

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：16201
研究種目：若手研究
研究期間：2019～2021
課題番号：19K14991
研究課題名（和文）超広帯域インパルス無線を用いた車内高信頼性医療センサシステムの開発に関する研究

研究課題名（英文）Development of In-vehicle high reliability medical sensor system using ultra wideband impulse radio

研究代表者
李 鯤（Li, Kun）

香川大学・創造工学部・助教

研究者番号：10806483
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：車内高信頼性医療センサシステムの開発を実現するため、広帯域パルス信号を車筐体内に伝搬する際に、生体組織の周波数分散特性を含めたパルス伝搬の高精度な電磁界解析アルゴリズムを構築できた。解析結果より、車内到来波角度が30度以上の場合、電力遅延広がりの変化率が40%以下となることが確認された。さらに、実際の超広帯域アンテナを試作し、運転姿勢を持つ人体のシャドウィング影響を考慮した車内伝搬測定を実施した。頭、胸、手首、足など人体のさまざまな部分に装着した受信アンテナは、車筐体に設置した送信アンテナとの偏波不整合によって大きい遅延拡散を確認でき、電磁界解析と同様にアンテナの場所依存性が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
高速鉄道車両や航空機における屋内無線LANシステムを評価する際、レイトレーシング法と有限時間領域差分法が挙げられる。しかし、幾何光学近似法の解析精度や、時間領域解析法の計算規模などの問題点が存在する。本研究では、これまでの手法とは大きく異なり、電磁界・伝搬アルゴリズムを融合する高精度な時間領域の解析手法を用い、生体組織の周波数分散特性を考慮した汎用性が高い車内無線伝搬パラメータについて検討した。さらに、実車内環境におけるUWB伝搬実験の実施によって解析アルゴリズムの妥当性検証を行うことによって、極端な電波利用環境における新たな医療センサシステムの構築に資することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：To develop an intra-vehicle medical wireless system for providing driver health emergency services using ultra-wideband signals, a numerical algorithm for electromagnetic field analysis with high accuracy was constructed for pulse propagation including the frequency dispersion characteristics of the human tissue. An in-vehicle propagation measurement using prototyped ultra-wideband antenna has been carried out considering the shadowing effect of the human body with a typical driving posture. When the receiving antenna attached to various parts of the human body such as the head, chest, wrists, and feet, a relatively large delay diffusion due to the polarization mismatch with the transmitting antenna installed in the car housing is confirmed. The spread of the power delay decreased monotonically as the result of the position of the receiving antenna changing from the upper body to the lower body, corresponding well with the analytical results using the developed numerical algorithm.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：広帯域インパルス 電磁界解析 伝搬モデル 人体影響

1. 研究開始当初の背景

警察庁交通局の資料によると、高齢運転者による死亡事故件数の要因の一つとしては、脳・心等の慢性疾患で運転中の操作不能となった交通事故の多発が指摘されている。運転者健康問題に起因する交通事故を防止するため、高品質な生体データをリアルタイムで観測する車内無線通信技術の開発が注目されている。運転者の体に装着した各種バイタルセンサにより、安全運転に影響を及ぼす生体データを収集し、さらに、車体内側に設置したアクセスポイントから運転者周辺エリアにおける無線信号を探索して生体情報を監視する。これにより、急性な健康状況を検出することで、自動運転介入や車車間通信などの緊急措置を開始できる。このような緊急サービスを起動するまでの許容時間が短いため、既存のセルラーや無線 LAN システムとは大きく異なり、高品質な無線データ通信に対してより一層厳密な仕様が求められる。しかし、中空の金属車体が多重波反射フェージングを引き起こし、人体や車内設備の遮蔽(シャドウイング)により無線伝送品位が大きく劣化するため、高信頼性無線通信の実現が極めて困難である。

