

# 2.4GHz 帯ウェアラブル二次元通信シートの ヌル点簡易位置推定を目的とした円形モデルの提案

M2019SC014 宇田伊吹

指導教員：藤井勝之

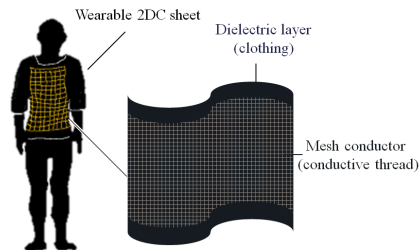
## 1 はじめに

着用することを想定したウェアラブルネットワークが研究されている。「ウェアラブル二次元通信シート (Wearable 2DC sheet)」などと呼ばれ、図 1(a) のように衣服などの柔軟な素材を二次元伝送路とし、導電糸という特殊な糸でメッシュ状に編み込むことで、衣服を給電及び通信の媒体とする。図 1(b) のように、ウェアラブル二次元通信シートは、メッシュ層 (上面)、誘電体層、メッシュ層 (下面) の三層構造をとり、先行研究では、受信機を鉸型コネクタに取り付けて、シートにピンバッジのように付き刺して使用することが提案されている [1]。このウェアラブル二次元通信シートは、全身に触覚を提示するためのスーツへの応用も検討されており、XR と組み合わせると、没入感の高いエンターテインメントの実現が期待されている。

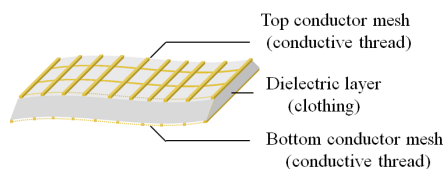
ウェアラブル二次元通信シートは低い周波数帯 (MHz 帯) で使用することが検討されているが、今後高速大容量の通信ニーズが生じ、マイクロ波が使用された場合は、衣服に対して十分に小さい間隔で定在波が生じ、ヌル点が点在することが予想される。そこで本稿では、マイクロ波が使用され、ウェアラブル二次元通信シートが着用された際を考慮し、マイクロ波を代表して 2.4 GHz 帯で Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法を用いたシミュレーションを行い、「人体近傍」及び人間の動作による「シート変形時」を想定したヌル点の分布を二次元平面で視覚的に明らかにする。そのうえで、それらの結果を踏まえて、受信機の電界強度が安定して得られるように、ウェアラブル二次元通信シートの端部及び導電性刺繍を円形化し、簡易に推定可能なヌル点の領域の形状を検討する。また、本稿で示すヌル点の形状により、解析的手段・簡易的手段の双方においてヌル点の位置を簡易に推定できることを論述する。さらに、適切な刺繍量で安定した電界強度を得られるように、刺繍密度の異なる複数のモデルを比較する。

## 2 FDTD 法によるヌル点の視覚化

本章では、ウェアラブル二次元通信シートのヌル点を視覚化する際の各種シミュレーション設定を示す。本稿は、FDTD 法の市販電磁界解析シミュレータである XFDTD ver. 7.8.0.2 を使用し、ウェアラブル二次元通信シート上の電界強度分布を算出し、他の領域に比べて電界強度が相対的に低いヌル点の領域を視覚化する。図 2 に、Computer-Aided Design (CAD) を用いて作製した解析モデルを示す。解析モデルは、厚さ 1.6 mm、一辺 157 mm である。また、メッシュの間隔は 5 mm、ラインの幅は 1 mm とする。図 1(b) と同様に、メッシュ層 (上面)、誘電体の層、メッシュ層 (下面) の三層構造になっている。メッシュ層



(a) ウェアラブル二次元通信シート



(b) 二次元通信シートの構造

図 1 二次元通信シートのウェアラブル応用

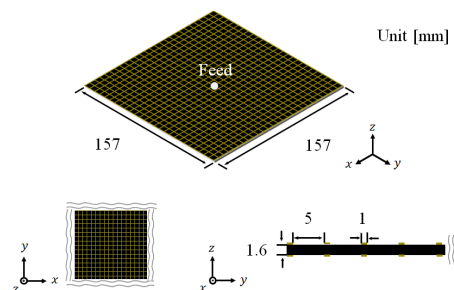


図 2 解析モデル

は完全導体に設定し、吸収境界条件は全面を PML7 層にする。中央の給電点から入力電力 1 W で正弦波を印加して、誘電体層中央面における電界強度の振幅の分布を算出し、ヌル点の位置を評価する。周波数は、産業科学医療用 (ISM) バンドのマイクロ波帯の 1 つである 2.4 GHz 帯の中心周波数 2.45 GHz とする。

