



最先端医療を実現する 生体内外センサネットワーク技術

—生体に低侵襲で高信頼な医療のために—

杉本千佳 河野隆二 (横浜国立大学)

情報通信技術の医療への応用が進む中、体外や体表に装着する生体センサだけではなく、人体内に埋め込む、あるいは一時的に留置するインプラントセンサにより生体内外で無線通信ネットワークを構築し、低侵襲^{☆1}に体内環境の監視や各種治療を行う技術の研究・開発が進められている。医療やヘルスケアに利用するこうした生体内外ネットワークは、人体特性を考慮した高い信頼性と安全性の確保が必要であるが、医療に新たなパラダイムを創生するものとして期待される。本稿では、これらを実現するための先端技術と最新研究開発動向について紹介する。

医療を変えるボディエリアネットワーク

情報通信ネットワークを利用した近未来医療として、いつでもどこでも生体情報を伝送し診断・治療まで行ってくれるユビキタス医療が期待されている。日常生活における予防レベルのケアや在宅での医療が重要となる中、小型センシングデバイスを用いて個人の生活状況、健康状態を計測し、ネットワークを介してデータを収集、管理しケアへ活用するニーズが高まっている。こうしたユビキタス医療にはいつでもどこでも情報を伝送できるネットワークが必要であり、そのコアとなるのが人体を中心とした近距離無線通信ネットワークのボディエリアネットワーク (BAN) である。BAN とは、人体の表面や内部に置いたセンサの情報をワイヤレスで収集

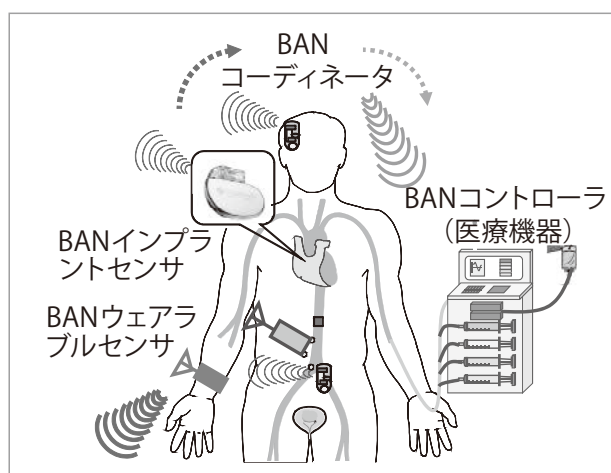


図-1 ボディエリアネットワークのイメージ図

することを想定した無線ネットワークのことである (図-1)。2012年2月、無線BANの技術標準となる医療、ヘルスケアへの利用展開を想定した無線標準規格 IEEE802.15.6 が成立した。この標準規格は、近距離および低消費電力の無線通信技術の中でも体表または体内における機器での使用を想定しており、メディカルデータとメディカルイベントの優先アクセスを可能とする。通信方式や電波仕様などを定義する物理 (PHY) 層、ネットワーク形成とアクセス方法などを定義するメディアアクセス制御 (MAC) 層について規定しており、3つのPHY層と共通のMAC層から構成されている (図-2)。物理層は超広帯域無線 (UWB: Ultra Wide Band)、狭帯域無線 (NB: Narrow Band)、人体通信 (HBC: Human Body Communication) の3つをサポートしており、利用目的に合わせて最適な無線を選択可能である。UWBは、きわめて低い送信電力密度で通信するた

