

イトウ タカヒロ

氏 名	伊藤 孝弘
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	博第1071号
学位授与の日付	平成29年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学 位 論 文 題 目	電磁波を用いたインプラント機器の位置推定に関する研究 (A Study on Localization Methods for Implant Devices with Electromagnetic Wave)

論文審査委員	主 査	教授	王 建青
		教授	菊間 信良
		教授	平田 晃正

論文内容の要旨

現在、インプラント型の医療機器に BAN (Body Area Network) を適用することによる新しい形のアプリケーションが複数提案されている。その重要なアプリケーションの 1 つに、カプセル内視鏡検査システムが挙げられる。カプセル内視鏡とは、カメラや無線通信機を搭載したカプセル型医療機器であり、撮影された消化管内部の動画像が BAN による通信リンクを通して体外へ伝送される。カプセル内視鏡によって得られた動画像から管内出血や腫瘍が発見された場合、その治療のために撮影された位置の情報が有用となる。現在は開腹手術による治療が主流であり、開腹位置の目安として位置情報が用いられる。将来的には、腹部表面にいくつかの小さい穴を開け、そこからスコープや切除器具を入れて手術を行うことが想定されており、その場合は穴を開ける位置の目安としてカプセル内視鏡位置情報を用いる。また、熟練した医師にとっては、小腸の先端からどれだけ進んだ位置に病変部が存在するかは非常に重要な情報である。そのため、例えば高精度に推定された位置の時系列データから移動経路を求めるなど、カプセル内視鏡が進んだ距離を計算する手法も求められている。また、カプセル内視鏡の動き制御についても要求が高まっており、高度な制御を行うには高精度な位置情報が必要であることは明らかである。このような背景から、本研究はインプラント医療機器の高精度位置推定を目標とした。

インプラント機器の位置推定問題は、発する無線信号が人体中を伝搬するため、その伝搬環境が従来の無線通信システムの環境とは大きく異なり既存の位置推定技術をインプラント BAN にそのまま応用しても十分な位置推定精度を得ることができないことである。そこで、インプラント BAN における無線伝搬特性のモデルの検討として、解剖学的人体数値モデルに対する Finite Difference Time Domain (FDTD)法による電磁界解析を行い、体内を伝搬する無線信号の受信電力変動が対数正規分布、信号到来時間が正規分布という確率モデルを構築した。また、得られた確率モデルを最尤推定法や事後確率最大推定を実現するパーティクルフィルタによる位置トラッキング法に適用し、それらの位置推定精度を計算機シミュレーションによって評価を行ったところ、受信電力のみを用いる手法では、従来法の位置推定誤差が 37mm であったのに対して提案手法では 7mm の推定精度を達成した。また、さらに高精度に位置推定可能な信号到来時間を用いた位置推定法は、約 1mm の推定精度を達成した。この推定精度は、カプセル内視鏡における病状診断やカプセル内視鏡動き制御の観点では十分なレベルに達しており、インプラント医療機器による高度医療技術の実現可能性を示した。加えて、申請者はインプラント医療機器の移動経路長の推定課題も合わせて取り組んできた。推定位置の時系列情報を利用して移動経路長を算出しようとする場合、推定位置間距離の積分では推定位置誤差の影響で正確な経路長は算出できない。これに対して、申請者はカプセル内視鏡が小腸壁に当たって一定時間その場に留まる点を中継点として検出し利用する手法を開発した。計算機シミュレーションの結果、適したパラメータにおいて、5分間のトラッキングで移動経路長の推定誤差は 1.5cm 以下を達成した。

