

令和 3 年 5 月 6 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04123

研究課題名(和文) 高度人体ファントムを用いた体内デバイスのリアルタイム位置推定技術

研究課題名(英文) Real-time location estimation technique for in-body devices using advanced human body phantom

研究代表者

高橋 応明 (Takahashi, Masaharu)

千葉大学・フロンティア医工学センター・准教授

研究者番号：70267342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、リアルタイムにカプセル内視鏡の位置推定することを目的とし、そのアルゴリズムを開発した。体表の複数の受信アンテナの受信信号強度に基づいて距離を算出し、距離に応じた半球の交点の平均値を推定位置とする。このとき、アンテナの角度特性を考えた補正曲面を用いて、誤差の改善を図った。また、位置推定の処理の中でカプセル内視鏡の向きを判別する必要がある。この問題に対しては分散を用いた判別法を提案した。

MRI画像を素にした腹部モデルを用いて、小腸領域内の78箇所で行った。その結果、解析では92%、実測では90%で許容誤差を達成し、提案アルゴリズムの有用性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人体は複数の組織で構成されており、その電気的特性も組織により異なっている。従来、位置推定する場合は、時間または位相情報を用いており、その測定には高精度なシステムが必要な上、複雑な組織構造では位置推定誤差が大きくなる。本研究では、受信信号強度を用いるため、簡易なシステムでできる上、複雑な構造でも推定誤差が大きくなる。また、提案したアルゴリズムは、簡易なためリアルタイムで位置推定が可能である。そのため、カプセル内視鏡の位置がリアルタイムで分かるため、患部の位置がすぐに判明できる。さらに、今後、カプセル内視鏡のロボット化などに伴い、不足する電力の送電や、コントロール信号の送信などにも活用できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to estimate the position of the capsule endoscope in real time, and the algorithm is developed. The distance is calculated based on the received signal strength of multiple receiving antennas on the body surface, and the average of the intersection points of the hemispheres according to the distance is used as the estimated position. The error was improved by using a correction surface that considers the angular characteristics of the antennas. In addition, it is necessary to determine the orientation of the capsule endoscope in the process of position estimation. To solve this problem, we proposed a discrimination method using variance.

Using an abdominal model based on MRI images, position estimation was performed at 78 locations in the small intestine region. As a result, 92% of the analytical results and 90% of the measured results were acceptable, confirming the usefulness of the proposed algorithm.

研究分野：電磁波工学

キーワード：位置推定 カプセル内視鏡 電磁波 受信信号強度 人体ファントム

## 1. 研究開始当初の背景

人体埋込型医療機器として心臓ペースメーカーや除細動器、カプセル内視鏡などがあげられる。これらの体内デバイスは電源を必要とするが、永続的な電源の確保が問題となっている。カプセル内視鏡は、大きさの制限から搭載できる電池の容量が小さいため、2枚/秒程度の撮像しかできず、撮像画像の高解像度化、多枚数化などが求められている。さらに、追加機能として、姿勢制御や投薬装置、生体検査装置などが考えられており、ますます電源容量の増加が急務となっている。また、何らかの原因で体内に留置した場合、電池の有毒性が懸念されている。これらの問題を解決策として、無線電力伝送が考えられている。

無線電力伝送には、電磁誘導方式、磁界共鳴方式、レーザ方式、マイクロ波方式がある。カプセル内視鏡は体内を移動することもあり、この位置ずれ問題を克服する必要がある。そこで、位置ずれに比較的強いマイクロ波方式の検討を行っている。この方式は電力伝送だけではなく、画像信号や制御信号も同一の電波にて伝送することができるため、電力伝送用アンテナと通信用アンテナを共用でき、省スペースを実現できる。しかしながら、カプセル内視鏡のように広範囲を移動する体内デバイスに電力を伝送するためには、低演算量でリアルタイムに体内デバイスの位置を推定し、その位置に合わせて電力伝送を制御することが、電力伝送の高効率化、装置の小形化に重要となる。

