室内 3D モデルを用いた通信環境シミュレーションによる電波反射板の設置位置最適化

代表研究者　　金　子　裕　哉　　沼津工業高等専門学校　制御情報工学科　准教授

1 まえがき

現代の無線システムでは，大容量通信を可能とするために高周波数帯の電波の利用が進められている．しかしながら，高周波数帯の電波の弱点として通信可能距離の短さと通信電波の回析能力の低さなどがあげられる．この弱点を補うための技術として注目されているのが Intelligent Reflecting Surface(IRS)である．

IRS は，多数の受動反射素子で構成される電波反射体であり，低電力で各素子の反射特性を適切に変更することで理想的な電波伝搬経路を設計することができる．これにより障害物を迂回した電波伝搬ルートを確保し，通信可能範囲を拡大することが可能となる．この原理の模式図を図 1 に示す．

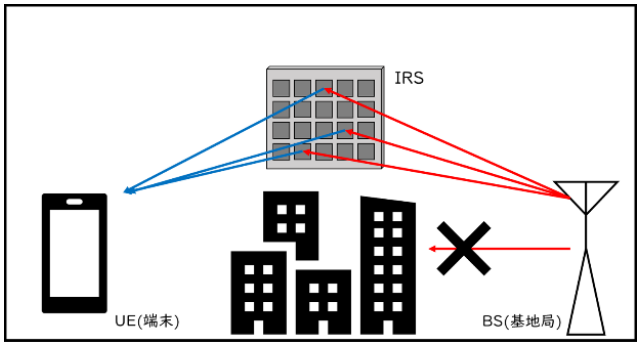

図 1　IRS を利用した通信

しかし，周囲の環境によって電波伝搬特性は変わるため，IRS の設置位置によって通信可能範囲は変わりうる．効果的に通信可能範囲を広げるには，実際にいくつかの候補位置に IRS を設置し通信品質を測定する方法が考えられるが，実測の手間が大きい．これを解決するために参考となる既存研究として，部屋を 3D モデルとして取り込みデータ上で電波伝搬シミュレーションを行うというものがある[1]が，BS（base station）や AP（access point）等の設置位置検討は行われていても，同じ空間内に存在する IRS の設置位置検討は行われていない．

本研究では室内で所要受信電力が得られる面積を最大とする IRS 設置位置を求めることを目的に，モデル空間で IRS を含めた電波伝搬シミュレーションを行い，設置位置の最適化を行うことを提案する．まず LiDAR により室内空間を 3D モデル化し，伝搬シミュレーションに利用できる形式に変換した．IRS の設置位置を変数とし，伝搬シミュレーションによって求められる室内で所要受信電力が得られる面積を評価関数とし，これを最適化問題として解いた。ネルダーミード法を用いて 7 回の反復で最適値に収束し，提案手法で IRS の設置位置を求められることが明らかになった．また，動的なシミュレーションへの拡張を目指し，使用するシミュレータの検討を行った．

2 Pylayers による電波伝搬シミュレーション

2-1 Lidar によるモデルデータ作成

IRS の設置を行う想定の部屋に対して iPad に搭載されている LiDAR（Light Detection And Ranging）を用いて 3D モデルの作成を行う．LiDAR とは，物体にレーザー光を照射し，その反射光を光センサでとらえることで物体との距離を測定するリモートセンシング方式である．LiDAR で取得した点群データを Polycam と