## 3 着用時を考慮したヌル点の評価

「ウェアラブル二次元通信シート」は着用して利用することを考慮し、本章では「人体近傍」及び人間の動作による「シート変形時」を想定したヌル点の位置を二次元平面で視覚的に明らかにする。3.1 節では、リアル数値人体モデルを用いて「人体近傍」の電界強度の分布を算

出している。3.2節では、人間の動作によりシートが変形した際を考慮し、曲面モデルの電界強度分布を比較する。3.3節では、着用時のヌル点の挙動を踏まえ、推定可能なヌル点の形状を検討する。

### 3.1 「人体近傍」におけるヌル点の評価

まず、平均日本人男性の全身モデルであるリアル数値人体モデル [2] を用いて、「人体」に起因する電界強度分布の変化を示す。図3のようにウェアラブル二次元通信シート近傍に、リアル数値人体モデルを配置し、人体の有無に起因するヌル点の位置の変化を明らかにする。本シミュレーションにおいては、誘電体の層はスウェットシャツの繊維である綿の電気定数 ( $\sigma = 0 \text{ S/m}$ ,  $\epsilon_r = 3.0$ ) に設定した。また、ウェアラブル二次元通信シートの下に他の衣服を着用することを想定して、腹部とシートの最小距離を  $2 \text{ mm}$  とする。

図4に人体の有無に起因するヌル点の位置の差異を示す。図4(a)はリアル数値人体モデル非配置時、(b)はリアル数値人体モデル配置時の電界強度分布である。入力電力は  $1 \text{ W}$  とし、電界強度の最大値を  $0 \text{ dB}$  に規格化してある。リアル数値人体モデルの存在により、電界強度が全体的に低下し、 $-40 \text{ dB}$  を下回るヌル点の領域が拡大したことが分かる。また、ヌル点の位置の形状自体は変化しないことが確認できる。よって、着用時は、ヌル点だけではなく、ヌル点近傍においても受信機が動作しなくなるおそれがあるが、ヌル点から十分に離れた位置に置いた場合は  $-40 \text{ dB}$  を下回らず、安定した電界強度が得られると考えられる。

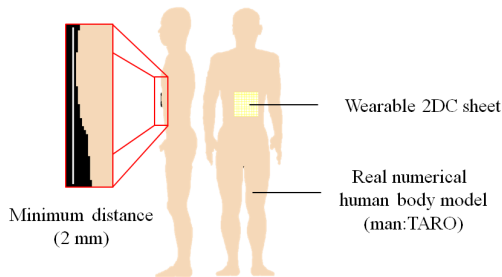


図3 リアル数値人体モデル [2]

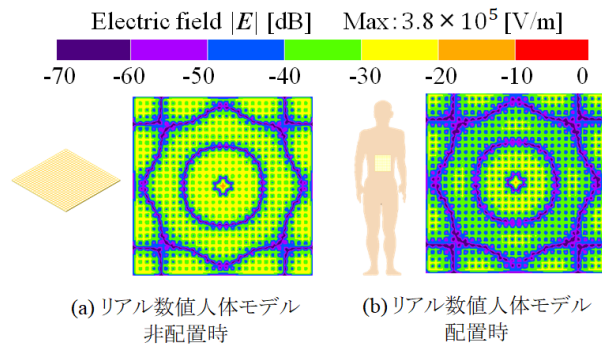


図4 「人体近傍」のヌル点の位置の差異

### 3.2 「シート変形時」のヌル点の評価

3.1節に加えて、ウェアラブル二次元通信シートの着用時は、人間の動作等によりシートが変形することが想定される。先行研究においては、下面がグラウンド導体面のウェアラブル導波路の変形で、ヌル点の位置が移動することが報告されている [3]。本研究では上面・下面がメッシュ状のシートに対して、ヌル点の位置の変化を視覚的かつ二次元平面で明らかにする。図1(b)のウェアラブル二次元通信シートを  $x$  軸方向に  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  の角度をつけた曲面モデルをそれぞれ図5(a), (b), (c)に示す。3.1節と同様に、シミュレーションモデルの誘電体の層はシャツの繊維である綿の電気定数 ( $\sigma = 0 \text{ S/m}$ ,  $\epsilon_r = 3.0$ ) に設定した。

