医療機器をリアルタイムに制御する場合、再送データは制御系にとって、古いデータとなってしまう、むだ時間として扱われ、制御品質を劣化させてしまう。よって再送による制御品質の劣化を送信機側でシミュレートすることにより、再送データの制御系にとっての価値(右図の Value)がある一定量を下回る場合、再送せずに新しいパケットを送る。これにより、制御系の過渡応答時の再送遅延を減少させ、制御品質を向上させることができる。

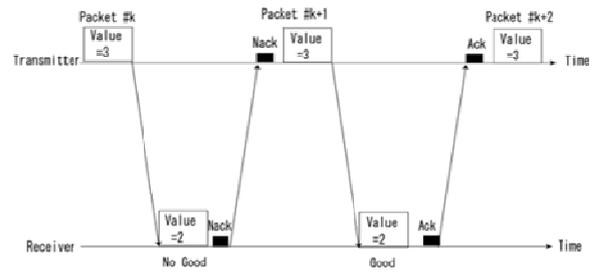


図 17 高信頼性無線フィードバック制御通信ネットワークのための安定性を考慮した HARQ 誤り制御法

本研究では、無線による制御のための通信(制御通信)において、有線に比べて雑音やフェージングの影響が強く、制御状態量などの情報が制御装置と制御対象の間で無線伝送において、制御通信の信頼性向上化のための HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest)誤り制御法を考案し、性能評価を行った。

本研究では、従来は制御を対象に設計されていない HARQ を無線制御通信に適用すると、パケットが持つ情報量はすべて同じであるという前提の下スループットが評価されているが、制御通信では制御系の過渡応答時に伝送されるパケットとそれ以外のパケットでは情報の価値は異なることに着目し、従来の誤り制御法を制御用に改良し、その符号化率や再送アルゴリズムを最適化する方式を考案している。

- 基本的には HARQ-CC と同様の伝送プロトコルで誤り制御を行う
- 提案方式 1: バックチャタリングにより、初期符号化率を制御系の安定性に応じて変える  
→制御系が不安定な場合ほど高い信頼性をもたせることができる
- 提案方式 2: NACK を受信した場合、予測制御を用いて、再送した場合の状態量と新しいパケットを送信した場合の状態量の期待値の比較を行う  
→制御品質劣化を招く再送を制限することができる

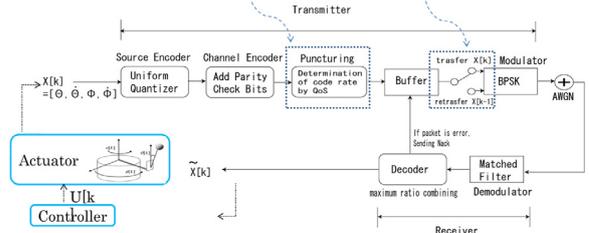


図 18 高信頼性無線制御通信ネットワークのための安定性を考慮した HARQ 誤り制御法のシステム

本論文では、高信頼な通信を実現するための手法として、誤り訂正符号の付加とパケットの再送の両方で誤り保護を行う Type-I-HARQ を無線フィードバック制御システム内の制御状態量の伝送に適用させ、制御系の安定性を考慮した二つの方式を提案している。第1の提案方式は、伝送される制御状態量から制御システムの安定性を判断し、それに応じて HARQ の初期符号化率を変える方式である。これにより、通信環境が悪く、パケット誤りによって制御システムが不安定になるときは、より符号化率が低い符号で誤り訂正でき、制御系の安定性を維持できる。また、通信環境が良く、制御システムが安定な場合には、符号化率を高くでき、符号化による伝送速度の低下を抑え、制御品質の向上できることを示している。第2の提案方式は、パケット誤りが起きた時に、新しいパケットを送る場合と誤りパケットを再送する場合における制御系の状態量の期待値を計算し、それに応じて再送を制限する方式である。これにより、制御系の状態量の変化が速いところでは、再送を制限することができ、従来法よりも制御品質を向上できることが示されている。

したがって、本研究は、医療 BAN を今後無線化が進む機械間 (Machine-to-Machine: M2M) の制御通信の高信頼化に共通に活用できる誤り制御技術として広く応用できる。

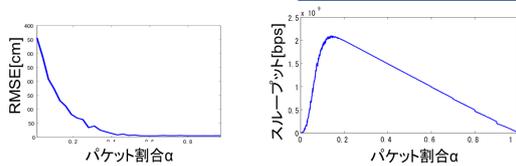
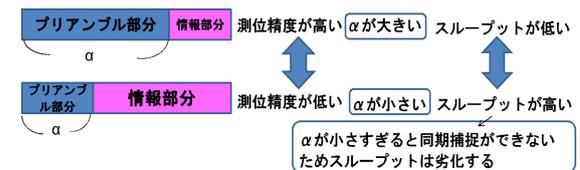
### (12-7) 医療用ロボットのための位置推定と情報通信を同時に行う WBAN パケット構成

本研究では、超広帯域 (Ultra Wide Band: UWB) 無線技術に固有なインパルス無線 (Impulse Radio: IR) による通信と測位を同時に実現する能力を活かし、パケットを構成する制御測位用プリアンブル部と情報通信用ペイロード部を有効に組み合わせ、ペイロード部の移動ロボットに搭載したカメラ画像情報を測位に応用し、パケット構成やサンプリングレートを移動に応じて適応的に制御し、通信と測位ナビゲーションの両立を高効率かつ高精度で実現する方式の考案し、その性能を解析した。

無線 BAN の重要な応用分野のひとつとして、医療用機器やロボットの制御があげられる。医療用ロボットの導入により、医療現場での医師等の負担が大きく軽減されることが期待できる。医療用ロボットが効率よくかつ安全に稼動するためには、周囲の環境変化やロボットの位置を正確に認識することが必要である。UWB を用いた正確な測位と高速な通信を同時におこない、医療用ロボットの安定した制御を実現するためのパケット構成方法について考察した。結果として、測位頻度を極力抑えつつスループットを最大化するパケット構成アルゴリズムを考案し、ロボットの安定制御と高いスループットの両方を実現できることを示した。

・プリアンブル部分 → パケットの同期捕捉に用いられる

$\alpha$ ・・・プリアンブル部分の割合



パケット内のプリアンブル部分の割合を固定した場合で考えると

- ・移動ロボットから送信される情報は、一番近いノードで復調することを想定している
- ・通信環境が悪いと同期捕捉ができなくなり、スループットが低下する
- ・通信環境が良いと過剰なプリアンブル部分によって、スループットが増加しない