公益財団法人電気通信普及財団
研究調査助成報告書　第39号　2024年度

いうソフトウェアで 3D モデルに変換した．図 2 に作成した 3D モデルを示す．

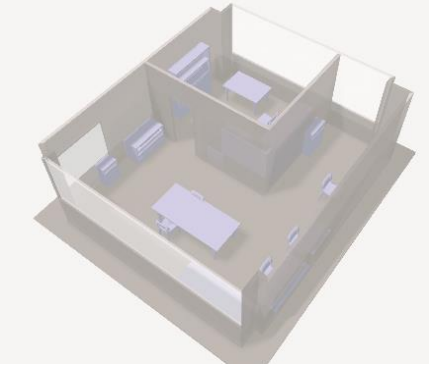

図 2 作成した 3D モデル

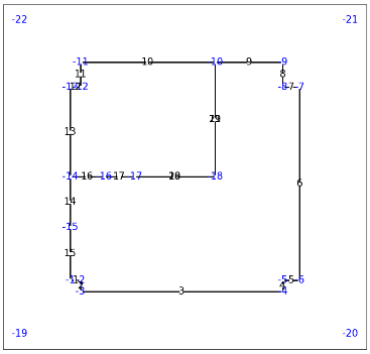

図 3　3D データから作成したシミュレーション用モデル

さらに，floorplan という Polycam の機能を利用して作成した 3D モデルから二次元の見取り図を作成し，見取り図の寸法から後述のレイトレースシミュレータに用いるモデルデータを作成した．図 3 に作成したシミュレータ用のモデルデータを示す．

2-2 Pylayers による電波伝搬計算

本研究では，まず電波伝搬シミュレーションに Pylayers というレイトレースシミュレータ[2]を用いて室内の受信強度を求める．BS は Fig.3 の x=0．1，y=3.5，z=2.8 の位置に設置し，周波数は 5.9GHz 帯，送信電力は 10dBm とした．基地局に由来する室内の各位置の受信強度を元に，IRS を設置した際に増大できる受信強度を求める．IRS は基地局から受信した電波を任意の方向へ反射できるものとして，全指向性の 1 つの基地局とみなしてモデル化した．IRS は基地局からの信号を受信する際と，端末すなわち室内の各位置へ送信する際それぞれに指向性利得があるものとし，その合計を 50dBm とした．また，IRS は天井 （z_c　= 2.8）に配置した．基地局の送信電波と IRS を位置 （x_IRS，y_IRS，z_c）に置いた際の合計受信電力を平面 （x，y，　1.5） について求め，所要受信電力-60dBm 以上となったグリッド数 f(x_IRS，　y_IRS） を評価関数として求めた．

図 4 に BS のみを設置した時の電波伝搬シミュレーションの結果を示す．　図からパーティションに区切られた区画内や室内奥の部分に電波が届きにくいことがわかる．

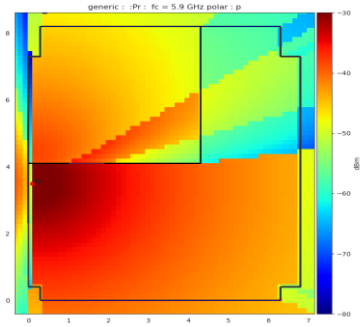

図 5　BS を送信元とする電波伝搬の様子

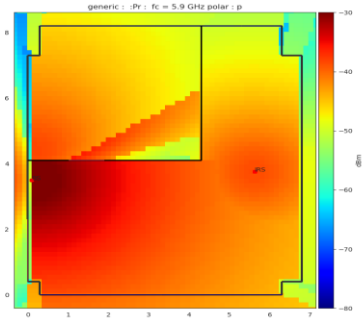

図 4　IRS を設置した場合の電波伝搬の様子

図 5 に，　IRS を設置したときの電波伝搬シミュレーションの結果を示す．図 4 と比較して，パーティションの奥の区画の電波強度が改善されていることがわかる．

図 6 に，　IRS を位置(x_IRS，　y_IRS，　z_c）　に設置して伝搬シミュレーションを行い求めた評価関数を示す．IRS が BS の近くにあるとき、およびパーティションの角にあたる位置に設置した際の 2 か所で評価関数が大きくなっていることがわかる．　BS に近い位置に IRS を置いた場合、リフレクトアレーのように働き BS　の送信利得を増加させることに等価な働きをしたと考えられる．一方でパーティションの角の位置では，

BS だけでは届きにくかった部屋の奥の領域に IRS が電波を反射させて電波環境を改善したと考えられる.、初期値 (3.375, 4) からネルダーミード法によって最適な設置位置を求めた結果, 7 回の反復で最適解 (x_IRS, y_IRS, z_c) = (1.625, 4.375) に収束し, 最適位置を求めることができた.