☆1 侵襲: 生体内の恒常性を乱す可能性のある外部からの刺激。

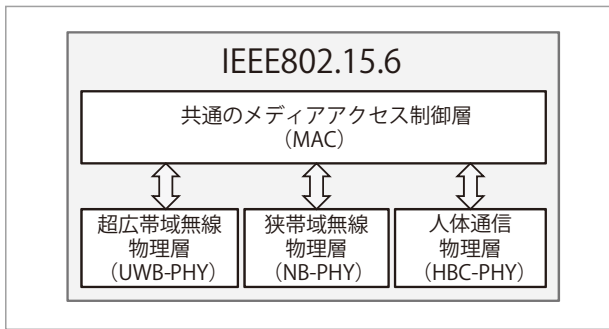


図-2 IEEE802.15.6の構成

め既存無線システムとの周波数共用や低消費電力化が可能で、伝送レート最大 8.8Mbps のストリーミングサポートがあり、大容量データの伝送にも適している。NBは、伝送誤りへの耐性を確保し、受信機の複雑さの低減と低消費電力化のための変調方式と符号化・検波方式を採用している。伝送スロットを完全に確保する伝送保証型の通信であり、信頼性を保証した通信となっている。HBCは、人体を伝送媒体とした電界通信で人体とその周辺のみが通信経路となるので、通信距離が短いため送信電力が少なく、セキュリティ性が高いという特徴がある。共通のMAC層では厳格なセキュリティとデータ送信優先制御を基本仕様として規定し、メディカルデータの伝送に対応可能としている。ビーコン方式とノンビーコン方式をもとに3つのチャンネルアクセスモードが定義されており、求めるセキュリティの強度や汎用性、省電力性などに応じて選択し構成可能である。

無線BANでは、システム全体を長寿命化するため低消費電力であることに加え、医療分野で十分に使える高い信頼性、人体や医療機器に悪影響を与えない安全性を満たすことが求められている。BANは体表面同士で通信ネットワークを構成するウェアラブルBANと、体表面と体内あるいは体内同士で通信を行うインプラントBANに分けられる。心拍計や歩数計などの体外に装着したウェアラブルセンサと体外のコーディネータで構成するウェアラブルBANについては、さまざまな小型センサが開発されており、電波伝搬チャンネルモデルの作成が実験とシミュレーションにより進められている。一方、よ

り信頼性と安全性が求められるインプラントBANでは、インプラント機器の開発において、生体内外での通信に適した電波の周波数帯・伝送方式・伝送距離・送信出力・消費電力などの最適化に基づく電波伝播モデルの構築や、超小型アンテナ技術等の基盤技術の開発がまだまだ必要である。生体を使ったインプラントの実験は困難であり、体内組織の電気定数を与えた人体モデルを用いたシミュレーション解析が行われている¹⁾。

BANのチャンネルモデル

人体周辺および内部での電波伝搬は複雑である。人体は誘電率や導電率が異なる皮膚・脂肪・筋肉・骨などの組織により構成されているため電波伝搬の周波数依存性が高く、人体表面や内部での電波の反射や人体による電波の吸収は一律ではない。人体外では、送信側から受信側に直接伝わる直接波や体表面を回り込んで伝わる体表回折波、周辺の物体による散乱波などが混ざり合った状況になる。一方人体内では、減衰・位相特性や伝搬速度特性が人体外と異なり、近距離でも減衰・位相変化が大きく、高周波数帯ではその変化がより大きくなる。また、各生体組織の比誘電率が異なるため伝搬速度が一定ではない。さらに、人や機器が動くことにより送受信機間の位置関係が変動して電波伝搬路に変化が生じるため、チャンネルモデルは一層複雑になる。ここではインプラントBANにおける無線通信技術の現状について述べる。

◆ 人体内外での無線通信技術

医療における無線利用で代表的な医療用テレメータは、日本では周波数420～430MHzおよび440～450MHzに6つのバンドが割り当てられた特定小電力無線局であり、占有帯域幅の上限値は320kHzと定められている。また、ペースメーカーのように人体内部に埋め込む、あるいは一時的に留置する医療用機器で利用する無線システムとして総務省が2005年に定めた体内埋込型医療用データ伝送