このように、高精度な位置情報の取得を研究してきたが、これらはカプセル内視鏡のように通信のために電磁波を発する BAN 機能を有するインプラント機器を対象としている。例えば、将来、制御信号を受け取るだけの手術装置等が開発されたとき、これまで提案してきた手法は BAN による通信機能を前提とするため直接適用することができない。そこで申請者は、体外から電磁波を照射し、発生する散乱電界を利用することで送信源をもたないインプラント機器に対しても適用できる位置推定法を第二の研究課題とした。一般に、散乱電界は物体の電気定数に依存しており、生体組織とアンテナやバッテリーなどの金属では顕著な差があるため、このコントラストを捉えることでインプラント機器の位置を精度良く推定する方法を検討した。その際、金属と比べ人体組織の電気定数は十分小さいことから、人体内部構造情報がスパース性（要素のほとんどが零）を有することを見出し、スパース再構成を行うことで現実的な観測数においてその位置を検出する手法を提案した。そして、計算機シミュレーションによる評価を実施した結果、人体内部構造情報はスパース性をもつことを実証し、また体内内部構造情報の未知パラメータ数より非常に少ない観測数においても 1cm の位置推定精度を達成し、本手法の有効性を示した。

論文審査結果の要旨

現在、インプラント型の医療機器にBAN(Body Area Network)を適用することによる新しい形のアプリケーションが複数提案されている。その重要なアプリケーションの一つに、カプセル内視鏡検査システムが挙げられる。カプセル内視鏡とは、カメラや無線通信機を搭載したカプセル型医療機器であり、撮影された消化管内部の動画像がBANによる通信リンクを通して体外へ伝送される。カプセル内視鏡によって得られた動画像から管内出血や腫瘍が発見された場合、その治療のために撮影された位置の情報が有用となる。また、カプセル内視鏡の動き制御についても要求が高まっており、高度な制御を行うには高精度な位置情報が必要であることは明らかである。このような背景から、本研究はインプラント医療機器の高精度位置推定を目標とした。

インプラント機器の位置推定問題は、発する無線信号が人体中を伝搬するため、その伝搬環境が従来の無線通信システムの環境とは大きく異なり既存の位置推定技術をインプラントBANにそのまま応用しても十分な位置推定精度を得ることができないことである。そこで、申請者はインプラントBANにおける無線伝搬特性のモデルの検討として、解剖学的人体数値モデルに対するFinite Difference Time Domain (FDTD)法による電磁界解析を行い、体内を伝搬する無線信号の受信電力変動が対数正規分布、信号到来時間が正規分布という確率モデルを構築した。また、得られた確率モデルを最尤推定法や事後確率最大推定を実現するパーティクルフィルタによる位置トラッキング法に適用し、それらの位置推定精度を計算機シミュレーションによって評価を行ったところ、受信電力のみを用いる手法では、従来法の位置推定誤差が37mmであったのに対して提案手法では7mmの推定精度を達成した。また、さらに高精度に位置推定可能な信号到来時間を用いた位置推定法は、約1mmの推定精度を達成した。この推定精度は、カプセル内視鏡における病状診断やカプセル内視鏡動き制御の観点では十分なレベルに達しており、インプラント医療機器による高度医療技術の実現可能性を示した。

一方、将来制御信号を受け取るだけの手術装置等が開発されたとき、これまで提案してきた手法はBANによる通信機能を前提とするため直接適用することができない。そこで申請者は、体外から電磁波を照射し、発生する散乱電界を利用することで送信源をもたないインプラント機器に対しても適用できる位置推定法を第二の研究課題とした。一般に、散乱電界は物体の電気定数に依存しており、生体組織とアンテナやバッテリーなどの金属では顕著な差があるため、このコントラストを捉えることでインプラント機器の位置を精度良く推定する方法を検討した。その際、金属と比べ人体組織の電気定数は十分小さいことから、人体内部構造情報がスパース性を有することを見出し、スパース再構成を行うことで現実的な観測数においてその位置を検出する手法を提案した。そして、計算機シミュレーションによる評価を実施した結果、人体内部構造情報はスパース性をもつことを実証し、また体内内部構造情報の未知パラメータ数より非常に少ない観測数においても1cmの位置推定精度を達成し、本手法の有効性を示した。これらの成果は学術誌論文としてフルペーパー2篇、国際会議論文5篇（全て審査有）に公表されており、よって、本論文は、博士（工学）の学位論文に値するものと認める。