

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01325

研究課題名（和文）次世代インプラント医療のための高信頼通信によるセンシング・コントロール技術の融合

研究課題名（英文）Integration of Vital Sensing and Wireless Control for Next-Generation Implant Medical Treatment

研究代表者

安在 大祐（Anzai, Daisuke）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：40611116

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は精度の高いセンシングとインプラント通信による精度の高いコントロールの融合を目指し、安全・安心な生活環境を支える次世代インプラント医療への寄与することが目的である。本研究開発は多元接続方式による複数バイタルデータ収集法の確立、人体電気定数の推定に基づく生体情報センシング技術の開発、について研究開発を実施した。UWB通信を前提とした多元接続方式プロトコルの開発を行い、信頼性の高い生体通信が可能であることを検証した。加えて、人体電気定数による生体情報センシング技術の開発においては、比誘電率の推定値に基づいた体内水分量の推定方式の検討を行い、実験評価により本提案方式の有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究開発成果は信頼性の高いインプラント通信技術とセンシングデータに基づく高精度制御の融合を目指しており、両者の融合技術の確立は学術的意義の大きい成果と考えられる。インプラントセンサによる制御まで実現できる技術の確立は新規医療技術への展開も可能となる社会的意義の観点でも重要な成果として期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research project aims to contribute to the next generation medicine to support a safe and secure life by integrating high-precision sensing and reliable control through implant communication. This research project focused on (1) establishing a multiple vital data collection using a multiple access method, and (2) developing a biological information sensing technology based on the estimation of the dielectrical constants of a human body. The developed method to establish reliable implant communication was evaluated. In addition, in the development of vital sensing technology based on the dielectrical constant estimation, the effectiveness of the proposed method was confirmed by experimental evaluation.

研究分野：無線通信工学

キーワード：インプラント通信 生体センシング MACプロトコル

1. 研究開始当初の背景

インプラント医療機器には、心臓ペースメーカーやカプセル内視鏡でのモニタリング用途から発展し、体内埋め込み型生体センサ（インプラントセンサ）によって制御される体内インスリンポンプやリードレスペースメーカー等のようなインプラント機器のセンシングとコントロールの高度な応用が提案されており、非常に注目を集めている。その一方で、インプラント医療機器からの通信は生体からの影響が大きく、信頼性が低下する問題があった。インプラント医療機器を用いた高度な医療の実現に向けて、インプラントセンサの取得した情報を低遅延でかつ信頼性の高い無線通信技術と、インプラント医療機器制御のための電波による精度の高いバイタルデータセンシングの双方を実現する技術の確立が急務に解決すべき研究課題であり、インプラント通信技術の向上・発展は新しい医療技術への構築に大きく貢献されると考えられる。

2. 研究の目的

本研究開発は、生体通信方式として信頼性と低遅延性を両立する MAC (Medium Access Control) プロトコルの開発を実施する。また、電波を利用したバイタルセンシング法の開発として、電波による比誘電率推定に基づいた体水分率推定法についても開発し、これらの融合技術として生体通信技術と生体センシング技術の双方を実現する技術の開発を目的とする。

生体通信の MAC プロトコル開発においては、国際標準規格 IEEE 802.15 タスクグループ 6ma で検討されている MAC プロトコルでは、複数の生体通信機器によるネットワークである BAN (Body Area Network) が共存する場合の信号干渉問題にも着目している。複数の BAN が互いに近い距離にある場合、互いの信号が干渉し、通信パケット衝突が引き起こされ、再送制御が発生すると信号伝送遅延にもつながる懸念がある。そこで本研究開発は、信号干渉によってパケットの競合を避けるために、複数の BAN を適用制御・統合化し、1つの統合されたスーパーフレームを構築する手法を提案する。計算機シミュレーションにより提案プロトコルの検証を行い、本研究開発技術の基本性能評価により有効性検証を目的とする。