・通信環境によって最適な  $\alpha$  が変化する

スループットを最適化するために測位情報から基準ノードと移動ロボットの距離を算出し、算出した距離情報を用いて  $\alpha$  を適応的に変化させる

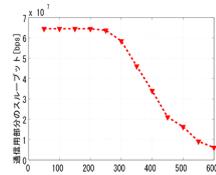


図 19 パケット内のプリアンブル部分の割合可変アルゴリズム

本研究では、室内環境で経路内に直線とカーブが混在しているものを移動ロボットの経路モデルとし、第1に、経路によって測位頻度が経路誤差に影響を与えることから、移動ロボットに搭載されているカメラから得られる画像情報を用いて測位頻度を適応制御する方法を提案している。無線方式は DS-UWB (Direct Sequence - UWB) を用い、パケットのペイロード部分で運ばれる画像などのセンサ情報を利用して経路の曲率を判定し、推定した位置情報を加重平均し経路推定精度を向上させている。推定経路から曲率を計算し、画像より推定した曲率と比較し、測位パケット頻度を適応的に変更し、経路の推定精度の向上を図る。また、パケット長とパケットレートは一定とし、測位以外のタイミングにパケットを送信する場合は、ペイロード部分を最適な割合にする。第2に、推定した位置情報から基準とする固定ノードまでの距離が算出し、距離とスループットを最大にするプリアンブルの割合の最適値を事前に計算しておき、状況に応じて最適なプリアンブルの割合を切り替える方法を考案している。同期捕捉確率を用いてスループットを最大とする理論式を導出し、計算機シミュレーション結果と一致することを示している。この二つの提案方式により、経路誤差の平均を 15 センチメートル以下に抑えることができ、スループットの改善もできることなどを明らかにしている。

以上のように、本研究は、原発や無医村などで無人遠隔制御移動ロボットなどに必要な通信と測位ナビゲーションを同時に高効率かつ高精度で制御する多くの応用に活用できる成果として有効な成果を理論的に導出したものであり、学会発表などを通じて高い評価を得られている。

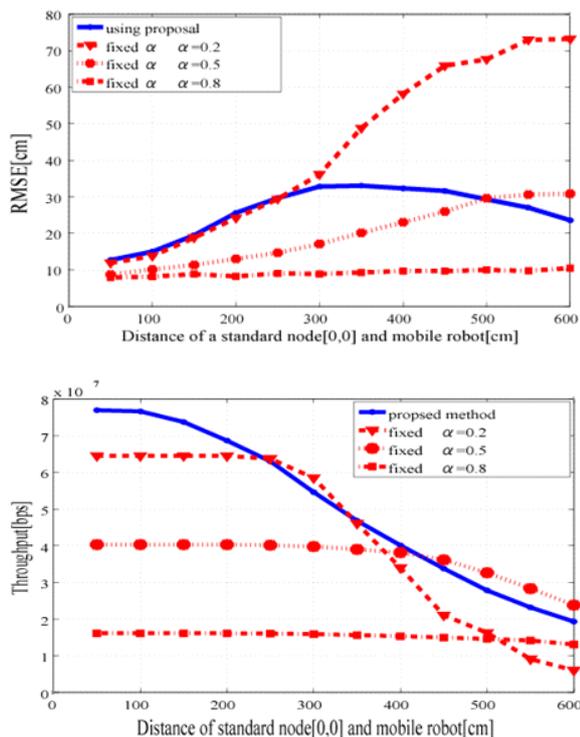


図 20 パケット内プリアンブル割合可変アルゴリズムの測位精度と通信パケットスループットのトレードオフ

### (12-8) 複数医療用機器の協調動作のためのダイバーシチ利得による高信頼無線制御

医療現場では、多くの医療用機器、ロボットの導入が考えられている。それらの機器は、従来は有線で制御されていたが今後は機器の移動に対して柔軟である無線による制御が期待されている。また、単体での動作だけでなく、複数の機器、ロボットが協調して動作することも大いに考えられる。複数の機器を同時にかつ高い信頼性で無線制御をおこなうために、無線通信の送受信で複数アンテナを用いることで利得を得るダイバーシチ技術の考え方を導入し、制御品質をたもつことを目指した。機器が単体の場合、あるいは複数の機器が協調せずに制御された場合に比べて、機器同士が協調して制御されている場合には誤差が少なく、有効な制御が可能であることを示した。

本研究では、制御のための通信（制御通信）の無線化、特に、複数のロボットなどの制御機器が協調して同時に動作する複数機器の協調動作の無線制御における信頼性を向上するために機器の重要度に応じて通信の割り当てを適応的に変更し、ダイバーシチ利得を得る制御通信ネットワークを考案し、性能解析などを行った。

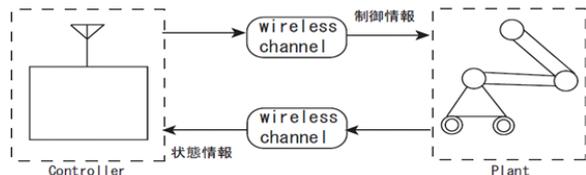
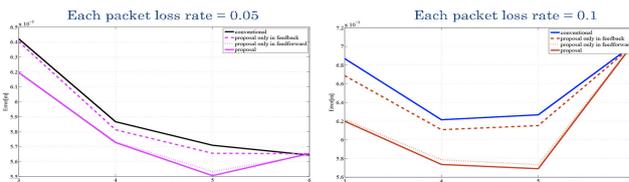


図 21 外科用ロボットのような複数アクチュエータの遠隔無線制御モデル

本研究では、無線制御で複数の機器を協調動作させる際、制御状態がよくない機器が存在する場合や、複数の機器の中でも負荷が大きいため無線通信による誤りの影響が大

きいことが想定される機器が存在する場合、さらに無線通信による情報送信の必要性の少ない機器が存在する場合などに対して、機器の重要度に応じて通信の割り当てを適応的に変化させる制御通信ネットワークを提案している。すなわち、制御通信におけるフィードフォワード通信とフィードバック通信の特性を考慮した通信割り当てを行い、各機器の同期特性を向上させることにより、一つの機器だけ大幅に誤ることを抑制し、全体として複数の機器の協調動作を安定させることができることを示している。コントローラとプラントの複数機器の無線制御において、コントローラとプラント間の無線通信環境の状態が悪い場合、コントローラとプラント間の通信のみでなく、プラント間の通信も活用することで、ダイバーシチ効果を活用して、無線通信路のシャドイングや距離減衰による誤りを改善し、高信頼制御を実現できることを示している。特に、複数の2リンクアームの協調動作を例として、提案無線制御ネットワークの性能解析を行い、従来よりも複数機器の協調動作を安定制御できることを示している。

以上のように、本研究は、複数体内外ロボットの協調運動などの無線遠隔制御通信などの広範囲な高度の制御対象の高信頼な制御通信に共通に活用できる無線フィードバック制御ネットワークとして広く応用できる成果として有効な成果を考案したものであり、学会発表などを通じて高い評価を得ている。