システム（MICS：Medical Implant Communication System）があり，利用周波数帯域は特定小電力無線局に指定された402～405MHz帯で，占有周波数帯幅は300kHz以下，電力は25 μ W以下とすることが要件として挙げられている．インプラントBANにおける生体内外でのデータ伝送を考えた場合，通信効率が高い周波数帯を用いることが必要であり，高誘電率媒体である人体内での距離減衰を考慮したうえで，アプリケーションに応じた伝送速度を確保することが必要となる．伝送する情報量は，リアルタイムの生体情報で1パラメータ当たり20bytes程度，画像情報はフレームレートに依存し既存のカプセル内視鏡で毎秒数フレームとした場合に数Mbit/s程度であり，インプラントBANで要求される最大伝送速度は2～3Mbpsとされている．画像を含む情報を伝送する場合に必要なこの伝送速度を達成するためには，上記の2つの周波数帯で許容される占有帯域幅では狭く，より広い帯域幅を利用できる微弱無線と2.4GHzのISM（Industry Science Medical）帯が候補として挙げられる．2.4GHz帯は，伝送距離の増加に対する減衰量増加の割合が大きく，通信距離が長くなる場合の通信安定性に問題が残る．送信電力を増加させることも考えられるが，消費電力の点から動作時間が短くなるドロバックがある．インプラント機器と体外のコーディネータ間での通信を考えた場合，要求ビット誤り率を満たすための受信機の受信感度，受信アンテナの利得，送信電力から，体内伝搬許容損失量が決まってくる．オリンパス製のカプセル内視鏡（図-3）では，電波法の電界強度制約を満たす送信出力で十分な通信距離を確保できる周波数帯として，中心周波数315MHzの微弱無線を利用している．オリンパスはまた，人体の比誘電率による波長短縮を利用して受信アンテナを小型化するとともに，体表に複数のアンテナを貼付してダイバーシチ受信を行うことで，通信の信頼性を向上させている．ギブソ・イメージング社のカプセル内視鏡では，アマチュア局に割り当てられている周波数帯430～440MHzの中に入る中心周波数432～434MHz



図-3 カプセル内視鏡（左：カプセル内視鏡 右：受信装置）
画像提供 オリンパスメディカルシステムズ（株）

帯の微弱無線を画像伝送用に用いている．新たに13.56MHzの高周波を利用して体外から体内の装置をコントロールする機能を開発し，ヨーロッパにおいて医療機器としての認可を得ているが，日本では電波法への適合の問題が残っている．

無線BANで伝送されるデータには画像のように情報量の多いものもあるが，伝送される生体信号には周期的で頻度の低いものが多い．また，遠隔制御による治療などコントロール情報によりインプラント機器を動作させる場合やイベントに基づいて動作する場合など通信間隔は必ずしも一定ではなく，パケット生成間隔は1msから1000s程度の間で変化することが考えられる．さらに，BANでは生体情報の取得だけでなく，その情報をもとにアクチュエートすることまで想定されているため，双方向通信できることが求められる．現在，単方向通信に限定されている420～450MHz帯の医療用テレメータを双方向化し高度化する場合の技術的検討が行われている．この周波数帯をインプラントBANに割り当てると有益であるとする議論もある．今後開発される多機能で高機能化されたインプラント機器を考えると，送信情報の種類や位置・状況に応じて周波数や出力を変えるUWB無線も有力な候補と考えられる．筆者らは，人体内外でのUWB通信チャンネルのモデル化とダイバーシチ受信や最適受信ノード選択による通信のパフォーマンス解析を行っている^{1), 2)}．双方向通信を利用して，測位を行いながらインプラント機器と受信ノードとの位置関係をもとに減衰量を推定し，出力を制御しながら最適な受信ノードと通信を行う最適制御通信技術の発展が期待される．

無線 BAN に求められる要件

無線 BAN には、データ送信時の誤りや遅延が少なく、データ漏えいや改ざんなどがなされない高い信頼性と、人体や医療機器に悪影響を与えない安全性を満たすこと、低消費電力でシステム寿命が長いことが求められる。これらの要件を満たすための手法について、以下に説明する。