電波による生体センシングの目的としては、慢性腎臓病により腎臓の機能が低下し、不要な水分や老廃物を自力で排出することができない慢性透析患者が増加している課題に着目し、ドライウェイト（体内の水分量が適正な状態の体重）の設定のための体水分率推定技術の確立を目的とする。先行研究では複素比誘電率により血液の含水率推定が可能であることが示されている知見を活用し、本研究は無線通信電波による複素比誘電率推定に基づいたウェアラブルな体水分率推定法の確立を目指す。

3. 研究の方法

干渉回避を実現する MAC プロトコルの開発において、本研究開発は IEEE 802.15 TG6ma で検討しているデータチャネルのスーパーフレーム構造を採用する。本スーパーフレームには NMP (Network Management Period)、CFP (Contention Free Period)、CAP (Network Access Period)、IAP (Inactive Period) を含んでいる。CFP と CAP は、TDMA (Time Division Multiple Access) 方式と Slotted Aloha 方式に基づいてそれぞれ制御される。なお、CFP ではパケットの衝突を避けるために優先度の高いパケットが割り当てられ、CAP では通常の優先度レベルのパケットがスロット割り当てを必要とせず送信可能である区間となっている。各 BAN のスーパーフレームが非同期状態の場合では、周辺 BAN からの信号干渉の可能性がある。特に、CFP において優先度の高いパケットを送信しても、他の BAN からのパケット衝突により、一部のパケットが消失する可能性がある。そこで、本研究は、各 BAN を自動制御することで共通の統合されたスーパーフレームを構成する MAC プロトコルを提案する。この統合スーパーフレームは、複数 BAN を高精度に時刻同期し、それぞれのスーパーフレームを統合することで1つのスーパーフレーム内にそれぞれの BAN の CFP を独立して設定することで、複数 BAN のパケットの CFP 内での衝突回避を実現する。なお、統合スーパーフレームの構築は、BAN 間において時刻同期やタイムスロット割り当てを制御するため、IEEE802.15.6ma 規格で制定されている制御チャネル (C チャネル) を介して互いに通信することにより実現される。このように、周囲の BAN において統合された共通スーパーフレームを利用することで、パケットの衝突を効率的に回避し、高信頼性・低遅延性を実現する MAC プロトコルの確立を行う。

電波に基づくバイタルセンシング技術においては、Lichtenecker の指数則に基づいて比誘電率と生体組織の水分含有率の関係式の数学モデルを構築する。本数学モデルにおいて、純水の比誘電率と有機物の比誘電率を混合した材料として生体組織の比誘電率が定義される仮定を利用している。本研究において、比誘電率の推定には平行平板法に基づいた方式を検討する。平行平板法では、2枚の平板電極の間に誘電体を挿入されるモデルを仮定し、インピーダンスから複素

比誘電率を求める測定法である。誘電体の等価回路モデルは、並列等価容量 C_p と並列等価抵抗 R で表され、平板間の比誘電率を求める定式化を行う。これらの比誘電率と水分含有率の数学モデルと平行平板法による複素比誘電率推定モデルを組み合わせることで、電波による体水分率推定技術の検討を実施する。

4. 研究成果

UWB ハイバンドの 7.25-9.0GHz 帯での人体内外の伝搬特性を FDTD (Finite Difference Time Domain) 法により求め、得られた結果により無線通信特性を評価する際に必要となるパソロスモデルとして用いた。本解析における人体モデルは、情報通信研究機構開発の解剖学的人体数値モデルを用い、周波数依存性のある乾いた皮膚の電気乗数を一様に与えたモデルを利用した。送信アンテナは使用周波帯での反射特性が-10dB 以下となる完全導体で構成される楕円ダイポールアンテナを使用した。受信信号は、受信点での電界と磁界から電力密度を算出しており、送受信アンテナ利得を除いた送信電力対受信電力比によってパソロスを導出した。通信特性評価のための数値シミュレーション評価では、比較ため、提案する MAC プロトコルだけでなく、非同期時の場合も想定し、非同期状態からの通信性能の向上効果を評価した。本研究では信号送信の頻度分布をポアソン分布によって表現しており、ポアソン分布の平均値を決定する値をオフロードとして定義した。通信性能指標としては、PER (Packet Error Rate)、平均・保証遅延時間などを評価した。遅延時間は、パケット生成からパケット送信完了までの時間として定義し、パケット再送が最大再送回数に達した場合はパケットを破棄し、パケット破棄までの時間を遅延時間として評価した。保証遅延時間の算出については、99 パーセンタイル値を採用した。図 1 は CFP における PER 特性、遅延時間の評価結果をそれぞれ示す。非同期スーパーフレームでは他 BAN からのパケットによる衝突が多く、PER が非常に悪化しているのに対し、統合スーパーフレームでは PER が 10^{-3} に近い特性が得られ、PER 特性を大きく改善できることが示された。加えて、オフロードが大きくなるほど、BAN 数に関わらず統合スーパーフレームによって平均遅延時間、保証遅延時間が改善されていることがわかる。オフロードが 3000 packet/s の場合、BAN 数が 2 つと 3 つのそれぞれ場合において、平均遅延時間は約 0.6ms、1.0ms、保証遅延時間は約 3.8ms、1.2ms の改善がそれぞれ達成された。