2. 研究の目的

本研究では、超広帯域インパルス無線技術を用い、運転者緊急サービスを提供できる車内高信頼性医療センサシステムの開発に関する研究を目的とする。運転姿勢を持つ数値人体モデルと詳細な自動車筐体に対し、独自に開発した 3 次元車内多重波反射を忠実に再現できる高精度な時間領域電磁界解析技術を適用することで、人体近傍の生体センサに対する伝搬通信路をモデル化する。これにより、医療 IoT 技術の飛躍的な発展を促進し、高度な緊急医療サービスの提供を通じて安全運転社会を実現できるよう貢献する。

3. 研究の方法

車内における UWB インパルス電磁界の高精度な伝搬シミュレーション技術と組み合わせ、車筐体と人体による影響を考慮した最適な伝搬通信路のモデル化が可能なアルゴリズムを開発する。電磁界の散乱理論との比較により、高精度・高速化した電磁界解析手法の有効性を検証する。また、UWB 信号パルスが実際に車内で伝搬様子をシミュレーションし、電磁界解析アルゴリズムの検証及び解析精度に影響する計算条件などの仕様を決定する。さらに、実車内 UWB 伝搬実験を行い、人体遮蔽・多重波フェージングを考慮した高精度な車内パルス伝搬メカニズムを解明し、遅延広がり等の伝搬特性を明らかにする。

4. 研究成果

図 1 に周波数依存型 FDTD 法を用いて数値人体モデル近傍における広帯域パルス電磁界の解析方法と UWB 到来波信号の電力遅延特性を導出するまでの流れを示す。まず、高速逆ラプラス変換及び Prony 法を組み合わせた手法[1]を用いて、4 項の Cole-Cole 分散モデルに適用できる周波数依存型 FDTD 法を開発した。4 項 Cole-Cole 分散モデルの式は以下となる：

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} + \sum_{i=1}^4 \frac{\Delta\chi_i}{1+(j\omega\tau_i)^{1-\alpha_i}} \quad (1)$$

上式の構成関係をマクスウェルの方程式に代入し、電束密度 D は以下となる。

$$\mathbf{D}(\omega) = \epsilon_0\epsilon_r(\omega)\mathbf{E}(\omega) = \left(\epsilon_0\epsilon_\infty + \frac{\sigma}{j\omega} + \epsilon_0\sum_{i=1}^4\chi_i(\omega)\right)\mathbf{E}(\omega) \quad (2)$$

ここで、 χ は i 番目の電気感受率を示す。

$$\chi_i(\omega) = \frac{\Delta\chi_i}{1+(j\omega\tau_i)^{1-\alpha_i}} \quad (3)$$

なお、周波数領域における電気感受率(X)を複素周波数領域に変更し、FILT (fast inverse Laplace transform) によって数値的に時間領域インパルス応答に変換される。最後は、z 領域のインパルス応答のパラメータが、Prony 方法を使用して抽出する。

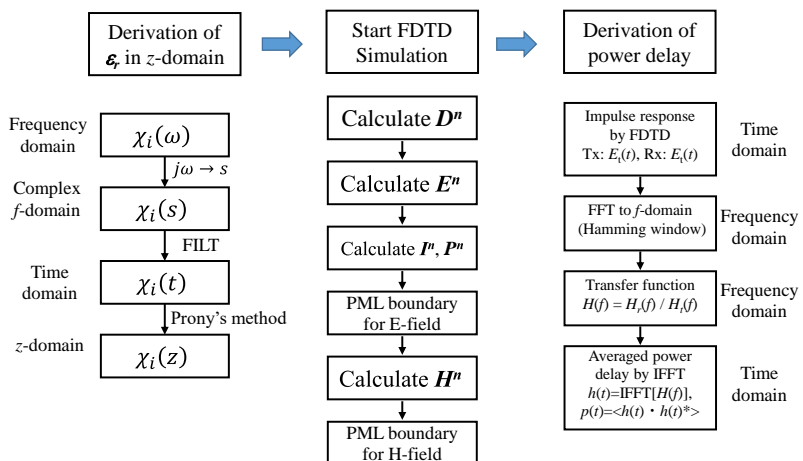


図1 パルス電磁界の解析方法と電力遅延特性を導出するながれ

これによって、UWB 領域における人体組織の周波数分散特性を考慮した FDTD 解析を行い、体内外における電磁界を計算する。さらに、受信点におけるインパルスチャネル応答の信号処理によって、平均電力遅延プロファイルの導出ができた。