◆ 高い信頼性

高信頼性の確保には、PHY 層、MAC 層レベルで適切な誤り検出および訂正方法、妨害回避方法を構築する必要がある。また、遅延時間の短いアクセス制御方法も必要である。IEEE802.15.6 は、CSMA (Carrier Sense Multiple Access) と TDMA (Time Division Multiple Access) のハイブリッド方式であり、ベストエフォート型と伝送保証型の送受信をバランスさせて BAN を構成することができる。ハブ主導でセンサとデータのやりとりを行うビーコン方式、センサ主導でデータのやりとりを行うノンビーコン方式、ハブとの伝送機会をセンサに保証する周期アクセス方式、直接通信が困難な場合の 2 ホップ通信による伝送方式、干渉回避のための周波数切り替えとタイムシェア、データ秘匿と改ざん防止のためのセキュリティ機能を目的に応じて選択的に利用し、要求を満たす信頼性を実現する。

◆ 人体に対する安全性

人体に対する安全性では、機器自体の安全性と無線装置としての安全性の両方を確保することが求められる。無線デバイスが故障等により正しく制御できなくなり人体に対して悪影響を与えることがないように、フェールセーフに設計して安全性を確保せねばならない。また、電波が人体に与える影響を正しく評価して無線を制御することが必要である。電波が人体に与える影響の度合いを示す指標としては、熱作用を評価する比吸収率 (SAR: Specific Absorption Rate) がある。SAR は単位質量の組織に単位時間に吸収されるエネルギー量を表す。電磁波曝露に

よる安全性への影響で懸念されることの 1 つは、電磁波吸収に伴う温度上昇によって生じる生体への影響である。安全性の尺度として SAR を用いる場合「全身平均 SAR」と「局所 SAR」があるが、人体内および表面で使用する場合には、アンテナ近傍において比較的強い電波が曝露されることから、局所的な体温上昇による影響を考慮する必要がある。局所 SAR は、電磁界にさらされることにより任意の生体組織 10g 当たりが 6 分間に吸収されるエネルギー量の平均値を表し、電波防護指針では局所での温度上昇が 1℃を大きく超えることがないように許容値を 2W/kg と定めている。従来の電磁波の生体影響に関する検討では、人体外から生体に入射された場合の影響を主に想定しており、超広帯域電磁波では生体内での減衰が大きいため、生体内部組織への影響は小さいとみなされている。一方で、SAR と最大温度上昇の比は 3GHz 以下ではほとんど一定とみなせるが、3GHz 以上では SAR と温度上昇の相関は周波数により一定とはみなせないとの報告がある³⁾。インプラント BAN を考えた場合、生体内で照射されることから、電磁波の曝露による発熱と機器自体の回路熱による発熱の影響を考慮した、人体 3 次元モデルによる解析が必要である。筆者らは、測位を伴う生体内通信において生体組織の温度を制約条件とし、熱輸送方程式に基づく温度特性式をもとに、温度上昇を考慮して測位誤差および測位時間を最小にする通信測位方式を提案している²⁾。カプセル内視鏡の画像への位置情報付加や体内機器の制御における位置情報利用など、体内での正確な位置情報を取得するニーズは高い。測位は電波到来時間差を利用した位置検出方式である TDOA (Time Difference of Arrival) 方式を用いて、人体モデルから解析領域の各組織の形状とそれが占める割合をもとに伝搬速度、減衰量を推定し、生体内機器から送信された信号をあらかじめ位置の分かっている複数のノードで受信し、その相関から到来時間差を求める位置推定を繰り返して最尤位置を導出する (図-4)。高い距離分解能を持つ UWB 通信を用いた場合に、生体組織の温度上昇を制約条件として、測位精度に影響を