図6(a), (b), (c), (d)に  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  の角度をつけた曲面モデル及び平面モデルのヌル点の位置の差異を示す。結果より、シートを変形しても、3.1節と同様に、ヌル点の領域の形状自体は変化しないことが確認できる。次に、ヌル点の位置の移動を確認するために、図7のように給電点を通る  $x$  方向の電界強度を1次元で取り出したグラフを示す。各曲面モデルは、平面モデルのヌル点の形状を保ったまま左右に移動していることが分かる。よって、ヌル点の領域の形状さえ分かれば、ウェアラブル二次元通信シートを着用し、人間の動作等によりシートが変形した状態でも、腹付近においては安定した電界強度が得られると考えられる。

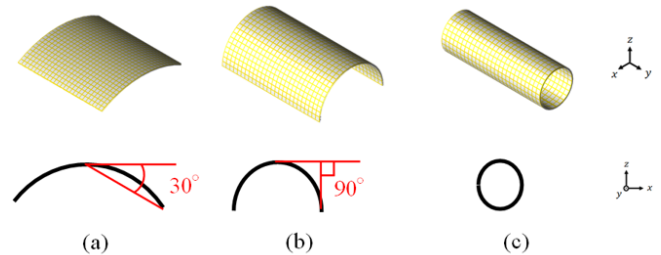


図5 曲面モデル

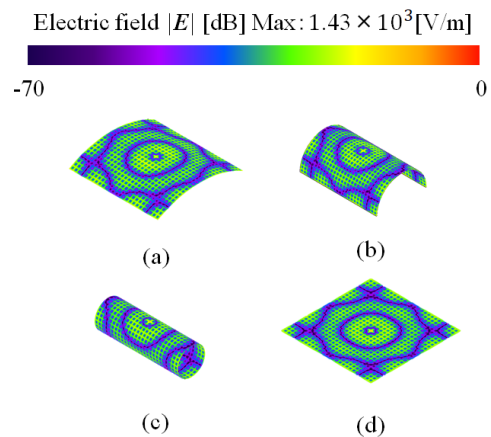


図6 「シート変形時」のヌル点の差異

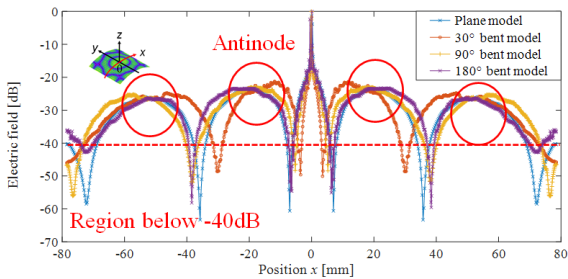


図7 「シート変形時」の1次元出力

### 3.3 着用時を踏まえた推定可能なヌル点の検討

3.1節, 3.2節より, 「人体近傍」及び「シート変形時」はヌル点の形状自体が大きく変化しないことが確認できた。よって, 着用以前にヌル点の形状を検討しておくことで, 安定したヌル点の位置が得られると考えられる。ヌル点の形状は, 開放端部及びメッシュの形状に依存する定在波であり, 3.1節及び3.2節の簡易的なヌル点の推定は困難である。そのため, ヌル点の形状を適切に変化・推定できるようにして, ヌル点の位置を簡易に推定可能なモデルを検討する。推定困難な要因は, 中央の給電点から開放端部までの光学的距離が方向により異なり, 入射波に対する反射波の到来時間が一定ではないことに起因すると考えられる。そこで, 次章では本稿の提案事項である, 「給電点から開放端部までの光学的距離を一定にすること」を検討する。

## 4 モデルの形状及び刺繍の円形化

前述の問題を解決するため, 本章では, モデルの形状と刺繍(メッシュ層)を円形にすることで, 給電点を中心とした円対称のモデルにし, 給電点から開放端部までの光学的距離を一定にすることを提案する。提案モデルを図8に示す。モデルは, 厚さ1.6 mm, 半径55 mmの円板である。また, 同心円のラインの間隔は5 mm, ラインの幅は1 mmとし, 中心から放射状に24本のラインを作製し, メッシュを形成する。図1(b)と同様に三層構造となっており, 上面と下面は完全導体に設定する。誘電体層は,  $\sigma = 8.8 \times 10^{-3}$  S/m,  $\epsilon_r = 3.6$ に設定した。図8の給電点から入力電力1 Wで, 周波数2.45 GHzの正弦波を印加して, 誘電体層中央面における電界の振幅の分布を出力する。