- ✓ 提案方式は従来方式よりも協調動作特性が良い。
- ✓ 提案（フィードバック通信のみ）よりも提案（フィードフォワード通信のみ）の方が特性が良い。
- ✓ パケットロス率が0.1の時は曲線がバズ型になっている。通信の回数が制限されているため、通信路の影響が出たためである。

図22 提案制御通信型アルゴリズムの制御誤差特性

### (12-9) バイタル情報センシングのための無線ボディエリアネットワーク

UWBは国内電波法の規制により、室内使用、コーディネータはAC 100V電源に連結することに制限されているので、社会実証実験は病院のベッド周辺、家庭内のベッド、トイレで実施した。日本GIT社、NICTと共同開発したIEEE15.6に準拠したハイバンドUWBプロトコルを用いて被験者のベッド上での動きも考慮した実験を行った。LOSの位置ではセンサーノードとコーディネータ間距離が3.5mまでは通信可能で、天井付近にコーディネータ設置でパケットロスなく、心電、加速度、温度、SpO2の4センサーノードからのリアルタイムな通信可能であったが、最大の問題は被験者がベッド上で姿勢を変更し、センサーノードを体で被覆した場合は(Shadowing)通信が不能になる問題が判明した。ベッド下にはマット層、その下の支え台にある通気孔を通して、電波の通過を確認し、ベッド下の床にもう1台のコーディネータ設置で被験者がうつぶせになり、センサーノードを被覆した場合も通信可能を確認した。

この現象を人体によるshadowingモデルを用いて説明した。更に、コーディネータ側のアンテナをバイコンカルアンテナから、指向性の強いバイコンカルアンテナに変更し、アンテナをセンサーノード方向に向けることで、セン

サーノードのアンテナ方向のラチチュードが広がり、より Robust な通信が可能で、シミュレーション結果でも確認された。今後はセンサーノードをより小型にし、病院内での実証実験を拡大し、Office ビル室内での健康管理などに社会実証実験を拡大する。



図 23 BAN コーディネータに接続されたバイタル情報（心電図,SPO2,体温等）表示系

**(12-10) 無線BANのためのQoSを考慮した誤り制御方式**

近年、通信技術と医療分野を融合させた研究が注目を集めており、その一つとして Wireless Body Area Network (WBAN) が注目されている。WBAN の国際標準規格の1つに IEEE802.15.6 があり、取り扱うデータを user priority によって7段階の優先度を設定することが可能になっている。ただし、これらの優先度に応じた具体的な実現手段は実装依存で、本研究の対象としている UWB システムでは、規格上は物理層では(default mode と high QoS mode) 二つのモードが定められているだけである。本研究では、user Priority による優先度に合わせた QoS 実現手法の検討を行い、シミュレーションによる評価を行った。具体的には Default mode においても Hybrid ARQ を適用し、user priority 毎に ARQ や FEC 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。

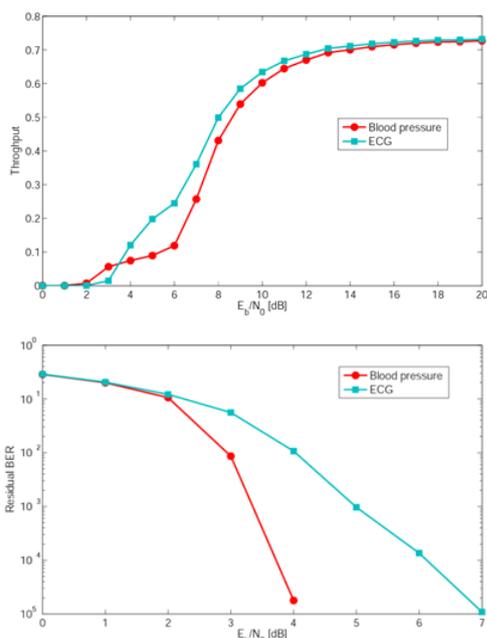


図 24 Hybrid ARQ によるデペンダブル BAN の SNR 対スループット（上図）と残留誤り率（下図）

**(12-11) バイタルデータを用いた心地よさの推定による個別空調制御**

人の存在を感知して快適性の向上や省エネを図る空調制御システムの開発が進められている。心地良く感じる温度・湿度等の環境条件は各個人の状態によって異なるため、快適性の向上を図るためには、個々人の状態に応じて空調を制御することが必要である。本論文では、個人のバイタルデータを基に心地よさを推定し、その状態に基づいて最適に環境を制御するための方法を提案する。心地よさは、複数の因子が組み合わさって感じられる状態であり、因子により生体への影響は異なるため、バイタルデータと心地よさの関係を定式化するためには多くのパラメータが必要と考えられる。ここでは、バイタルデータの中で簡易に計測可能である皮膚表面温度を使用し、温熱環境における個人の心地よさとの因果関係を状態推定モデルを用いて確率的に表した。バイタルデータと心地よさの関係は確率パラメータで単純化し、リアルタイムな推定ができるよう、隠れマルコフモデル(HMM)を採用した。さらに、温度や湿度に対する状態を考慮するため階層型の HMM とした。この状態推定モデルにより、高い精度で個別の心地よさを推定することができ、これを学習データとして個人に対応した空調制御が可能であることを示した。

**(12-12) 非常時用アドホックネットワークにおける輻輳問題と消費電力を考慮したルーティングに関する検討**

既存のインフラに依存しないアドホックネットワークが注目されている。アドホックネットワークの用途の一つとして、大規模災害発生時等の非常時における通信が考えられている。ここで非常時においても十分な QoS を保証することが課題の一つとして挙げられる。本研究では、非常時におけるネットワークを想定し、医療情報、被害状況などの緊急データの通信発呼が多発し、通信経路において一つのあて先に通信が集中することで通常行えるはずの通信ができなくなる輻輳問題を踏まえた、非常時用のルーティングについて評価と検討を行っている。提案方式では、通信データにそれぞれ優先度を設け、輻輳発生時には低優先度のデータが迂回経路を用いることでデータ全体の遅延時間を低減することができる。また通常経路、迂回経路ともに経路構築の際に以下のノード残存電力を考慮することで、ノードの消費電力を分散させネットワークの長寿命化を図ることができる。

**(12-13) 生体組織の温度上昇を考慮に入れた生体インプラント機器の位置推定法**

近年、医療分野においてカプセル内視鏡やペースメーカーなどの医療専用のインプラント機器が用いられている。インプラント機器の利用は人体の健康状態の確認、さらには治療を行うことを可能とする。これらを実現するためにはインプラント機器と体外機器との無線情報通信が不可欠である。そして、カプセル内視鏡で得た体内画像への位置情報の付加さらにはインプラント機器の制御のための位置情報の利用など様々な面でインプラント機器の正確な位置情報が必要となる。一方で、熱影響について考える必要がある。生体内のインプラント機器と通信を行う場合、電磁波の曝露による発熱とインプラント機器自身の回路熱による発熱が存在するため、インプラント機器付近の温度の上昇が危惧される。人体の生体組織は平常時は 37℃され、45℃を越えると悪影響を及ぼす。そこで、生体組織の温度を制約条件とし、測位誤差を最小にする測位方式の研究を行っている。