電波を用いた位置推定法としては、GPSや携帯電話システムで実用化されている。どちらも自由空間内伝搬で、遠方波源からの平面波による位置推定である。また、地下埋設物探査は埋設物が不動であるため、外部アンテナを走査して精度を上げる方法などが用いられているが、カプセル内視鏡は体内を移動するため、これらの方法は使用できない。本研究では、人体組織（皮膚、脂肪、筋肉等）という伝搬経路が複数の損失媒質で構成されており、かつ波源が近傍のため球面波を取り扱うことになる上、対象物の位置が刻々と変化するという位置推定する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、カプセル内視鏡に無線電力伝送を行うため、複数の高損失媒質で構成された伝搬空間内を移動する物体の位置推定をリアルタイムで行うことを目的としている。そのため、解析的には低演算量のアルゴリズムの開発、球面波による位置推定、アンテナの角度特性の補正などが解決する課題であり、人体構造を模したリアルファントムによる検証を目標としている。本研究は、リアルタイムで体内デバイスの位置を推定するアルゴリズムの開発とそれを実現するため、小腸だけではなく胃や肝臓など周辺の組織構造も再現した高度人体ファントムを用いたシステムの開発と評価を行う。

携帯電話など自由空間での通信では、伝搬損失が小さいため受信信号強度（RSS）の変化が小さく、位相や時間遅れを用いた位置推定が行われている。人体は組織構造が部位によって異なり、伝搬速度の違いや伝搬損失も大きいため、通常の位相を用いた位置推定は行えない。逆に、伝搬損失が非常に大きいことを利用する、RSSによる位置推定が適している。また、位置推定の研究は、アンテナからは無指向性で電波が放射されているとしてアルゴリズムを開発しているものが殆どだが、アンテナの指向性も含めて位置推定を行っている研究は少ない。

本研究では、複数の組織で構成された閉鎖領域内にある体内デバイスを、複数の外部アンテナを用いて位置推定を行う。その時に、組織構造による損失の違いなどにより、RSSを基にした推定距離の交点は複数存在し、確定的な位置推定結果は得られない。また、外部アンテナの角度特性は一様ではないため、推定距離も球形とはならない。そのため、角度特性を考慮した補正を行い最終的な位置推定結果とするアルゴリズムを開発する。

## 3. 研究の方法

体外に設置したアレーアンテナを用いて、カプセル内視鏡の位置推定をするとき、RSSを距離に換算して位置を特定するが、通常は誤差のため交点が1点に収束しない。そのため、推定誤差をできる限り小さくするアルゴリズムを開発する必要がある。本研究は、大きく分けて3つの研究課題について取り組んでいく計画である。

まず、人体組織構造を、層構造とした簡易モデルにおいて、推定アルゴリズムの開発を行う。実際の体外アンテナからの放射電界強度は深さ方向、体表方向ともに一様とはならない。また、カプセルの向きが変わるとRSS強度も大きく変化し、位置推定精度が劣化する。そのため、カプセルの向きに依存しない位置推定アルゴリズムを確立する必要がある。層状ファントムを用いて実験検証を行う。

つぎの段階として、人体組織は複雑な構造をしているため、実際の組織構造モデルを用いたアルゴリズムの改善を行い、推定精度の評価を行う。小腸近辺の肝臓や胃などの組織構造における位置推定を行い、これら組織の影響を評価する。

最後に、開発した位置推定システムを確認するため、人体組織構造を正確に模擬した実験用ファントムを用いた検証実験を行う。

## 4. 研究成果

本研究では、リアルタイムにカプセル内視鏡の位置情報を特定することを目的とし、数値シミュレーション上にてアンテナの指向性を考慮した上でシンプルなアルゴリズムによって位置推定を行う。動作周波数である433.92 MHzに対応し