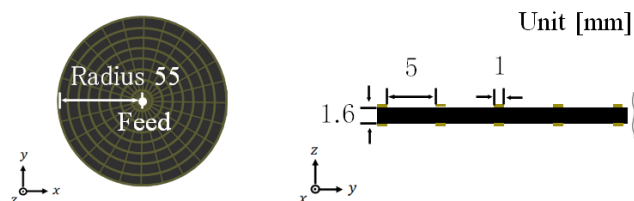


図8 円対称の提案モデル

## 5 モデルの円形化によるヌル点の評価

図9において, 従来のモデル及び提案モデルの電界強度分布を比較する。ただし, 最大値と比較して-40 dB以下をヌル点の領域とする。図9(a)は従来のメッシュ, (b)は提案メッシュにおける電界強度分布である。結果より, モデルの形状及びメッシュを円形化すると, ヌル点の形状は, 給電点を中心とした同心円になることが分かる。また, 腹の部分も同心円となるため安定した電界強度を得るには都合が良いと考えられる。

よって, ヌル点の領域が給電点からの距離に依存する性質を利用して, ベッセル関数により電界強度  $E(r)$  で表せる微分方程式を解析的に解くことのみでヌル点の領域が求まる。また, 実用上においては, 使用以前にヌル点あるいは非ヌル点を一か所特定しておくことにより, 給電点から同一距離  $r$  にあるすべての箇所で伝送効率が低下または安定した電界強度を得られることが容易に推定可能となる。また, ヌル点の形状は, 「人体近傍」や「シート変形」などの条件で変化しないという結果から本推定は, ウェアラブル応用として着用時有効と考えられる。

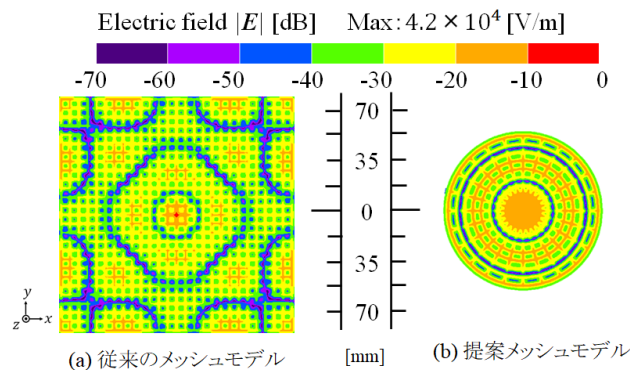


図9 提案モデルにおけるヌル点の位置

## 6 円形モデルの刺繍密度の検討

本研究が提案する円形モデルは, 同心円の刺繍(ライン)と中心からの放射状の刺繍(ライン)を衣服に編み込み実現する。導電性刺繍は高価であることに加え, 柔軟性の観点から刺繍量は少ないほうが望ましい。先行研究では, 同様の刺繍構造をもつ衣類型アンテナで検証を行い, 刺繍密度を変化させることにより放射レベルに差異が生じることが報告されている [4]。そこで本研究では, 円形モデルの刺繍密度により電界強度分布が変化することを想定し, 刺繍密度の異なる複数のモデルで評価を行う。図10のように中心からの放射状刺繍のライン数を変化させたモデルを作製する。放射状ライン数は  $n = 5m + 9$  ( $0 \leq m \leq 8$ ) とし, 放射状ライン数が  $n$  本のモデルを model  $n$  と名づける。各放射状ラインは等間隔で配置し, 同心円ライン数を含む各種設定は4章と同様に設定する。このモデルを使用し, 円形型ヌルの数, 非ヌル点の電界強度を評価する。

まず, 推定する円形型ヌルの数を減らすことを目的として, 放射状ライン数に対する円形型ヌルの数を評価す

る。円形型ヌルの定義は、電界強度-42 dB以下が連続する円形の領域とする。図11に放射状ライン数に対する円形型ヌルの数を示す。円形型ヌルの数は、Model 9とModel 14は3つ、その他モデルは2つという結果になった。よって、推定する円形型ヌルの数及び刺繍量の双方を減らすには、本検証モデルの中では放射状ライン数19が最適であると考えられる。

最後に、非ヌル点に注目して、各モデルの電界強度の範囲を調べる。非ヌル点は、最大値と比して-42 dB以上でライン上に存在する点を考える。図12に各モデルに対する非ヌル点の電界強度を示す。結果より、Model 9及びModel 14は-35 dB以上の領域を含むが、その他モデルは放射状ライン数に依存せず、一定の範囲となった。図11で示す結果と合せて、放射状ライン数を19以上は、同等の円形型ヌル及び非ヌル点の電界強度を持つ。よって、放射状ライン数を19まで減らすことにより、刺繍量の削減が可能である。