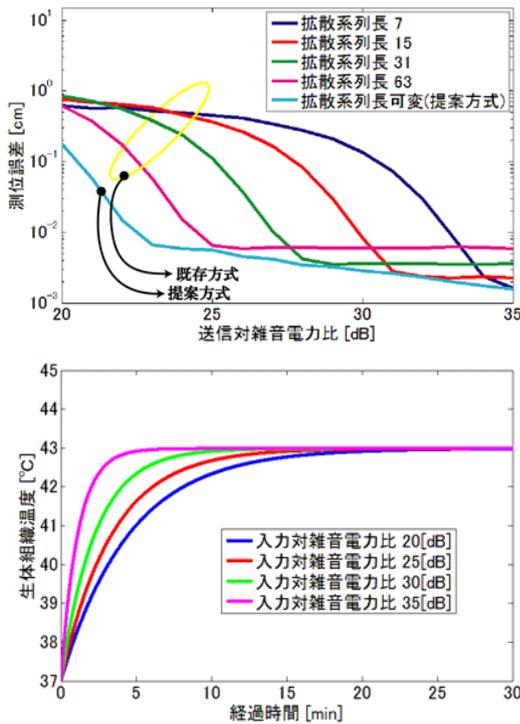


図 25 考案した生体インプラント機器位置推定法の測位精度（上図）と生体組織の温度上昇（下図）

### 12.3 BANの国際標準規格 IEEE802.15.6 に準拠した物理層の RF 送受信回路開発、ベースバンド処理回路開発

#### A. RF送受信回路開発

下記、概略仕様を策定し、その後、詳細回路設計、シミュレーション検証、レイアウト設計および試作を実施した。

##### 概略仕様

- 医療ICT用として低消費電力を実現するため、半導体テクノロジーは0.13umのSiGe（シリコン・ゲルマニウム）を採用。
- インパルス方式UWBのワンチップRF送受信機とする。
- ベースバンド回路にて受信強度モニター可能にするためのアナログ出力端子を設ける。
- 小型化を可能にするためRFモジュール基板への実装はフリップチップ実装とする。
- インパルス方式UWBの特性を最大限発揮するため回路方式は極力簡素化し商用利用可能なチップコストを実現する。

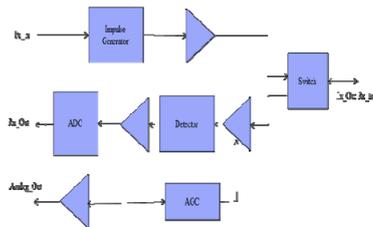
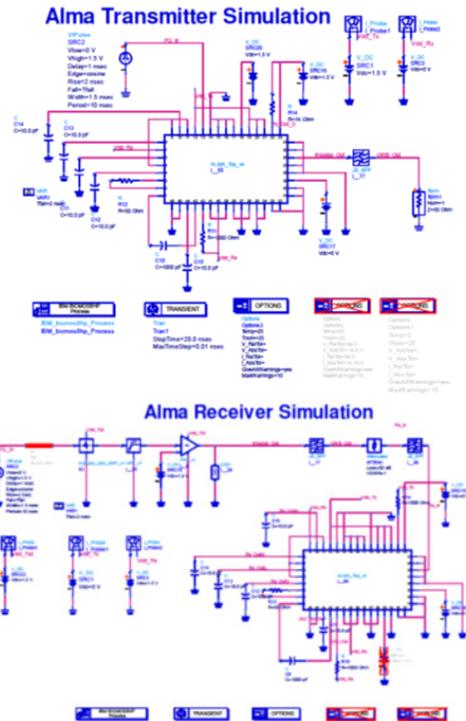
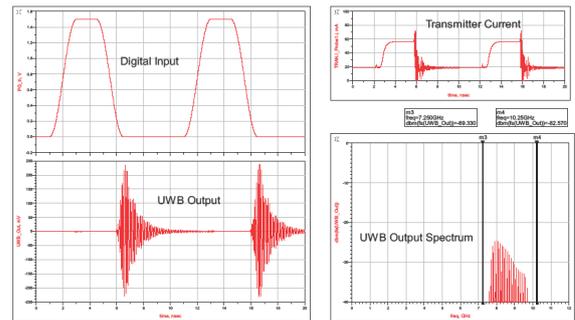


図 26 RF 送受信回路ブロック図



#### Alma Transmitter Simulation



#### Alma Receiver Simulation

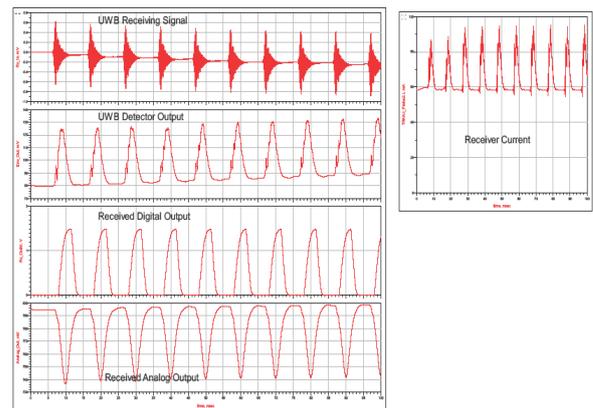


図 27 RF 送受信回路シミュレーション結果

#### B. ベースバンド処理回路開発

要求仕様に関して横浜国立大学と日本ジ・アイ・ティーにて共同で策定し、その後、詳細設計および試作を実施した。

**概略仕様**

- 通信方式はインパルスUWBハイバンドを用いた無線通信方式とする。
- 通信装置はHUBとNODEから構成する。
- HUBの概略寸法 幅80 x高さ35 x奥行き125 mm (アンテナ含まず)。
- HUBの動作電源はUSB供給もしくはACアダプターで5V1A程度。
- HUBの外部インターフェースはUSB。
- HUB側アンテナは切り替え式で3本に拡張する。
- NODEは小型の身体装着型とする。
- NODEの概略寸法 幅45 x高さ25 x奥行き90 mm (アンテナ含まず)。
- NODEの動作電源はリチウム2次電池。充電は5VのACアダプター。

