

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-15

WPT-Robotの研究 : Lidarと屋内測位システムを利用した移動マニピュレータにおける軌道計画の検討

兎野, 直輝 / CHIGONO, Naoki

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030711>

WPT-Robotの研究： Lidarと屋内測位システムを利用した 移動マニピュレータにおける軌道計画の検討

Research on WPT-Robot: A Study of Trajectory Planning
in Mobile Manipulator Using Lidar And Indoor Positioning System

児野直輝

Naoki CHIGONO

指導教員 中村壮亮

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

We have proposed and developed a mobile robot: WPT-Robot, which can move around in a living space and execute wireless power transfer to various devices. We also aim to establish an automatic power management system to operate it effectively. If the charging target was outside the manipulator's range of motion or if there was an obstacle in the trajectory, the system in the previous research could not perform charging operations. Therefore, we improved the system to allow charging in these situations. The WPT-Robot in this paper enabled more effective trajectory planning by using the error ellipsoid body and the charging efficiency of the charging target.

Key Words : *Wireless power transfer, Autonomous robot, Mobile manipulator*

1. はじめに

(1) 研究背景

現代の我々の生活において、モバイル機器は必要不可欠な存在となっており、これらの機器に搭載されるバッテリーへの充電は、電源ケーブルを用いて有線で行うことが主流となっている。これは、モバイル機器に限らず、家電製品の多くも同様であり、駆動に必要な電力を供給するためには電源ケーブルが必要である。そのため、多くの家庭では電源ケーブルが生活空間の至る所に張り巡らされており、モバイル機器や家電製品の給電場所は、電源となるコンセントの周辺かつ電源ケーブルの届く範囲内に限定される。このように、有線接続による給電は家電製品等の配線の煩雑化や、それらの給電場所および給電可能範囲の制限の原因となっている。

こうした状況に対し、モバイル機器においては、専用の充電パッドを用いた無線給電により、電源ケーブルを用いない給電の実用化が進んでいる。モバイル機器をそれぞれの規格に対応した専用の充電パッドに設置することで、ケーブルレスでの給電を実現している。充電パッドの送電コイルに電流を流すことで発生した磁界の変化により、給電対象の受電コイルに誘導電流が流れるため、電源ケーブルを用いることなく給電を行うことが可能となっている [1]。ただし、給電範囲が電源ケーブルを用いる場合よりも限定されてしまうという課題がある。

そこで、我々はケーブルレス化と給電範囲の拡大を実現するため、Wireless Power Transfer-Robot (以降、WPT-Robotと呼称)を用いた自動電力管理システムの確立を目指し

ている [2]。自動電力管理システム内におけるWPT-Robotは、充電を必要とするモバイル機器や家電製品に自動で接近し、給電用のコイルを介した無線給電を行う。その後、WPT-Robotは、自身の駆動バッテリーおよび給電に使用するバッテリーの充電を行う給電ステーションへ移動する。以上が、自動電力管理システムによる給電の手順である。

近年、WPT-Robotの実用化に向けた研究が報告されているが、現在開発されている多くのWPT-Robotは送電コイルの位置姿勢が固定されているため、送電コイルと給電対象の受電コイルの位置合わせはWPT-Robot本体を動かすことでしか行うことができない [3][4]。このため、報告されているWPT-Robotの多くは、形状や機構、システムにより、給電の対象機器や給電可能な場面が限定的であるという共通の課題を持っている。また、送電コイルを手先に有したマニピュレータを操作し、送電コイルの位置調整を行うWPT-Robotの研究も報告されている [5]。給電対象の位置姿勢に合わせて、送電コイルの位置姿勢を調整することが可能となったが、給電の対象機器が限定的であるという課題は同様である。

自動電力管理システムで使用されるWPT-Robotは送電コイルを手先に有したマニピュレータと給電対象認識用のカメラを利用し、給電対象に応じた最適な給電姿勢を探索することで、給電対象機器および給電可能範囲の拡大を可能とする。最終的には、図1に示すような、屋内の電力管理をWPT-Robotがすべて自律的に行うケーブルレス空間を実現することを目指している。