たヘリカルアンテナを送信アンテナとして使用し、位置推定をシミュレーションと実験で行った。

図 1 に、シミュレーションで用いたアンテナモデルを示す。受信アンテナには、先行研究で使用された 2 線アルキメデススパイラルアンテナを用いる。寸法は図に示す通りで、アンテナ素子幅 2 mm、間隔 3 mm とした。送信アンテナには、ヘリカルアンテナを基礎構造としたカプセル内視鏡用アンテナを使用した。給電部付近はインピーダンス調整のため板状とし、その胴体は厚さ 0.4 mm、幅 3.4 mm で、カプセル内部の部品ケースを約 1/3 巻く長さとなっている。またヘリカル部の導線は、カメラ側が 4 回、反対側が 2 回巻く構造となっている。アンテナ素子は全て規定の領域内に収まっている。

図 2 に、使用する人体モデルを示す。全体の寸法は 300 × 200 × 300 mm としている。また、人体組織のうち皮膚が RSS に与える影響は小さいとして、脂肪( $\epsilon_r = 11.6$ ,  $\sigma = 0.04$  S/m)、筋肉( $\epsilon_r = 57.7$ ,  $\sigma = 0.83$  S/m)のみの二層構造とした。実測では背面から給電を行うため、前面と側面のみに 20 mm の厚さの脂肪を設置した。体表面上には上下左右の端と端が 180 mm となるように等間隔に 4 つの受信アンテナを設置した。

次に位置推定範囲について説明する。 $x$ - $z$  平面に対してモデル中央から 180 × 180 mm の範囲内で 30 mm ごとに送信アンテナを設置する。 $y$ - $z$  平面に対しては、表面から 50 mm, 80 mm, 110 mm の地点に送信アンテナを設置した。全部で 7 × 7 × 3 = 147 地点で位置推定シミュレーションを行った。さらに、送信アンテナを 90° ごとに回転させ、4 種類の向きにおいてそれぞれシミュレーションを行った。

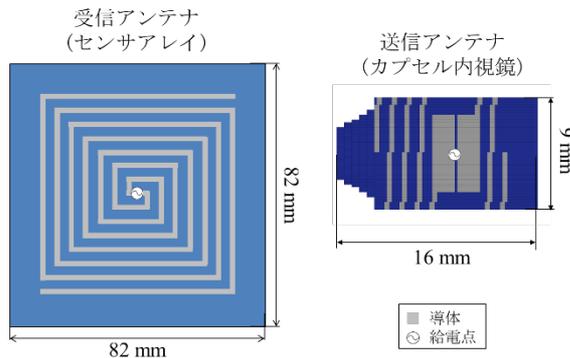


図 1 受信アンテナ及び送信アンテナ

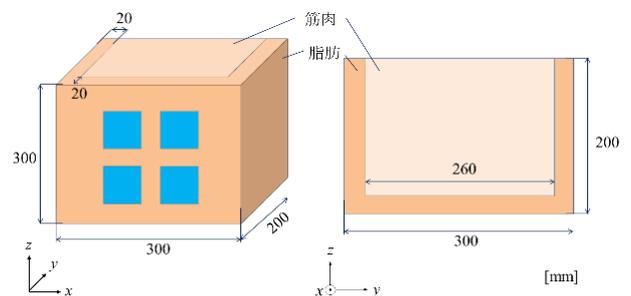
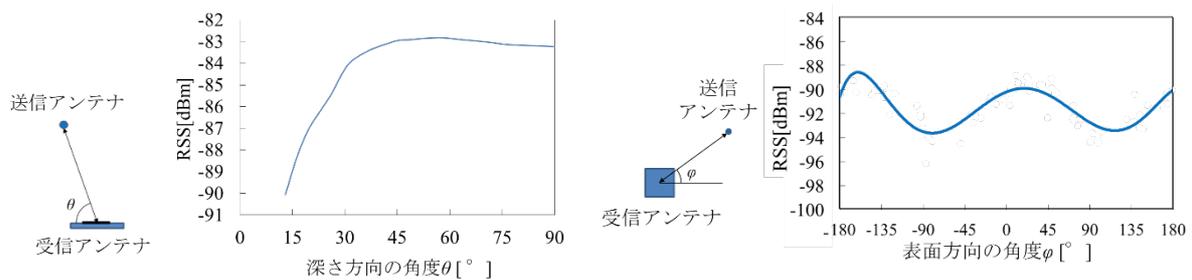