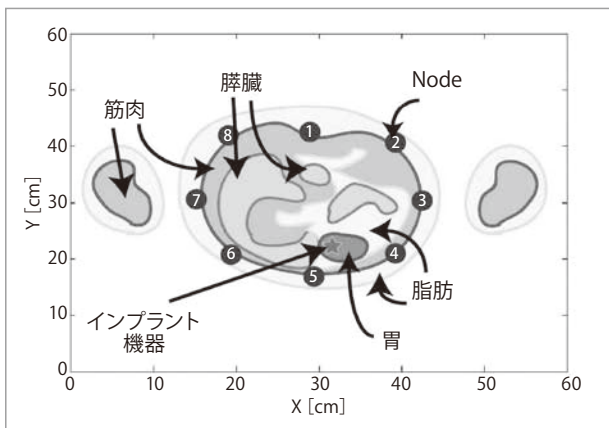


図-4 人体モデル（腹部）とノード配置の例

与える拡散系列長と位置推定頻度を適切に変化させることにより、誤差を最小化して情報送信と測位ができることを示した。現在は静的モデルを用いているため、今後はインプラント機器の移動と体動を考慮し、動的モデルにより熱的影響と通信への影響を評価することを検討している。

◆ 低消費電力・長寿命

低消費電力化には、ピークの消費電力と平均の消費電力を低減する必要がある。無駄な送受信やパケット衝突、オーバヘッドのコントロールを最小限にし、効果的で柔軟なデューティサイクル技術を採用することにより、低消費電力化を実現する。また、体外からワイヤレス給電を行うことにより電力を確保し、動作時間をのばす方法も考えられる。

インプラント BAN を構成するデバイス

ユビキタスな医療や生体への負担を軽減した高度な医療を提供するため、生体情報を人体の内部で取得する小型機器や人体内で治療や生体機能の代替をする機器の研究開発が進んでいる。カプセル内視鏡やカプセル温度計のような飲み込み型機器、ペースメーカーや除細動器などのインプラント型機器がすでに実用化され、人体内で動作しデータを発信している。インプラント BAN を構成するセンサデバイスは、サイズの制約の中でアプリケーションのパフォーマンスを実現できるように CPU 処理力や電源容量、

メモリ量を確保する必要がある。人体内で生体情報を測定するための医療用バイオセンサとして、いくつかのインプラント型チップが発表されている。米国 Case Western Reserve University は、うつ病やパーキンソン病など脳疾患の治療に応用可能な神経活動計測用ワイヤレスチップを開発した。脳に埋め込み、神経伝達物質であるドーパミンを電気化学的シグナリング技術によりモニタすることで、ドーパミン放出量に応じて電気刺激を与える治療を可能にするものである。広島大学は「飲むバイオセンサ」の研究開発の第 1 段階として、義歯に埋め込むタイプの口腔内無線 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) センサチップを開発した。内蔵のグルコースセンサと温度センサにより口腔内データを測定し、無線伝送により連続モニタリングを可能にするものである。こうした生体に適合させるバイオセンサ技術、低消費電力を実現する半導体回路技術、無線通信技術、小型化のための実装技術、大容量メモリ集積化技術などの要素技術の発展により、実用のセンサデバイスが開発、改良されてきた。飲み込み型のカプセル内視鏡には、CCD (Charge Coupled Device) または CMOS イメージセンサや、周囲を照らす発光ダイオード (LED)、取得した画像データを処理する信号処理回路、画像データを外部に伝送する無線回路、アンテナ、電池などが組み込まれている。カプセル内視鏡が実用化できたのには、半導体チップや各種電子部品の小型化が進んだことに加え、データ無線伝送の消費電力が低減化されたことが大きく寄与している。従来のファイバー付き内視鏡検査では、口や鼻あるいは肛門から直径 1cm 前後の長い管を挿入して食道や胃、大腸などの検査や治療を行ってきた。しかし、長さが約 7m にもおよぶ小腸などは内視鏡による検査を十分に行うことができず、また管を体内に挿入するため体への負担が大きかった。インプラントや飲み込み型の機器（以下、インプラント機器）で診断から治療まで可能になれば、医師や患者の負担は飛躍的に軽減される。オランダ Royal Philips Electronics 社が開発を進める飲み込み型機器 Intelligent Pill (iPill, 図-5) には、消化器の