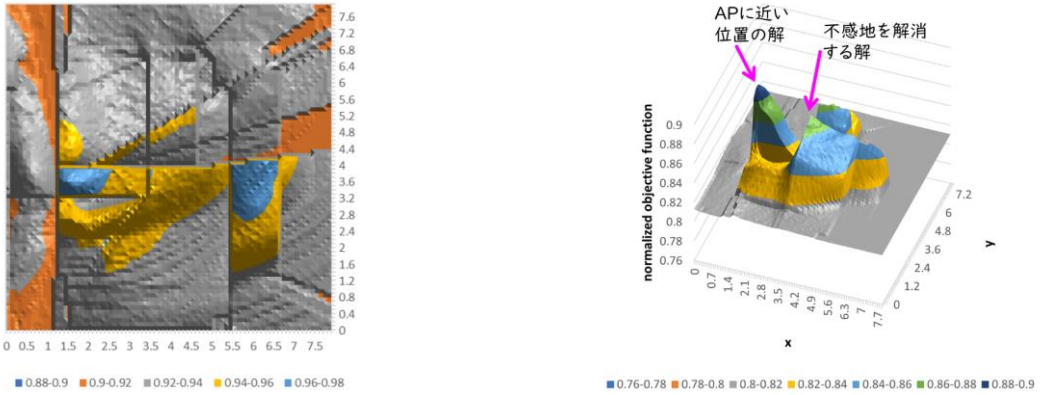

図 6 評価関数$f(x_{IRS},\ y_{IRS})$のカラーマップの平面図（左）と 3 次元図（⇒）

3 Opal による電波伝搬シミュレーション

前章では PyLayers というレイトレーシングシミュレータによって伝搬シミュレーションを行った. しかし, この方法ではスキャンした 3D モデルをそのままシミュレータに取り込むことができず, 手作業でモデルからシミュレータ用の設定ファイルを作成する必要があった.

一方, Lopez[3]らにより Unity 上で動作するオープンソースの Opal という電磁特性評価のレイトレーシングシミュレータが 2021 年に公開された. Unity は 3D ゲームエンジンであり, Lopez らは Opal を移動する自動車の車間通信の動的な通信シミュレーションに利用している. 本研究では, Unity に 3D モデルを取り込んで伝搬環境のデータとして使用できると考え, LiDAR でスキャンし作成した 3D モデルを Unity に取り込み, Opal でレイトレーシングシミュレーションを行うことで到来方向推定手法の評価を行う方法を提案する. また, レイトレーシングの結果から, 到来方向推定手法の評価のために必要となる電波到来角の方位角と仰角の情報を取得するプログラムを実装し, シミュレーション結果と一致することを確かめた.

3-1 Opal

Opal は Unity 上で用いることの出来るオープンソースの電磁特性評価シミュレータであり,GPU (Graphics Processing Unit) での高速計算が可能となっている. 作者の Lopez らは, Unity 上で建物やトンネルなどのオブジェクトを用いて Veneris という交通シミュレータの中で Opal を用いて電波伝搬の評価・妥当性の検証を行っており, 本研究では Veneris の 3D 環境下での無線ネットワークのシミュレーションに用いられる Opal を単体のレイトレーシングシミュレータとして利用する.

Opal は LinuxOS での動作確認がされていることが確認できたため,Ubuntu のインストールより着手した. OS は Ubuntu20.04 を使用し, レイトレーシングエンジンの NVIDIA OptiX6.5, NVIDIA driver, CUDA10.2, ビルド自動化ツールである CMake3.10 と, UnityHub,そして電波伝搬シミュレータである Opal のインストールを行い, 環境構築をした. Opal は Unity2017 上で動作させシミュレーションを行った. 使用した実行環境は, CPU が AMD Ryzen 7 7700x, GPU が NVIDIA GeForce RTX3060, メモリが 64GB である. Opal の中にサンプルとして用意されていた交差点シナリオを使用し電波伝搬シミュレーションを行った結果, 送信機から 10000 本照射していたが, 受信アンテナに到達したレイは 4 本であった. また, シミュレーションの実行開始から終了までの時間は 3.5 秒であった.