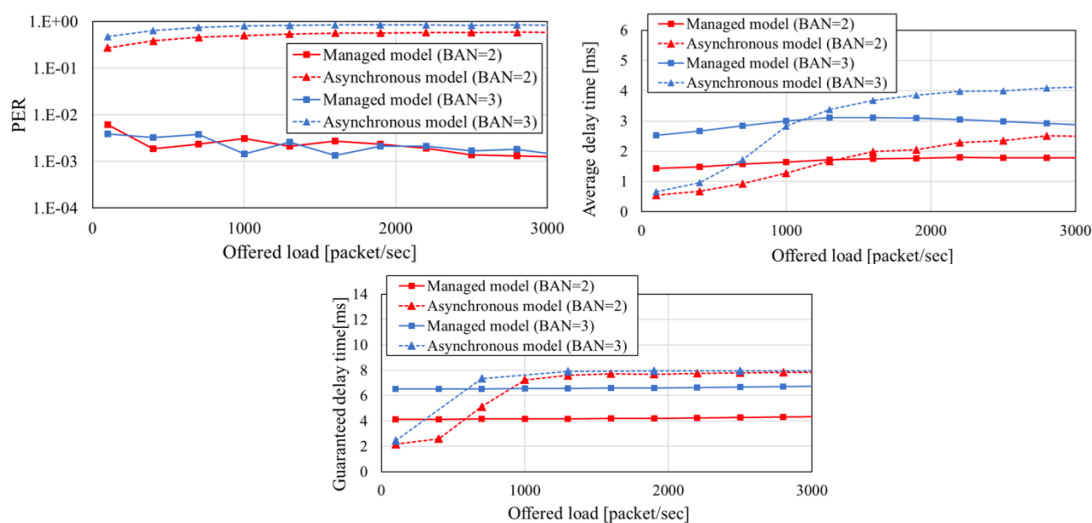


図 1. 提案 MAC プロトコルの PER 特性と平均及び保証遅延特性

電波による体水分率推定法の検討において、提案推定法を実験による評価した。本評価実験において、平行平板間に生体等価固体ファントムを挿入し、VNA (Vector Network Analyzer) で反射係数を測定した。平板は厚さ 1mm のガラスエポキシの片面が銅箔でメッキされた基板を一边を 70 mm とする正方形に加工し、穿孔した中心に導線を通して銅箔面ではんだ付けた。生体等価固体ファントムは純水とグリセリンを主原料とし、その分量比を変えて含水率が 67.72 v/v% のファントム A (70 mm × 70 mm × 28.5mm) と含水率が 33.71 v/v% のファントム B (70 mm × 70 mm × 26.0mm) を作成した。なお、本実験評価において、含水率は体積百分率で算出した。導線の寄生インダクタンスの値は平板同士を接触させた状態で測定した反射係数から 243.8 nH と求めた。そして、測定した反射係数から固体ファントムの静電容量と抵抗値を求め、固体ファントムの比誘電率と導電率を推定した。純粋の比誘電率である ϵ_{rw} は純水の温度と周波数で決まる既知の値であるため、未知パラメータは個体ファントムの比誘電率 ϵ_{rt} と含水率 α で