**HUBブロック図**

- HUB通信モジュールの仕様
  - ・MPUはPIC32MX795F512L
  - ・ROM 512KB、RAM 128KB
  - ・FPGAはXC6SLX9
- HUB通信モジュールの機能の強化 (従来版からの機能強化)
  - ・MPUのRAMの拡張
  - ・FPGAの性能向上。
  - ・受信アナログコンパレータを追加
  - ・ダイバーシティ機能のための切り替えスイッチ式3本アンテナ構造とする。

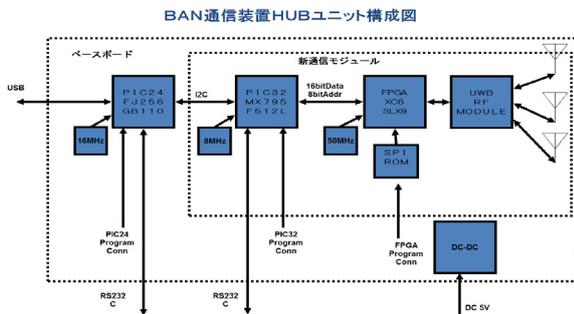
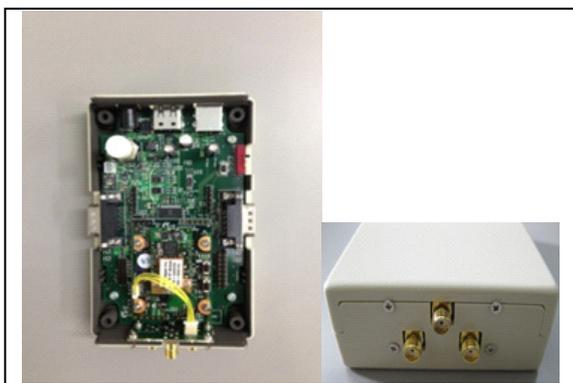


図 28 HUB回路ブロック図

**HUB内部構造と外部構造**



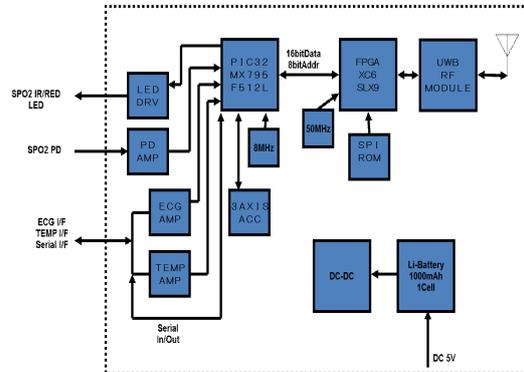
**NODEブロック図**

- NODE通信モジュールの仕様
  - ・従来版から更なる小型化を実現する (従来版の

約1/3)。

- ・4種類のセンサーに対応する。
- ・MPUはPIC32MX795F512L
- ・ROM 512KB、RAM 128KB
- ・FPGAはXC6SLX9
- ・リチウム2次電池によるバッテリー動作

**BAN通信装置NODEユニット構成図**



- NODE通信モジュールの機能の強化。(従来版からの機能強化)
  - ・MPUのRAMの拡張
  - ・FPGAの性能向上
  - ・受信アナログコンパレータの追加

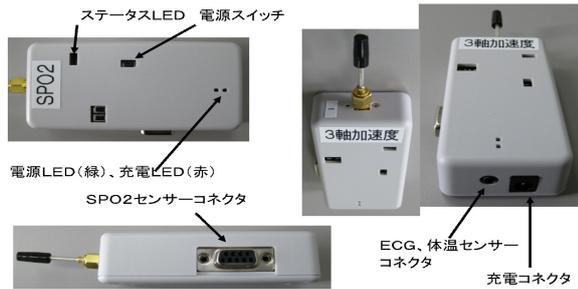
**NODE内部構造と外部胸像**



**概略仕様**

- センサーインターフェースはECG、体温、3軸加速度、SPO2の4種類とする。
- ECGおよび体温はそれぞれ専用NODEユニットでのみでの使用とする。
- 3軸加速度およびSPO2はどのNODEユニットでも使用可能とする。

## センサー接続部外観



## C. 高感度アンテナ開発

要求仕様に関して横浜国立大学と共同で策定し、その後、詳細設計および試作を実施した。

### 概略仕様

- HUB側アンテナはヘリカルアンテナとする(従来版はバイコンカルアンテナ)。
- HUB側はダイバーシティ機能用切替スイッチ式3本アンテナ構造とする。
- NODE側はハイバンド用バイコンカルアンテナとする。

### アンテナ接続部



### ヘリカルアンテナおよびバイコンカルアンテナ



## 12.4 無線ボディアエリア・ネットワーク(BAN)システムの社会実証実験

### (1) 社会実験の目的・背景

人間のバイタル情報は日々、刻々と変化するものであるため、その情報を迅速に医療機関に送り、健康状態を管理していくことが、医療処置や健康管理に非常に重要なことである。遠く離れた島や災害地などの貧弱な医療状況を援助する遠隔医療にも信頼性ある、頼りになるネットワークが必要である。これを実施のための第一歩として無線ボディアエリア・ネットワークシステムの社会実証実験を先行する必要がある。

- IEEE802.15.6 に準拠していることを確認

- ビット誤り率及び通信路容量の解析、理論値と実験値の比較
- センサーを实际身体に装着時、動作の潤滑さの調査
- BANのセンサー及び既存の無線機器がお互いの干渉の検査
- 院内での従来の検査結果との比較及び医療無線機器への影響の確認
- 院内測定及び遠隔測定の遅延及び誤りの検査

### (2) 社会実験の概要と実施担当者

本社会実験では前項の目的・目標に記載した研究項目を研究期間中に実施する。1つのコーディネータ(HUB)にスタートポロジーで無線接続された複数のノードに各種バイタルセンサまたは制御対象のアクチュエータから構成されるピコネット一式としてBANセットとする構成が、30セット準備し、15名の被験者(横浜国立大学河野研究室、杉本研究室のメンバー)に1セットまたは2セットを1名に装着し、

環境1: みなとみらい21地区の横浜三井ビルディング15階における、オフィス、展示場、センター長室、廊下、トイレ、エレベーターなど

環境2: 横浜市立大学福浦附属病院における、病室、ベッドサイド、廊下など

における静的、動的環境において社会実験を実施した。

バイタル情報を無線BANを介して医療機関へ届けることを一般家庭及び病院での実証実験を行い、既存無線機器からの影響、医療無線機器への影響を検討し、従来の測定法と比べ、WBANネットワークシステムの実用性のための基本データの収集と解析を行った。