3-2 Opal と Unity による室内 3D モデルの電波伝搬シミュレーション

前章と同様に, 電波伝搬シミュレーションを行う対象の部屋を iPad Pro に搭載されている LiDAR でスキャンし, 3D Scanner App というソフトウェアを用いて 3D モデルの作成を行った. スキャンデータは obj フ

ファイルで出力し，その後そのままの形式のファイルを直接 Unity にインポートした．図 7 に Unity にインポートした室内 3D モデルを示す．Pylayers でのシミュレーションでは図 3 のようなモデルを作るために汎用の 3D モデルから Pylayers 専用の形式で壁面の座標などをテキストで記述する必要があったが，Unity では汎用の 3D モデルを直接インポートし表示、シミュレーションに使用できる．

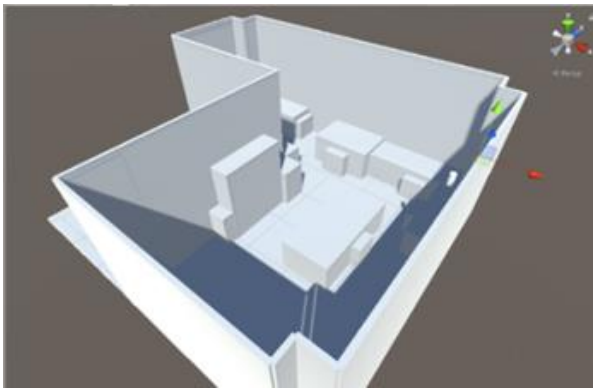

図 7 Unity にインポートした室内 3D モデル

図 8，図 9 に電波伝搬シミュレーションの実行画面を示す．それぞれアンテナの設置位置を変化させてシミュレーションしており，オレンジ色の線は電波の反射波を示し，送信機から各伝搬経路を通って受信機へ入る電波の様子が確認でき，正常に動作したことが分かる．

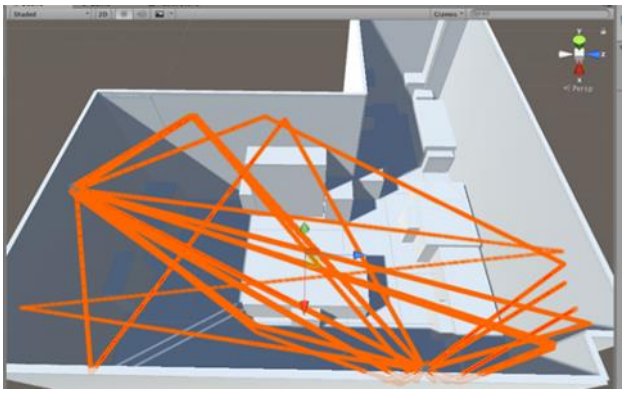

図 9　室内モデルデータにおける

シミュレーション結果(1)

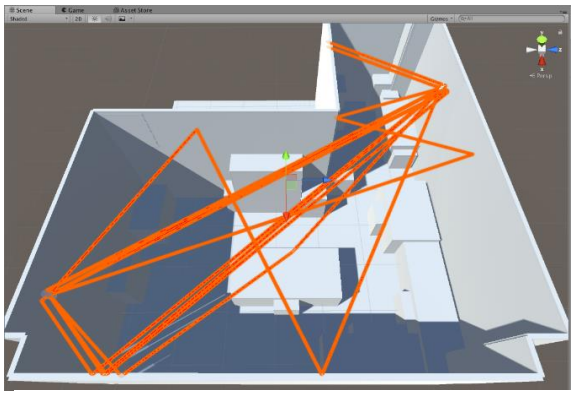

図 8　室内モデルデータにおける

シミュレーション結果(2)

4 実験用 IRS の作成

室内 3D モデルを用いたレイトレースによる電波伝搬シミュレーションと Nelder-Mead 法による IRS の設置位置最適化法の提案を行ったが，この最適化の検証を行う必要がある．シミュレーション結果の検証方法としては実験による実測が考えられるが，現状 IRS は研究段階にあり，市販された製品は存在しない．また，作成方法も広く公開されておらず，IRS に関する研究は計算機シミュレーションによる解析のみのものが多く，実験によって実証された通信路モデルがないなど，実環境での評価が十分でないということは課題としてあげられている[5]．そこで，実験用の簡易な IRS を実際に作成し，IRS の設置位置最適化の検証環境を構築する．