図 2 に UWB パルス電磁界の解析例を示す。まず、解析手法の妥当性検証として、人体頭部とシートバックで構成した簡易モデルに対する FDTD 解析を行った。車内設置したアクセスポイントから、運転姿勢を持つ人体の頭部に装着したバイタルセンサへ UWB 信号を送信されるシナリオを模擬した。数値人体モデルは NICT が開発した「TAR0」の頭部だけのモデルを用いた[2]。ここで、シートバックの影響を模擬するため、後頭部から 1cm の位置に完全導体で構成した金属の板を設置した。解析条件として、FDTD 解析領域は $166 \times 156 \times 172$ 、解像度は 2mm、PML は 8 層である。入射波源は平面波、最大振幅 1V を有する 2 次微分ガウシアンパルス[3]として与えることによって、3.1-10.6GHz 帯において最大の電磁エネルギーを確保した。時間ステップ幅を 3.85ps とし、計算ステップ数は 5000 である。受信点 Rx は左耳からの離隔距離を d 、仰角及びアジマス方向の到来波角度を θ と ϕ 、入射電界は垂直偏波とした。

図 3(a) と (b) では、最小値に規格した電力遅延広がり と 離隔距離 d 、およびパルス到来波角度 θ の関係を表している[4][5]。図 1 に示した方法より、FDTD 解析で取得した主偏波電界成分を受信信号として、電力遅延プロファイル $p(\tau)$ はインパルス応答 $h(\tau)$ を用いて算出した。

$$p(\tau) = \langle h(\tau) \cdot h(\tau)^* \rangle \quad (4)$$

ここで、 $h(\tau)$ は送受信電界から導出した伝達関数の逆フーリエ変換であり、 z 軸における $\pm 20\text{mm}$ の範囲内での複数受信点の平均値を表している。UWB 信号を有効周波数成分に制限するため、周波数領域ではハミング窓関数を適用し、送受信電界のフーリエ変換は 2 次微分ガウシアンパルスの周波数成分が支配的である 14 GHz 未満の周波数で抽出した。電力遅延に関するチャネルパラメータを式(5)～(7)により導出できる。

$$\tau_m = \frac{1}{P_R} \int_0^\tau \tau p(\tau) d\tau \quad (5)$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{1}{P_R} \int_0^\tau (\tau - \tau_m)^2 p(\tau) d\tau} \quad (6)$$