図 2 シミュレーション用人体モデル

位置推定は 4 つの受信アンテナの RSS に基づいて行われる。RSS の減衰は送信アンテナと受信アンテナの間の生体組織の厚さに依存するため、RSS からアンテナ間距離を逆算することができる。算出した距離を半径とする半球を描き、4 つの半球の交点の平均値を推定位置とする。正面以外の部分にカプセル内視鏡が設置されている際、正面の位置と比べて RSS が減衰する。これは、受信アンテナの角度特性による影響と考えられる。図 3 に示すように、角度特性は深さ方向と表面方向の二種類が存在する。アンテナは電波を送受信する際、方向ごとに送受信の強度が異なる。このことが RSS に影響をもたらす。この問題に対し、受信アンテナと送信アンテナのなす角度に応じた補正を行う。仮位置として角度特性を考慮せずに位置を求め、仮位置から角度を算出する。角度を変数とする補正曲面を用いて算出距離に乗算補正をすることで、誤差の改善を図った。



(a) 深さ方向の角度特性

(b) 表面方向の角度特性

図 3 二種類の角度特性

さらに、送信アンテナについて四種類の向きの判別を行う。送信アンテナの向きに応じて、上記の角度特性は変化するため、向きごとに異なる補正曲線が必要である。しかし、実際の環境では送信アンテナの向きを視認することができず、適切な補正曲線を選択することはできない。そのため、位置推定の処理の中で送信アンテナの向きを判別する必要がある。この問題に対して、本研究では分散を用いた判別法を提案した。具体的には 4 つの半球から作られる 4 つの交点の座標の分散値を利用する。補正が適切にできた場合、分散値は小さくなる。このことを利用して、送信アンテナの向きに応じた補正をそれぞれ並行して行い、分散値が最も小さい座標を位置推定結果として出力した。

位置推定の流れを図 4 に示す。分岐している部分は、送信アンテナの向きごとに用意されている角度補正の処理となっており、最後に分散によって判別を行う。図 5 に位置推定結果を示す。147 × 4 = 588 地点全てにおいて誤差 40 mm 以内を達成した。角度特性に対して角度に応じた補正をかけることで、位置推定精度を向上させることができた。また、送信アンテナの向きの変化に対して、分散を用いた判別法を適用することで、送信アンテナの向きに関わらず位置推定

が行えることを確認し、全地点で誤差 40 mm 以内を達成した。

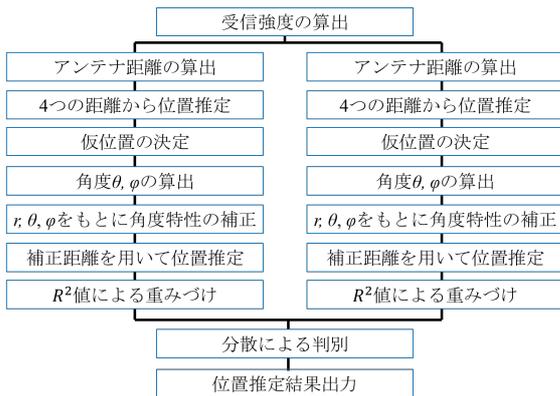


図4 位置推定の流れ

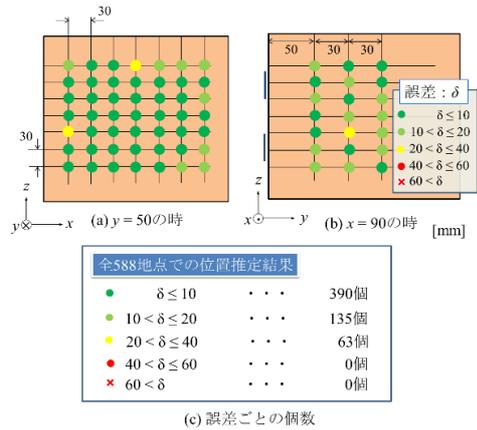


図5 位置推定結果

位置推定には脂肪と筋肉から構成される簡易腹部モデルを使用しており、簡易腹部モデルを含む位置推定モデルを図6に示す。実測で使用した送受信アンテナを図7に示す。図6に示す位置推定範囲内で送信アンテナを $x, y, z$ 軸の3つの方向に30 mm 間隔で移動させ、各位置における4つの受信アンテナの受信電力強度をそれぞれ測定した。この際、計147点で位置推定を行い、その時の実測の様子を図8に示す。