ある。そこでファントム B の含水率 α_B を既知とし、推定したファントム B の比誘電率 ϵ_{rB} を用いれば ϵ_{rt} が求められる。ファントム A、B で ϵ_{rt} が同一の値であるとすれば、ファントム A の含水率 α_A はファントム A の比誘電率 ϵ_{rA} を用いて推定することができる。ファントム A 測定時の入力インピーダンスの絶対値を図 2 に示す。参考値として、開放終端型同軸プローブ法 (Keysight 85070E 誘電体プローブキット使用) で測定した電気定数を用いて算出したインピーダンスを重ねて示す。また、固体ファントムの比誘電率と導電率の推定値と開放終端型同軸プローブ法での測定値を表 1 に示す。本実験結果より、インピーダンスの共振周波数は 5 MHz ほど偏差があることが分かる。その要因としては、固体ファントム表面の凹凸により接触面積が小さくなったことや、固体ファントムの寸法の測定誤差、平板端部で生じる端効果の影響などが考えられる。

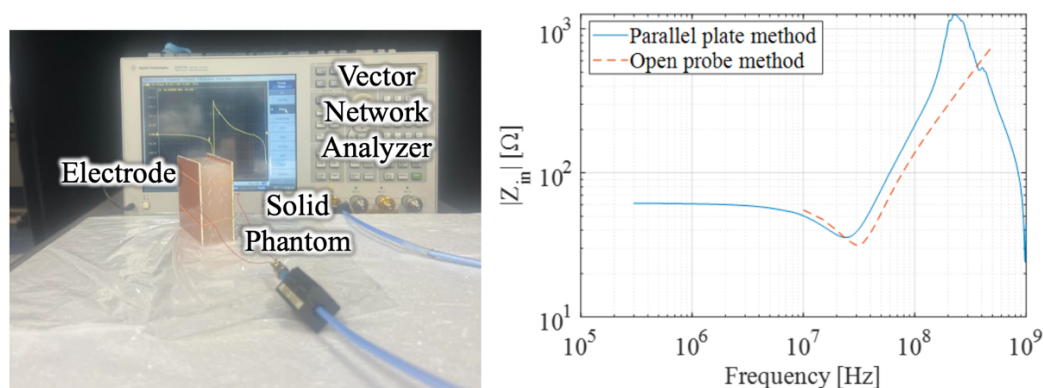


図 2. 実験測定環境と入力インピーダンスの測定結果

表 1. 比誘電率の推定結果

@10 MHz	Phantom A		Phantom B	
	ϵ_{rA}	σ_A [S/m]	ϵ_{rB}	σ_B [S/m]
Parallel plate method	65.61	0.1026	55.24	0.0161
Open probe method	66.39	0.0910	52.97	0.0168

Lichtenecker の指数則に基づいて推定した ϵ_{rt} とファントム A の含水率の推定結果を表 2 に示す。平行平板法では誤差率 -3.3%、開放終端型同軸プローブ法では誤差率 5.5% の推定精度を達成した。誤差の要因としては、比誘電率の推定誤差や ϵ_{rt} がファントム A と B で異なることなどが考えられる。体水分率の推定誤差率 3% は生体通信を用いたインプラント医療機器の制御において 1 つの指標として用いるには十分な精度であると考えられる。

表 2. 有機物の比誘電率と含水率の推定結果

@10 MHz	ϵ_{rt}	α_{theo} [v/v%]	α_{esti} [v/v%]	Relative error [%]
Parallel plate method	46.02	67.72	65.46	-3.3
Open probe method	43.30	67.72	71.46	5.5