4-1 実験用 IRS の設計

本研究では送信アンテナにおけるリフレクトアレーの設計を参考に IRS の作成を検討する．リフレクトアレーは多数配置された反射素子の反射特性を変化させ，一次放射器の信号のビームフォーミングを行う．アン

テナの一部として位置づけらリフレクトアレーかの指向性パターンの中から反射特性を選択してビームを形成することがリフレクトアレーの特徴であるのに対し，IRS は送信アンテナと受信アンテナの中間に位置し，送受信アンテナ間の通信路を最適化するために各素子の反射特性を状況に応じて個別に変更する必要がある．そのため IRS では各反射素子について通信路推定を行い個別に制御できる必要があるが，反射板の構成自体は大きく変わらない．そこで先行研究[6]で作成，実験しているリフレクトアレーアンテナを参考に IRS を作成する．図 10 にリフレクトアレーの反社素子を示す．

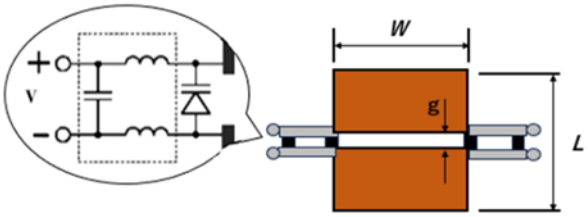

図 10　リフレクトアレーの反射素子

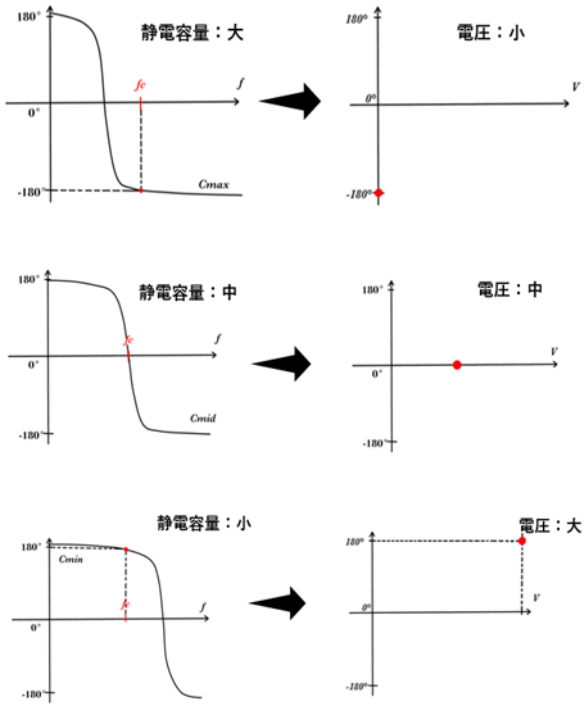

図 11　反射係数の周波数に対する位相

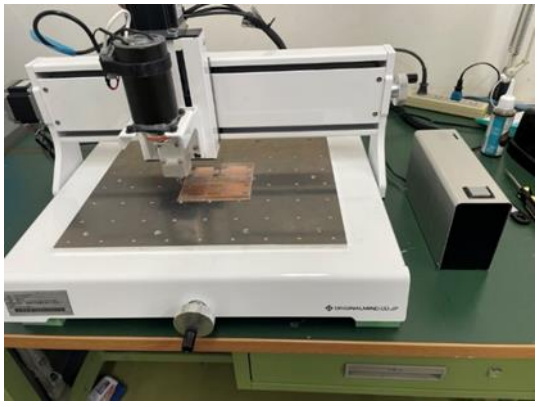

図 12　CNC フライスによる基板加工

この例ではパッチアンテナ間にあるバラクタダイオードに電圧をかけるとキャパシタ成分が変わり，反射する位相を変更することができ，それらを制御することによって任意の方向に電波を反射することが可能である．図 11 で示す通り，反射係数の周波数に対する位相を考えると，静電容量が最大の時には低い周波数で位相が変化し，静電容量が最小の時には高い周波数のところで位相が変化する．バラクタダイオードでは静電容量と逆電圧が反比例の関係にある.そのため，静電容量が最大の時には電圧が最小になり，静電容量が最小の時には電圧が最大になる．つまり制御電圧リフレクトアレー全体では電圧を変化していくと＋180 度から-180 度までで反射波の位相を変化することができる．