実施期間: 2013年3月25日~3月29日

実施場所: みなとみらい横浜 横浜三井ビルディング15階、横浜市立大学福浦附属病院

### 12.3.1 システムの構成

本システムの構成は図29に示し、以下に説明する。

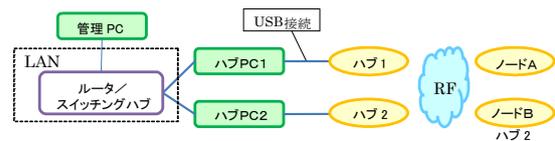


図29 UWB-BANシステムの構成

- ① センサー: 体温、心電図、三軸、SpO2の4種類をセンサーを用いて実験を行った。各センサーが無線でハブに生体情報を送り、またハブから制御データを受信する。
- ② ハブ: センサーから生体情報を受信し、それをハブPCに有線で送る。またハブPCから制御データを受信し、センサーに転送する。
- ③ ハブPC: ハブ機からUSBを介してデータを読み込み、そのデータをLANにて管理PCに送信する。また、管理PCからLANを介して送信されたデータを、USBにてハブ機に送信する。
- ④ 管理PC: ハブPCから送られてきたデータを集約し、そのデータをグラフィカルに表示する。また、CSMA比率やスロット長の変更などのコマンドをハブPCに送信できる。

センサー及びハブのデータ：



(a) センサ・アクチュエータ用ノード



(b) BAN 制御用コーディネータ

図 30 UWB-BAN システム (ノード:各種センサと接続、コーディネータ:外部ネットとの接続 HUB)

表 2 センサーノードサイズ

センサーノード	
縦	4 . 5 cm
横	8 . 8 cm
高さ	2 . 5 cm

表 3 コーディネータ (HUB)サイズ

縦	8 cm
横	1 2 . 5 cm
高さ	3 . 2 cm

### 12.3.2 人体モデルのデータ

今回、5名の被験者を用いて測定を行った。被験者のデータを表1に示す。

表 1 被験者のデータ

被験者	身長	体重	胸囲	ウエスト	性別
被験者 1	188	98	92	98	男
被験者 2	160	60	96	90	女
被験者 3	170	63	87	83	男
被験者 4	172	64	87	97	女
被験者 5	160	55	93	83	女

	トイレ個室	エレベーター内
縦	1 . 6 m	1 . 6 m
横	1 . 2 m	2 . 1 m
高さ	2 . 5 m	2 . 7 m

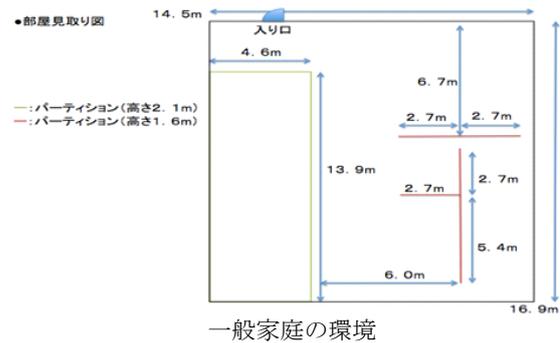
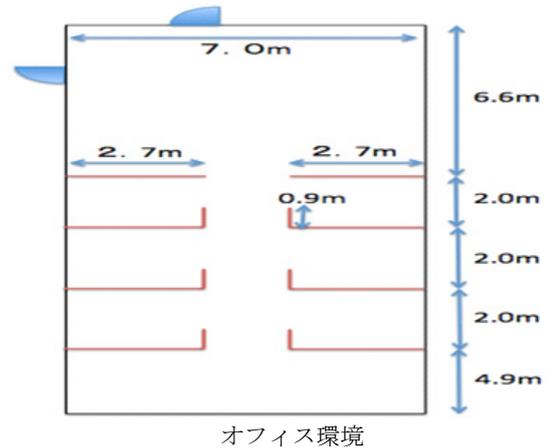


図 31 実験フィールドの環境情報

### ② センサー及びハブの位置：

各被験者に4個のセンサー及び1個のハブを身体につけ、実験場内にて以下③の実験動作に従い、動き回る。図32のA、B、C、D、Eに示すように、センサーは腰回り、手、太股、胸につけ、またハブはセンサーから受信できるように取り付ける。

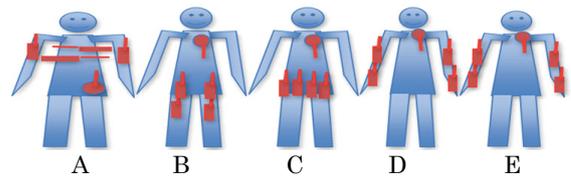


図 32 センサー及びハブの取付位置

### ③ 被験者の動作：

立位静止状態、それぞれ実験場内での徒歩、立ち座りの繰り返し動作の3つの動作にて測定を行った。

#### 実験結果：

手につけているセンサーを観測

立位静止状態から歩き出すと、徒歩するときスループットに振動があった。

立位静止状態から立ち座りの繰り返しの時も変動があったが、徒歩の時と比べると変動周期が荒い。

立位静止状態の時と比べ、徒歩の時の方がスループットの変動が少ない。理由として考えられるのは徒歩の時、足が前に出しているので胸につけているハブがセンサーから受信しやすくなる。

立ち座りの繰り返し：変動が激しくなっている。原因としては座るときにセンサーとハブのアンテナの指向性がずれてしまい、ハブの受信がうまくできなくなる。

試験者 5 (女性)

二の腕につけたセンサーの観測 (ハブは腰あたりにつけた)

立位静止状態も、徒歩も、立ち座りも変動が見られた。これは女性の体の構成が原因だと考えられる。

センサーが胸につけ、ハブはセンサーの少し下につけた時、歩き出したり、座ったりしたり、体を動かしたときには変動が見られたが、静止状態の時は安定でした。



病室は主に2種類に分かれる、一つは一般病室で、数台のベッドがおけて、広い部屋に対して、もう一つは個室で、ヘッドは一つだけで、一般病室と比べると狭い部屋である。一般病室で実験をした時、身体の遮断等によってハブの受信状況は少しの変動があったが、個室では安定した受信が実行できた。原因としては UWB の伝搬損失が大きく、近距離の通信に向いているので、広い部屋ではハブがセンサーから直接はしか届かないのに対して、狭い部屋では反射波もハブに届くので、狭い部屋の方が安定した受信ができると思われる。