$$P_R = \int_0^\tau p(\tau) d\tau \quad (7)$$

ここで、 τ_m は平均遅延時間 (ns)、 σ_τ は遅延延広がり (ns)、 P_R は平均受信電力 (W) である。

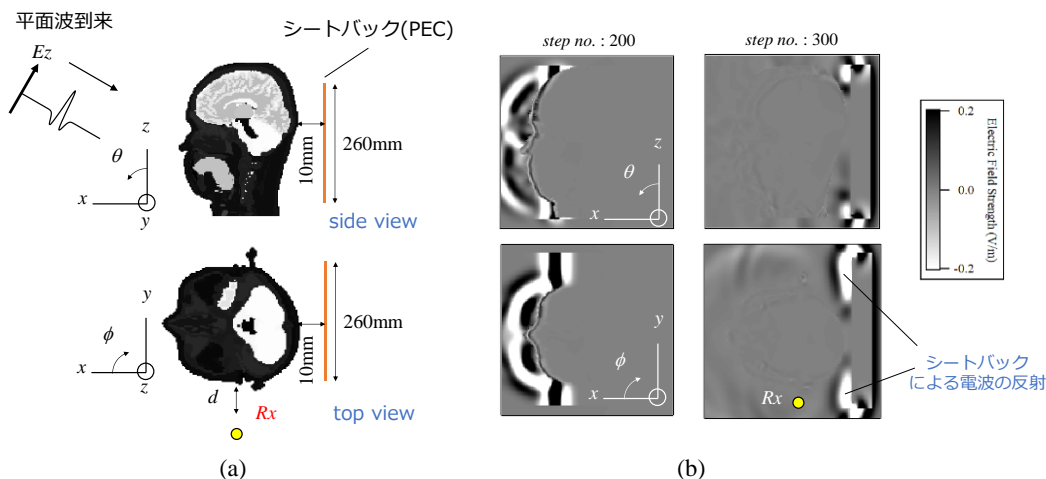


図2 UWB周波数におけるパルス電磁界解析 (a) 解析モデル (b) xz 平面 ($\phi=0$ 度) での電界分布

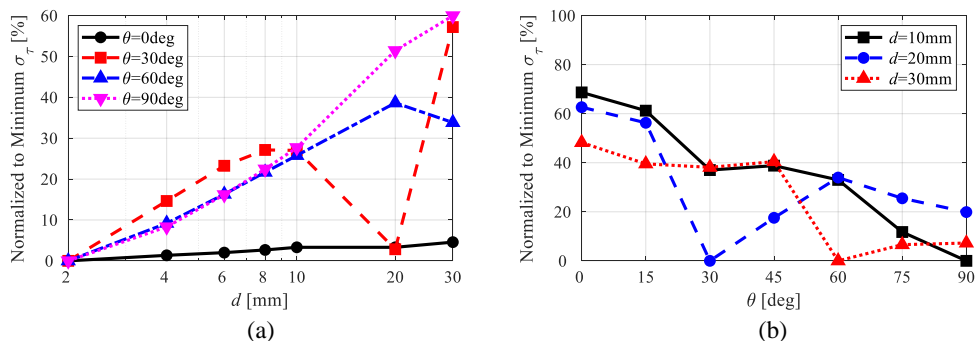


図3 遅延広がり vs. (a) 離隔距離 d (b) パルス到来波角度 θ

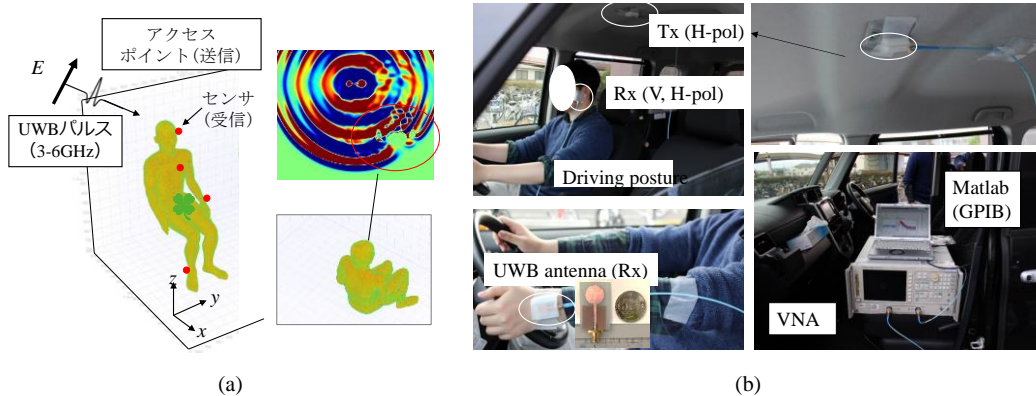


図4 人体影響と偏波を考慮した車内UWBパルス伝搬特性の評価 (a) 解析 (b) 実測

図2より、シートバックによって引き起こされる強い電界反射が確認でき、受信点 Rx での電力遅延に影響を与える可能性が確認した。図3より、受信点は人体表面から離れることによって、遅延広がりが最大60%程度まで増やしたことが明らかとなった。また、入射角度の増加によって、遅延広がりが減少する傾向を示しており、30度以上の場合、変化率は40%以下になるため、離隔距離や入射角度の依存性が小さくなることがわかった。