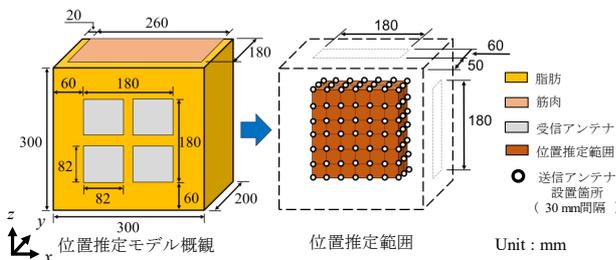


図6 位置推定モデル

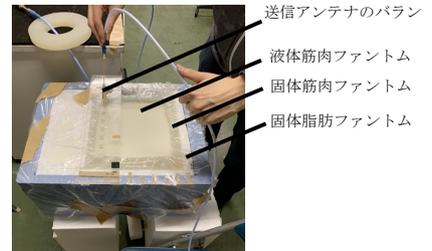
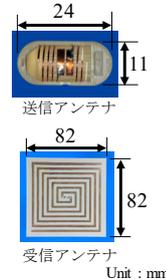


図7 送受信アンテナ 図8 実測の様子

各位置で得られた受信電力強度を用いて、送信アンテナの位置を推定した。実測と解析の各位置における許容誤差20 mm 以内であれば、実測と解析は一致するとして評価した。その結果を図9に示す。実測値と解析値の一致点数が147点中86点であり、全体の59%一致した。この原因として、送受信アンテナの指向性が解析と実測で同じでないことが考察される。

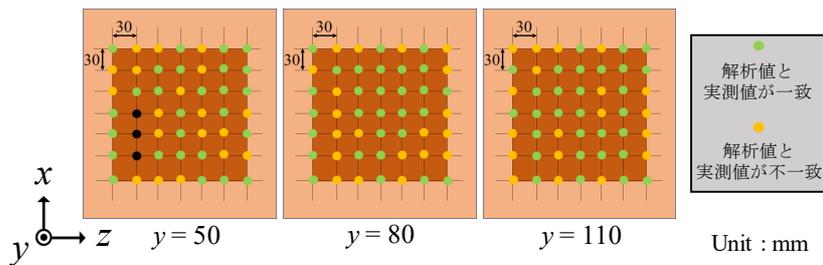
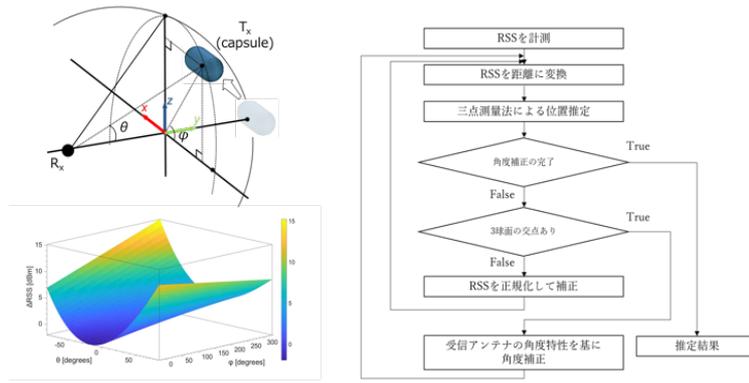


図9 実測と解析の比較

カプセル内視鏡の推定位置において、3球面の交点が存在しない場合があるため、計測したRSSの値を正規化して元のRSSに加算し交点を作成する補正を加えた。また、推定精度に影響を及ぼす要素には受信アンテナの角度特性があり、電波を受信する角度によってRSSの値が変化する。したがって、角度特性を考慮した推定精度の補正方法を提案した。カプセル内視鏡と受信アンテナ間の角度とそれに対応するRSSを曲面でフィッティングし、その数式モデルを用いて算出した推定値を補正する。実際の位置と推定位置の差を推定誤差としてアルゴリズムの性能を評価する。提案したアルゴリズムを図10に示す。