図-5 Intelligent Pill
画像提供 フィリップス エレクトロニクス ジャパン

狙った場所で薬を投与する機能がある。直径 11mm、長さ 26mm のカプセルの中に、マイコン・チップや水素イオン濃度指数 (pH) センサ、温度センサ、薬を入れる容器、ポンプ、ボタン型電池、無線チップが格納されている。この iPill は、あらかじめ投薬するタイミングや量を規定したソフトウェアをマイコンに組み込み、それによってマイコンがポンプの動作を制御することで、決められた量の薬を消化器官の狙った場所で放出する仕組みである。

近年では医療において人体に低侵襲で高精度な診断と効果的な治療を行うために、インプラント機器の機能拡張が期待されている。血管内で自律的に動作して生体情報の取得や治療を行うようなマイクロロボットも先には想定される。体内からの生体データや画像情報の伝送だけではなく、内蔵カメラやセンサの向き、装置自体の動きの外部からの制御、薬剤放出やレーザー放射、マニピュレータ操作指示、体液採取指示等の治療や検査を的確に実現するためのフィードバック制御機能への期待は大きい。インプラント機器を BAN のノードとして双方向無線通信させることにより、複数の機器を協調させてこれらの機能を実現することが可能になる。インプラント BAN の詳細なチャネルモデルを構築し、それに基づいた最適な無線通信技術を実装することで、高度で QoS (Quality of Service) の高い医療を実現できると考える。

医療における無線 BAN への期待と課題

生体内外での無線センサネットワークを利用することにより、医療の QoS が飛躍的に向上すること

は間違いない。無線 BAN 内のコーディネータ端末がゲートウェイ機能を担い、BAN から PAN (Personal Area Network)、WAN へ接続することにより、ユビキタスネットワークの実現が可能になる。生体センサからリアルタイムに生体情報が収集され、遠隔医療も可能になる。超高齢社会を支えるための日常ヘルスマonitoring やヘルスケアに役立つことが期待される。

一方で、今後の BAN の普及には、人体への安全性の確保や信頼性の保証、規格の共通化などを実現しつつ、医療 BAN の薬事法試験と電波法技術基準適合証明をクリアする障壁を下げることが求められる。無線を活用した医療機器を医療現場で用いるためには、薬事法および電波法に同時に準拠することが必要となる。ネットワークを介した医療の普及に伴い、先端情報通信技術を用いた新たな医療機器の試験に時間がかかり、臨床導入が遅れるというデバイスラグを解消することが課題となる。また、社会的弱者・情報弱者への配慮など社会的な課題も残っている。これらのさまざまな課題はあるものの無線 BAN を利用した医療の恩恵は大きく、今後のさらなる発展が期待される。

参考文献

- 1) 青柳貴洋, 滝沢賢一, 小林岳彦, 高田潤一, 河野隆二: 電波伝搬損失測定とシミュレーションによるインプラント WBAN 電波伝搬モデルの構築, 電子情報通信学会医療情報通信技術研究会, MICT2008-23 (Jan. 2009).
- 2) 入江隆太, 杉本千佳, 河野隆二: 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, Proceedings of the 2013 IEICE General Conference, B-8-56 (Mar. 2013).
- 3) Hirata, A., Yoshida, K., Kawasaki, Z., Fujiwara, O. and Shiozawa, T.: Correlation between Peak Spatial-average SAR and Maximum Temperature Increase Due to Dipole Antenna in the Frequency Range 1-10 GHz, URSI General Assembly, K03-9 (Oct. 2005).

(2013 年 2 月 22 日受付)

◆杉本千佳 chikas@ynu.ac.jp

東京大学大学院博士課程修了。博士 (環境学)。東京大学大学院新領域創成科学研究科助教を経て、現在、横浜国立大学工学研究院准教授。研究分野は、生体計測、医療 ICT、センサネットワーク、医療情報システム、等。

◆河野隆二 kohno@ynu.ac.jp

東京大学大学院工学系研究科修了。工学博士。現在、横浜国立大学工学研究院教授、未来情報通信医療社会基盤センター長、オウル大学日本研究所 CWC 日本 (株) COE。研究分野は、情報通信、情報理論、医療情報、等。