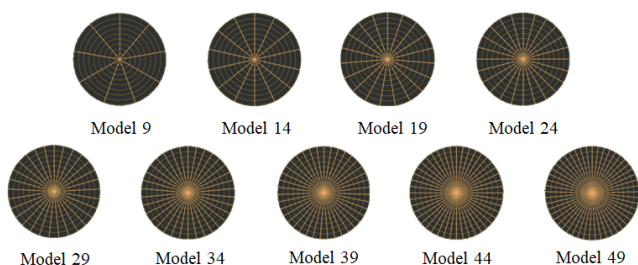


図10 放射状ライン数の異なるモデル

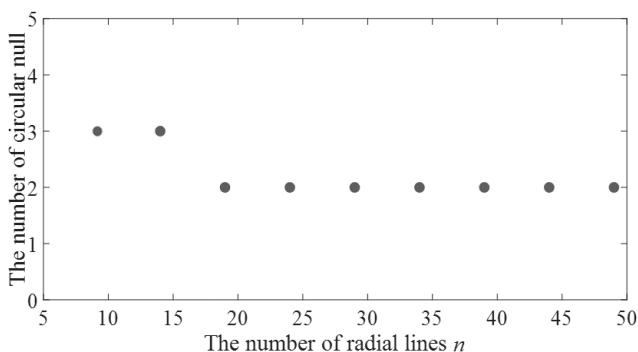


図11 放射状ライン数ごとの円形型ヌルの数

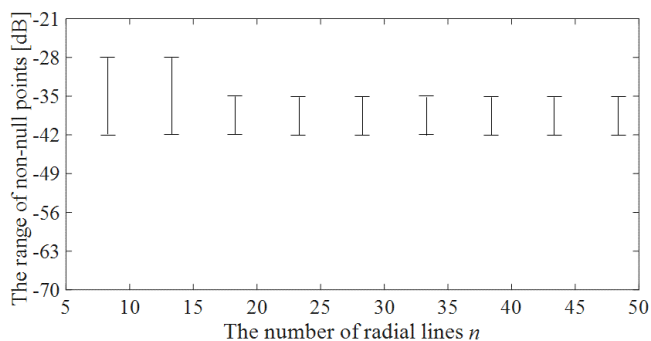


図12 放射状ライン数ごとの非ヌル点の電界強度

## 7 おわりに

本稿では、マイクロ波使用時のウェアラブル二次元通信シート上に生じるヌル点の位置の簡易推定を目的として、従来から用いられているメッシュ状の刺繍を円形化することを提案した。はじめに、FDTD法により、着用時を想定した「人体近傍」及び「シート変形時」の電界強度分布の算出を行った。その結果、ヌル点の領域の拡大や位置の移動が確認されたものの、形状自体は変化しないことが分かった。これを踏まえて、シートの開放端部及び刺繍を円形化することにより、給電点から開放端部までの光学的距離を一定にし、ヌル点の形状を円形とした。これによりヌル点の位置は給電点からの距離のみに依存するため、ベッセル関数を用いて電界強度  $E(r)$  で表せる微分方程式を解析的に解くことのみでヌル点の領域が求められることができる。また、実用上においては、使用以前にヌル点あるいは非ヌル点を一か所特定しておけば、給電点から同一距離にあるすべての箇所での伝送効率が低下または安定した電界強度を得られることが容易に推定可能となる。最後に、円形モデルの放射状ライン数を検討し、放射状ライン数19以上のモデルは同等の円形型ヌル及び非ヌル点の電界強度を持つことが分かった。よって、円形モデルにおける放射状ライン数を19まで減らすことにより、刺繍量の削減が可能であることを示した。今後は、円形化によるカバー領域の減少や給電点位置の制約等の改善を検討する。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、ご助言を下された本学部の野田聡人准教授に感謝致します。

## 参考文献

- [1] 野田聡人, 田島優輝, 篠田裕之, “ウェアラブル触覚ディスプレイのための柔軟二次元通信シート上の分布アクチュエータへの無配線多重給電,” 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.1349-1353, 札幌, Dec. 2016.
- [2] 長岡 智明, 櫻井清子, 国枝悦夫, 渡辺聡一, 本間寛之, 鈴木保, 河合光正, 酒本勝之, 小川幸次, 此川公紀, 久保田勝巳, 金鳳沫, 多氣昌生, 山中幸雄, 渡辺敏, “日本人成人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発,” 生体医工学, vol.40, no.4, pp.239-246, 2002.
- [3] A. Noda and H. Shinoda, “On-body sensor node localization using reference RFID tags embedded in wearable waveguide,” 2016 IEEE SENSORS Proceedings, pp.1003-1005, Orlando, FL, USA, Oct. 2016.
- [4] 原昂弘, 前田忠彦, “導電性繊維で刺繍形成した正方形シートの反射特性評価,” 電子情報通信学会論文誌B, vol.J103-B, no.11, pp.582-583, Nov. 2020.