よりリアルな人体での位置推定を検証するため、人体モデルにはMRI画像を素にNICTが開発した数値人体モデルの腹部を使用した。解析モデルを図11に示す。推定箇所は小腸領域内の78箇所とした。

シミュレーションによる位置推定結果を図12に示す。全78箇所のうち、92%に相当する72箇所ですべて許容誤差40 mm 以内を達成した。誤差の平均値は19.0 mm、標準偏差は11.8である。曲面でフィッティングするRSSの補正を用いることにより、先の結果と比べて約12%推定精度が向上し、提案アルゴリズムの有用性を確認することができた。



受信アンテナの角度特性  
 図 10 曲面アルゴリズム

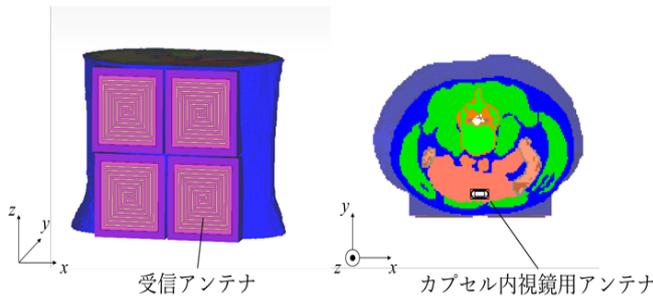


図 11 人体腹部解析モデル

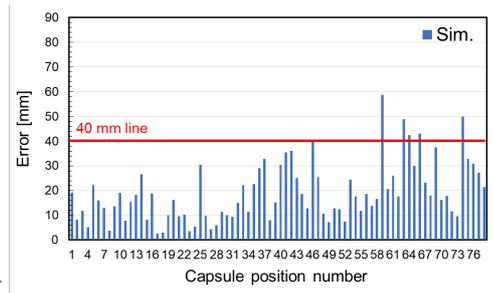


図 12 位置推定結果

このシミュレーションの有効性を確認するため、人体腹部を模擬したファントムを作製し、実験を行った。胃や大腸、筋肉、脂肪などの電気定数を模擬した固体ファントムを作成し、シミュレーションと同様に配置し、小腸は液体ファントムとして、カプセル内視鏡を自由に動かせるようにしてある。図13に実験用人体腹部ファントムの作製の様子を示す。

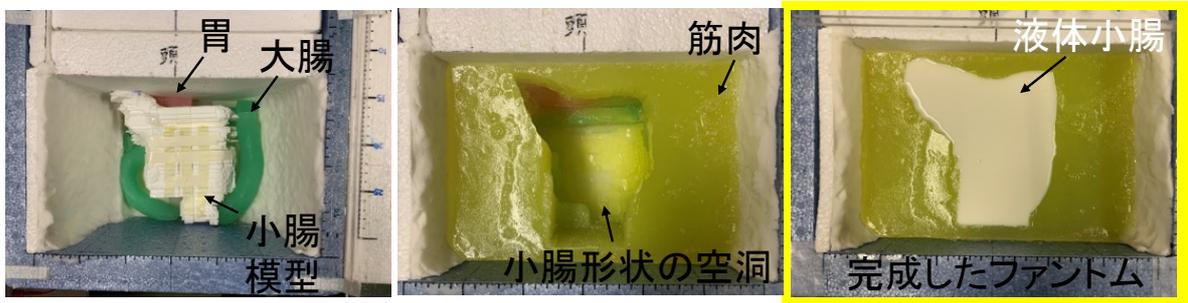


図 13 人体腹部ファントム

実測による位置推定結果を図 14 に示す。全 78 箇所のうち、90%に相当する 70 箇所です容誤差 40 mm 以内を達成した。誤差の平均値は 22.2 mm、標準偏差は 13.7 である。推定誤差は、腹部ファントムの裏面、特に筋肉、大腸、胃のファントム付近の境界面で大きく、シミュレーションと同様に電磁波の反射が原因と考えられる。また、特に誤差が大きいカプセル内視鏡の配置箇所は、受信アンテナから遠い位置にあり、アンテナの距離特性と角度特性に対して、その近くの位置よりも RSS が大きくなることが確認された。このことから、組織間の境界面での電磁波の反射の影響を受けていると判断できる。実験により、提案アルゴリズムの有用性を確認することができた。