一般病室及び個室のレイアウトは以下となる。

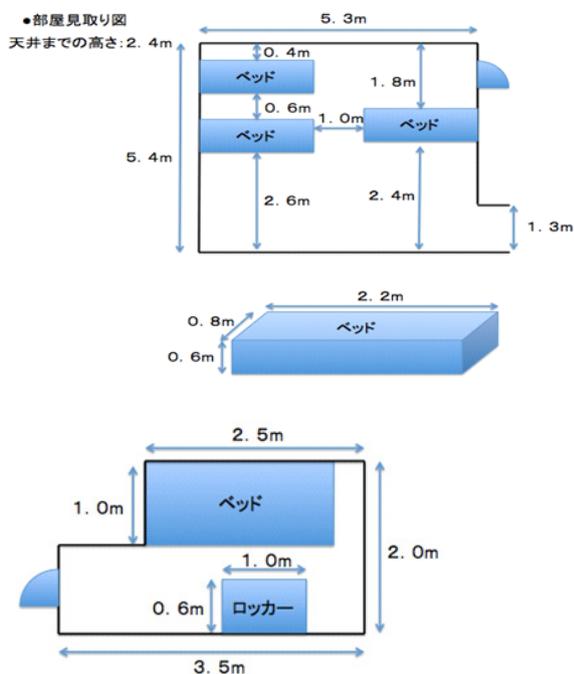


図 33 臨床実験を行なった病室のレイアウト

病院の既存無線機器とお互いの干渉確認実験を行った。既存無線機器として以下の3種類を用いて実験を行った。ベッドサイドモニター (心電、血圧、SpO2) 中心周波数 428MHz (日本光電製)

指輪式パルスオキシメータ： 通信方式、医療用テレメータ 2.48GHz (通信方式 FID) アドバンスドメディカル (株)

RF-ECG ワイヤレス生体センサー (心電、温度、加速度) 2.404-2.429GHz, 5MHz 間隔 5 チャンネル (医療電子科学研究所)

既存無線機器のセンサーをつけた被験者が UWB-BAN のセンサーをつけた被験者が隣に座り、それぞれの機器で生体情報はあったが、既存無線機器への影響及び既存無線機器からの影響はみられなかった。それぞれの無線機器は正常に動作した。

今までの実験、ハブのアンテナをヘリカルアンテナにしたが、ハブのアンテナをバイコンカルアンテナに変えて、UWB-BAN の性能を確認した。バイコンカルアンテナを垂直角度に対して 90 度、45 度、0 度の 3 パターンにて実験を行った。いずれのパターンにおいても 4 つのセンサーからの情報が管理 PC で確認できた。

また、従来の 12 誘導心電図測定器へ UWB-BAN による干渉実験を行った。12 誘導心電図測定器により、心電図を測定している所に UWB-BAN センサーをつけた被験者が近づき、機器周りを一周歩いて、変化の確認を行った。心電図は、変化はみられなかった。つまり、UWB-BAN による干渉はなかった。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

#### ① 研究成果 (実用化・国際標準の創出等)

医療 BAN の国際標準 IEEE802.15.6 の物理層から上位層技術の垂直統合により、医療情報セキュリティ・デペンダブルを向上、社会実験、薬事法・治験、電波法・技術基準適合証明をクリアし、臨床導入、国際ビジネス化に貢献している。

##### ①-1 国際標準化

2012 年 2 月に研究代表者が中心となり、日本の特許技術コアとして BAN の国際標準 IEEE802.15.6 を成立させたが、本事業の課題として、医療に本格導入するために必要なセキュリティ、デペンダビリティに難があった。本事業で IEEE802.15.6 に準拠した BAN の実装とその社会実験、臨床実験により、明らかになった現標準の問題点を中心に、IEEE802.15 の中に BAN のデペンダビリティを向上させる改良 (Amendment) 版の標準化を推進する IEEE802.15.IG-Dependable を立ち上げ、2013 年 3 月にフロリダ・Orlando で開催された IEEE802.15 Plenary Meeting において、改良版 BAN の標準化を本事業代表者が Chair ととなり、推進している。

一方、欧州の ETSI の Smart BAN プロジェクトにおいて、BAN の高信頼化による医療以外への応用として、Dependable M2M へ拡張する ETSI 欧州標準化に、フィンランド・オウル大学 CWC および、CWC 日本として参加し、本事業の成果を中心に IEEE802 と連動させる活動を行っている。

##### ①-2 社会実験、臨床実験、薬事法、電波法

横浜三井ビルディングの横浜国立大学未来情報通信医療社会基盤センターおよび CWC 日本における社会実験と、横浜市立大学附属病院福浦における臨床実験は、時間の制約により十分なデータではないが、現在、研究代表者が科学委員を務める厚生労働省所管の医薬品医療機器総合機構 (PMDA) の科学委員会において、医療用 BAN の薬事承認につながる治験へと検討が進んでいる。

一方、BAN の物理層標準技術である超広帯域 (UWB) 無線に関する電波法技術基準の改定が、総務省情報通信審議会において、検討が進み、本事業研究代表者がその審議に貢献している。

## ②波及効果

高度のセキュアでデペンダブルな BAN を利用したユビキタス医療ネットワークインフラストラクチャの構築の起点として、ウェアラブル・インプラント BAN としてあらゆる医療現場に普及する。

人体以外の車、ロボット、ビルなどのボディに医療と同様に Life Critical な応用に、セキュアでデペンダブルな BAN は、さらに広範囲に波及する。

IEEE802.15 の国際標準化において、BAN を医療以外の Dependable M2M に拡張するための標準化委員会 IG-Dependable を事業研究代表者が Chair して推進している。また、ETSI の Smart BAN プロジェクトにおいても、同様に Dependable M2M への応用を目指している。特に、自動車の内部制御用ネットワークの CAN や LIN に UWB-BAN を導入することを推進する。

## ③類似の研究開発の実績

CE 用ブルーツースや RF-ID などの無線アドホックネットワークが、セキュアでデペンダブルな BAN にリプレースされることが予想される。

IEEE802.15.4f として、UWB-RFID タグが標準化されているが、低データ速度で測位に有効。

## 4. むすび

研究開発課題のすべてを、極めて短時間で達成できた。本研究開発の達成度は、次の通りである。

① 医療ネットワークの情報セキュリティ定義:医療用 BAN などの医療ネットワークに求められる固有な情報セキュリティが対象とすべき、驚異となるサイバー攻撃や干渉妨害を分析整理し、各攻撃や干渉妨害に応じて達成すべきセキュリティレベルを定義する。

これに対して、BAN の制限されたハード/ソフトのモジュール用に計算時間と消費電力をセキュリティ強度の評価に含めて定義した。また、BAN の国際標準 IEEE802.15.6 で我々が定義した伝送情報の 7 段階の QoL に対応づけ、必要とされるセキュリティレベルを定義した。

② 医療ネットワークセキュリティの制約下のレイヤ別最適方式設計:各攻撃や干渉妨害の問題に応じて、導入可能な対策技術を物理層からアプリケーション層にわたり分類整理し、各問題解決に複数のレイヤの対策技術が存在する場合に、BAN の組み込み型デバイスを前提にした計算処理能力と消費電力の制限下で、最適な方式設計を行なう。