Kicad という回路設計ソフトウェアを用いて配線パターンを作成し，FlatCAM を用いて PCB（printed circuit board)の設計データ（Gerber ファイル）から CNC 加工用の G コードに変換し，図 12 に示した Original Mind 社の Kit mill CL420 という CNC フライスで銅張積層板に基板加工を行った．バラクタダイオードをはんだ付けし，リフレクトアレーの反射素子を作成した．

5 結論と今後の課題

本研究では LiDAR で得た室内 3D モデルをもとに，IRS を設置した際の所要受信電力が得られる面積を評価関数として電波伝搬シミュレーションによって求め，ネルダーミード法によって IRS の設置位置を最適化した．7回の反復で最適値に収束し，提案手法で IRS の設置位置を求められることが明らかになった．

電波伝搬シミュレーションには Players というオープンソースソフトウェアを使用したが，Pylayers では LiDAR で作成した 3D モデルから壁面の座標等をテキストで記述した設定ファイルが必要となる点、更新が既に活発ではなくなっている点などから，2021 年に提案されたオープンソースの電波伝搬シミュレータ Opal を使用することを検討した．LiDAR で作成した室内 3D モデルを直接 Unity に取り込み，Unity 上のプラグインとして Opal を使用して電波伝搬シミュレーションができることを確認した．

今後は，電波伝搬シミュレーションによって得られた最適化の結果を実際に実験によって検証すること，およびシミュレーションの精度向上を行うことである．

実験による検証は，簡易な実験用 IRS を作成して室内での受信強度測定を行う予定である．

シミュレーションの精度向上には，レイトレーシングの計算アルゴリズムに改良を加える必要がある．レイトレーシングの計算アルゴリズムは大きくレイ・ローンチング法とイメージング法に分類される．レイ・ローンチング法では受信アンテナの近くを通るレイは受信されるとして計算するため，高速ではあるが電波の光路長，すなわち位相情報については精度が劣化する．一方イメージング法は送信アンテナと受信アンテナの間のレイの経路を厳密に計算するため，位相情報をより正確に計算できる．Pylayers も Opal も，レイトレーシングにはレイ・ローンチング法というアルゴリズムを用いている．しかし IRS は反射する位相を制御することである位置での電波強度を改善するという動作原理であるため，動作をより正確にシミュレーションするためには位相情報を用いる必要がある．Pylayers も Opal もオープンソースであるため計算アルゴリズムに変更を加えられること，レイ・ローンチング法の計算結果にイメージング法を用いて補正を行う方法が提案されていること[4]から，シミュレータの計算アルゴリズムに改良を加えシミュレーションの精度向上を行う予定である．

【参考文献】

[1] 岡村航，他，“屋内環境における点群データを用いたレイトレース解析に適用可能な 3 次元平面モデル構築手法の提案および電波伝搬評価”．電子情報通信学会総合大会 2021，B-1-113，2021 年 2 月．

[2] N. Amiot, et al., ″PyLayers: An open source dynamic simulator for indoor propagation and localization,″ 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), doi: 10.1109/ICCW.2013.6649206.

[3] Esteban Egea-Lopez, et al., ”Opal: An open source ray-tracing propagation Simulator for electromagnetic characterization” Published: November 17, 2021

[4] 荒生太一，成見哲，”レイトレーシング法に特化した GPU による電波伝搬シミュレーションの高速化” 情報処理学会第 84 回全国大会，4J-01，2022 年 3 月

[5] E. Basar, et al. , “Wireless Communica-tions Through Reconfigurable Intelligent Surfaces, ” IEEE Access, vol. 7, pp. 116753-116773, Aug. 2019.

[6] Sean Victor Hum, et al. , “Modeling and Design of Electronically Tunable Reflectarrays”, IEEE, VOL. 55, NO. 8, pp, 2200-2210, AUGUST 2007

〈発 表 資 料〉

題　　名	掲載誌・学会名等	発表年月
室内 3D モデルを用いた通信環境シミュレーションによる Intelligent Reflecting Surface 設置位置最適化	2024 年電子情報通信学会総合大会 広島大学東広島キャンパス	2024 年 3 月 8 日