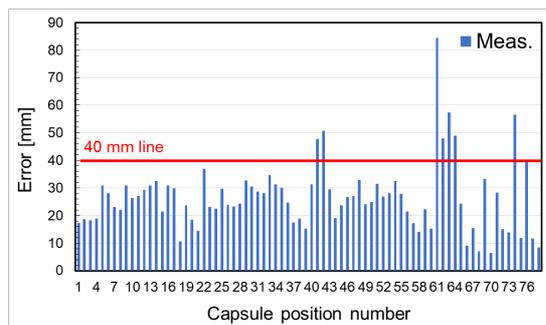


図 14 位置推定結果 (実測)

今後は、推定誤差が大きい箇所の原因となる組織間の境界面での反射波を分離し、推定精度の向上を図る。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 D.Hiyoshi and M.Takahashi	4. 巻 vol.E102-B, no.8
2. 論文標題 Localization method using received signal strength for wireless power transmission of capsule endoscope	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Commun.	6. 最初と最後の頁 1660-1667
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2018EBP3328	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 Shogo Nakamura, Kyohei Yoshida, Daijiro Hiyoshi and Masaharu Takahashi	4. 巻 vol.10, no.3
2. 論文標題 Measurement of capsule endoscopy position with the transmitting and receiving antennas for WPT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 149-154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2020XBL0176	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14件（うち招待講演 2件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 M.Takahashi
2. 発表標題 Location estimation technique for in-body devices using RSS
3. 学会等名 2019 URSI-Japan Radio Science Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S.Nakamura, D.Hiyoshi, K.Yoshida and M.Takahashi
2. 発表標題 Measurement of the localization for wireless power transmission to the capsule endoscopy
3. 学会等名 2019 International Symposium on Antennas and Propagation（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R.Sasaki and M.Takahashi
2. 発表標題 Position estimation of capsule endoscope using high-definition numerical human body model
3. 学会等名 2019 International Symposium on Antennas an Propagation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.Yoshida and M.Takahashi
2. 発表標題 Analysis of power transmission efficiency of capsule endoscope antenna
3. 学会等名 Asian Wireless Power Transfer Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村匠吾, 日吉大二朗, 吉田享平, 高橋応明
2. 発表標題 簡易腹部モデルを使用したカプセル内視鏡の位置推定の実測
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田享平, 高橋応明
2. 発表標題 カプセル内視鏡における無線電力伝送用送電アンテナの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木凜太郎, 高橋応明
2. 発表標題 高精細数値人体モデルにおけるカプセル内視鏡の3次元位置推定
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木凜太郎, 高橋応明
2. 発表標題 高精細数値人体モデルを用いたカプセル内視鏡の位置推定
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木凜太郎, 高橋応明
2. 発表標題 高精細人体モデルを用いたカプセル内視鏡の位置推定と実測
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D.Hiyoshi and M.Takahashi
2. 発表標題 Development of localization method corresponding to both polarized waves in a capsule endoscope
3. 学会等名 2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M.Takahashi
2. 発表標題 Antennas for wireless power transmission of capsule endoscope
3. 学会等名 2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D.Hiyoshi and M.Takahashi
2. 発表標題 Capsule localization method corresponding to both polarized waves for wireless power transmission
3. 学会等名 Asian Wireless Power Transfer Workshop 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋応明
2. 発表標題 人体内アンテナ
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村匠吾, 吉田享平, 高橋応明
2. 発表標題 カプセル内視鏡への無線電力伝送のための位置推定の実測
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------