これに対しては、階層ごとの最適化として、物理層でのセキュリティ・干渉対策として、通信路符号の誤り訂正能力や DS-UWB の系列長を可変にすることにより、攻撃や干渉レベルに応じて、BAN を保護する方式を考案した。MAC 層では、コンテンションベース (CAP) とコンテンションフリー (CFP) のハイグリッド MAC プロトコルのセキュリティ・デペンダビリティ向上のために、QoL レベルに応じて、CAP/CFP の比率の最適値を導出した。(参照 12-1)

③ 国際標準医療 BAN セキュリティのマルチレイヤ統合最適化による更新:IEEE802.15.6 で国際標準化された BAN の物理層と MAC 層技術仕様を満たした上で、ネットワーク層以上の上位層で対処可能な方式設計と、国際標準の物理層・MAC 層の更新(amendment)を含むマルチレイヤ統合最適化による方式設計を、産業化に必要な経済性や技術共有性を基に理論によるフィジビリティスタディを行なう。

これに対しては、前述の 2-2、2-3、2-7、2-10、2-12 に

マルチレイヤ統合最適化の多様な成果を考案したことを述べた。

現在、自ら標準化をまとめた BAN の国際標準 IEEE802.15.6 の改定会議 802.15.IG-DEP の Chair としてセキュリティとデペンダビリティを向上させる 802.15.6a の標準化を主導する。

④ 国際標準医療 BAN セキュリティの臨床試験:臨床試験に必要な実用システムの試作に基づくフィジビリティスタディを、EU と日本で同時に行なう。

これに対しては、2.4 の無線 BAN システムの社会実証実験に述べたように、横浜三井ビルディング 15 階の横浜国大医療 ICT センターサテライト、CWC 日本により、実稼働中のオフィスビルにおいて社会実験を行い、横浜市立大学附属病院福浦において臨床実験を行った。

本年 5 月 29 日に横浜三井ビルディング 15 階において、フィンランド・オウル市副市長、オウル大学副学長他 5 名の VIP が来日し、オウル大学附属病院に先端医療機器の薬事承認のための治験に関する施設の設置について協議を行った。これは、横浜市、川崎市、神奈川県による京浜臨海部ライフイノベーション国際戦略総合特区における Regulatory Science による医療用 BAN の治験と連動して遂行することを検討している。

⑤ 欧州 ECMA 標準と日本 ARIB 標準の医療 BAN セキュリティの実証実験:国際標準 IEEE802.15.6 に準拠した医療用 BAN の試作および、マルチレイヤ統合最適化した BAN の試作を比較評価し、ETSI の欧州 ECMA 標準と日本の電波産業会 ARIB 標準として、IEEE802.15.6 に対して上位互換性のある適切な標準案の策定と EU と日本において同時並行で推進する。

これに対しては、③で述べたように IEEE802.15.6 の改良(amendment)標準委員会を主導すると共に、欧州の ETSI の Smart BAN プロジェクトで ETSI 標準化を推進している。

⑥ 欧州 ECMA 標準と日本 ARIB 標準の医療 BAN セキュリティの薬事法治験と電波法技術基準適合証明:さらに、上位互換性のある標準案の薬事法に対する治験と電波法に対する技術基準適合証明を、フィンランド・オウル大学 CWC と横浜国立大学・CWC 日本が有する PMDA (医薬品医療機器総合機構) と NICT (情報通信研究機構) との連携を活用して、比較的短期間で実施する。

これに対しては、今回開発した IEEE802.15.6 に準拠した UWB-BAN は、日本 GIT 社を通じて、電波法の実験局免許を取得し、UWB に関する電波法の技術基準を満たしている。また、現在、横浜国立大学と PMDA との連携大学院協定の締結を進めており、これまでの横浜市立大学と PMDA の連携大学院締結を通じての BAN のレギュラトリ科学に基づく薬事承認に向けた準備が整ってきた。

## 【誌上発表リスト】

[1] Kotaro Yamasue, Hiroaki Hagiwara, Osamu Tochikubo, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, "Measurement of Core Body Temperature by an Ingestible Capsule Sensor and Evaluation of Its Wireless Communication Performance," ABE Advanced Biomedical Engineering, No. 12009, Vol.1, 9-15, Dec. 2012

[2] Eriko Saeki, Ryuji Kohno, "Error-Controlling Scheme with Encoding and Spreading in Multi-hop Relay Network," 2012 International Symposium on

Information Theory and its Applications (ISITA2012), Hawaii, USA, pp. 764-768, (Oct. 28, 2012)

[3] Pham Thanh Hiep, Ryuji Kohno, "Trade-Off of Multiplexing-Diversity Gain for High Throughput Multiple-Hop MIMO Relay System," 2012 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2012), Hawaii, USA, pp. 677-681, (Oct. 28, 2012)

[4] Mohammed Fatehy, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, "Adaptive Transmission for Different WBAN Applications with Variable Length Spreading Sequence," International Journal on Computer Engineering and Bioinformatics, accepted ISBN 978-1-84626-xxx-x, December 2012

[5] Kento Takabayashi, Hirokazu Tanakay, Chika Sugimoto and Ryuji Kohno, "The error control scheme with Weldon's ARQ considering the QoS parameter for WBANs," The Seventh International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT2013), Tokyo, Japan (March 7, 2013)

[6] K. Yamasue, Y Obinata, K Takizawa, C Sugimoto, R Kohno, "Measures against shadowing problem on a bed using high-band UWB-BAN." The Seventh International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT2013), Tokyo, Japan (March 8, 2013)

[7] 河野隆二, "Dependable Wireless 技術の学術・産業におけるグローバル展開ビジョン-様々な異なる無線システムの共存-" シミュレーションの"力" ワークショップ、品川、コクヨホール、2012年10月12日

[8] Ryuji Kohno, "Advanced Medical Healthcare Based on ICT (Information Communication Technology) -- YNU MICT Center & Global COE Program --," Oslo University Hospital Seminar, Oslo, Norway, October 30, 2012

[9] Ryuji Kohno, "Business Promotion and Regulatory Science of Medical ICT for Aging Society," Workshop on "Emerging ICT supporting Future Aged Society," March 6, 2013

#### 【国際標準提案リスト】

[1] Ryuji Kohno, "Review and Amendment of IEEE802.15.6 BAN to focus on Dependable Wireless BAN of Things," doc. : IEEE 802.15-13-0192-01-wng0, March 2013

#### 【参加国際標準会議リスト】

[1] IEEE802 Plenary Meeting, Orland, Florida, USA, March 17-22, 2013

#### 【受賞リスト】

[1] Ryuji Kohno, "Certificate of Appreciation: The IEEE Standards Association acknowledges with Ryuji Kohno for outstanding contributions to the development of IEEE Standard 802.15.6TM-2012, " IEEE Standard for Local and metropolitan area networks- Part 15.6: Wireless Body Area Networks, 2012.