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 D. Dmitrieva, D. Anzai, J. Kirchner, G. Fischer, J. Wang	4. 巻 7(2)
2. 論文標題 Cost-Efficient Real-Time Adaptive Location Tracking With Interacting Multiple Transition Model for Implantable Medical Device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology	6. 最初と最後の頁 102-109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JERM.2022.3221068	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Toriyama, S. Hasegawa, J. Kirchner, G. Fischer, D. Anzai	4. 巻 14
2. 論文標題 Ambient Environmental Parameter Estimation for Reliable Diffusive Molecular Communications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Future Internet	6. 最初と最後の頁 311
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/fi14110311	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Shimazaki, D. Anzai, K. Watanabe A. Nakajima, M. Fukuda, S. Ata	4. 巻 22
2. 論文標題 Heat Stroke Prevention in Hot Specific Occupational Environment Enhanced by Supervised Machine Learning with Personalized Vital Signs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 395
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22010395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 R. Iwai, T. Shimazaki, Y. Kawakubo, K. Fukami, S. Ata, T. Yokoyama, T. Hitosugi, A. Otsuka H. Hayashi, M. Tsurumoto, R. Yokoyama, T. Yoshida, S. Hirono, D. Anzai	4. 巻 22
2. 論文標題 Quantification and Visualization of Reliable Hemodynamics Evaluation Based on Non-Contact Arteriovenous Fistula Measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2745
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22072745	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 J. Hoshino, J. Hyry, T. Kobayashi, D. Anzai	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of a Wearable System for the Detection of Ingestible Medication Based on Electromagnetic Waves	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electronics13030543	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Y. Ishikawa, D. Anzai, J. Wang
2. 発表標題 Performance evaluation on UWB implant device localization based on frequency-domain information
3. 学会等名 BioEM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Asai, D. Anzai, J. Wang
2. 発表標題 Experimental evaluation of body water content estimation based on complex relative permittivity measurement
3. 学会等名 BioEM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Shimazaki, Y. Kawakubo, R. Iwai, M. Fukuhara, H. Ando, J. Mitsudo, Y. Hayashi, S. Ata, T. Yokoyama, D. Anzai
2. 発表標題 A Study on Stenosis Detection Based on Non-Contact Thrill Wave Imaging and Gradient-Boosting Decision Tree
3. 学会等名 IEEE ISMICT 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 D. Anzai, R. Inuzuka, M. Kim, T. Kobayashi, M. Hernandez, R. Kohno
2. 発表標題 Fundamental MAC Performance Evaluation Under Multiple IEEE802.15.6ma BAN Co-Existence
3. 学会等名 IEEE ISMICT 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 栗原涼輔, 伊藤孝弘, 田中宏和
2. 発表標題 BAN環境におけるFDTDを用いた電波伝搬解析と伝搬損に基づいたヒトの動作判定
3. 学会等名 電子情報通信学会ヘルスケア・医療情報通信技術研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤孝弘, 中前葵, 山中仁昭, 田中宏和
2. 発表標題 LSTMを用いたSmartBANチャネル移行のための干渉予測手法
3. 学会等名 電子情報通信学会ヘルスケア・医療情報通信技術研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平松樹, 伊藤孝弘, 田中宏和
2. 発表標題 SmartBANにおける制御チャネルピーコンの衝突回避に関する実験的検証
3. 学会等名 電子情報通信学会ヘルスケア・医療情報通信技術研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 島崎拓則, 阿多信吾, 川久保芳文, 安在大祐
2. 発表標題 Personalized WBGT計を用いた新しい熱中症対策装置の開発
3. 学会等名 電子情報通信学会ヘルスケア・医療情報通信技術研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩井瑠美, 島崎拓則, 川久保芳文, 鶴本雅信, 林博之, 田蒔正治, 大塚紹, 深水圭, 阿多信吾, 安在大祐
2. 発表標題 非接触撮像による動静脈瘻(AVF)の新しい定量的測定法
3. 学会等名 電子情報通信学会ヘルスケア・医療情報通信技術研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 宏和 (Tanaka Hirokazu) (40551388)	広島市立大学・情報科学研究科・教授 (25403)	
研究分担者	朔 啓太 (Saku Keita) (40567385)	国立研究開発法人国立循環器病研究センター・研究所・室長 (84404)	
研究分担者	島崎 拓則 (Takunori Shimazaki) (80833722)	滋慶医療科学大学・医療科学部・准教授 (34451)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伊藤 孝弘 (Ito Takahiro) (00805583)	広島市立大学・情報科学研究科・助教 (25403)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関