図4では、3~6GHz帯で動作するUWBディスクモノポールアンテナを試作し、運転姿勢を持つ人体のシャドウィング影響を考慮した車内伝搬測定および解析を行った[6]。送信アンテナは車内のルーフトップに取り付けられ、受信アンテナは、頭、胸、手首、足など人体のさまざまな部分に装着し、ベクトルネットワークアナライザを使用して送受信アンテナ間の伝達関数を取得した。フーリエ変換によるチャネル応答の処理に基づいて、各チャネルの電力遅延プロファイルを取得した。図5は遅延広がりの結果である。人体に装着した垂直偏波の受信アンテナは、送信アンテナとの偏波ミスマッチにより、より大きな値の遅延拡散を示す。また、受信アンテナの位置が上半身から下半身(足)に変わると、遅延の広がりは単調に減少し、最終的には水平偏波を持つ受信アンテナよりも小さくなることがわかった。これはマルチパス反射と人体シャドウィング効果の総合影響による結果であり、車内UWB無線チャネルの特性に大きなインパクトを与える可能性があることが確認した。人体影響と車内伝搬環境を克服する超広帯域アンテナの開発と無線通信品位の更なる向上は今後の課題である。

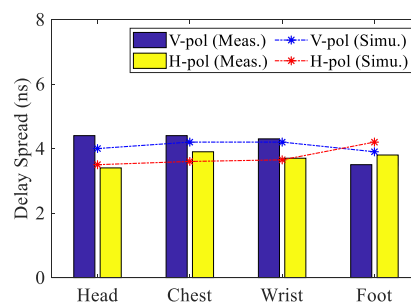


図5 遅延広がり解析と実測結果

参考文献

- [1] J. Chakarothai, S. Watanabe, and K. Wake, "Numerical Dosimetry of Electromagnetic Pulse Exposures Using FDTD Method", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 66, no. 11, pp. 5397-5408, Oct. 2018.
- [2] T. Nagaokal, et al., "Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry", Phys. Med. Biol., vol. 49, no. 1, pp. 1-15, 2004.
- [3] Q. Wang, T. Tayamachi, I. Kimura, and J. Wang, "An On-Body Channel Model for UWB Body Area Communications for Various Postures", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 57, no. 4, pp. 991-998, Apr. 2009.
- [4] 李鯤, チャカロタイジェドヴィスノブ, 藤井勝巳, "FDTD法を用いた人体近傍UWB信号の到来波電力遅延特性解析", 信学会2020年ソサイエティ大会, No. B-19-7, Sep. 2020.
- [5] K. Li, J. Chakarothai, and K. Fujii, "FDTD analysis of pulsed electromagnetic fields for intra-vehicle UWB radios using a voxel human head model", International Conference on Emerging Technologies for Communications, Session H1-1, Tokyo, Dec. 2020.
- [6] K. Li, "Experimental Study of Intra-Vehicle Ultra-Wideband Propagation Channels with Human Body Effects", International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, Xuzhou, China, Jul. 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 李鯤, チャカロタイジェドヴィスノプ, 藤井勝巳
2. 発表標題 FDTD 法を用いた人体近傍UWB 信号の到来波電力遅延特性解析
3. 学会等名 電子情報通信学会2020年ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kun Li, Jerdvisanop Chakarothai, Katsumi Fujii
2. 発表標題 FDTD analysis of pulsed electromagnetic fields for intra-vehicle UWB radios using a voxel human head model
3. 学会等名 International Conference on Emerging Technologies for Communications 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kun Li
2. 発表標題 Experimental Study of Intra-Vehicle Ultra-Wideband Propagation Channels with Human Body Effects
3. 学会等名 2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (国際学会)
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
---------------------------	-----------------------	----

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