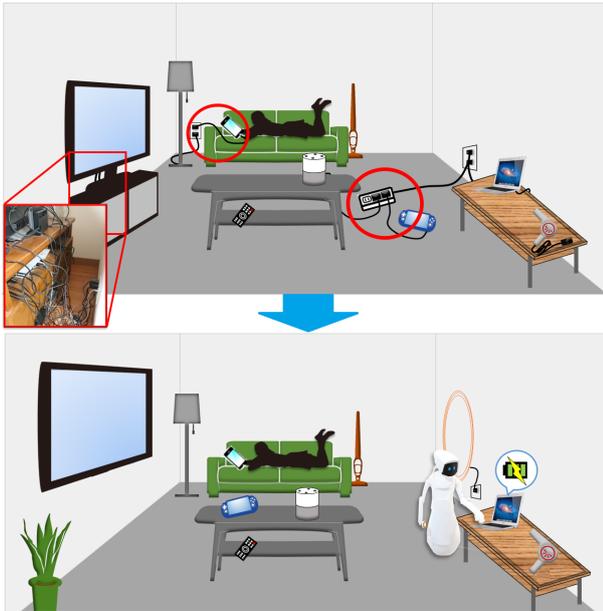


図1 ケーブルレス空間の構想図

開発中の自動電力管理システムは既にプロトタイプの構築が済んでおり、実機への適用の段階へと進んでいる[6]。先行研究では、WPT-Robotが常にサーバーと通信を行い、UWBタグにより取得した給電対象の位置及び移動開始の命令をトリガーにして動作を開始する。給電対象正面に到着後、手先に送電コイルを取り付けたマニピュレータを操作し、給電対象への給電姿勢をとる。この時、胸部のカメラを用いて給電対象の位置を認識し、マニピュレータの軌道計画を行う。実験の結果、WPT-Robotがオフィス空間内で動作可能であり、一連の給電動作が実行可能であることが示されている。先行研究では、カメラで認識した給電対象の座標から、マニピュレータの手先の送電コイルの到達座標を設定し、そこに向けて軌道計画を行うことで、給電を実行していた。しかしながら、軌道計画時に障害物と干渉する場合や、給電対象がマニピュレータの可動域外にある場合には、給電動作を実行できないという課題があった。

(2) 研究目的

本稿では、先行研究において給電動作の実行が困難であった、給電対象周辺に障害物がある場合と、給電対象がマニピュレータの可動域外にある場合の2つの局面でも、給電動作が実行できるシステムへの改良を行った。外界から得たセンサ情報等を駆使するシステムを構築することで、WPT-Robotが周辺環境の情報を自身の行動に反映し、自律的に動作することを可能にした。そして、改良後のシステムをシミュレータ上で運用することで、先行研究では給電が実行できなかった局面においても、給電動作を実行できることを確認した。

2. 先行研究

(1) システムの概要

先行研究のシステムは管理サーバー、WPT-Robot、給電対象の3要素による中央集中型構造となっている。モバイル機器への搭載を想定した測位モジュールである電波タグを用いて、給電対象の位置推定を行い、WPT-Robotが得られた位置情報を用いてロボットナビゲーションを行うことで、給電対象へ接近し、給電動作を実行する。給電対象の距離情報と電圧値の管理は外部に設けた管理サーバーで行う。

(2) 実験機

先行研究では、THK株式会社が提供するSEED-Noid-Moverに上述のシステムを組み込むことでWPT-Robotを作成した。SEED-Noid-Moverの外観を図2に示す。SEED-Noid-Moverは上半身型ヒューマノイドロボットであるSEED-Noid、前後・上下動作が可能な昇降機であるSEED-Lifter、LRFが搭載されたSLAM式全方位移動台車であるSEED-Moverの上記3つの機構を組み合わせた移動型ヒューマノイドロボットである。上半身部は7自由度のマニピュレータを2本装備し、任意の手先姿勢の決定が可能である。右マニピュレータの手先には物体を把持するために標準で装備されている汎用グripper (TRX-S/L)の代わりに、送電コイルを搭載する。ただし、実験時は簡単のために、送電コイルの代わりに市販のワイヤレス充電パッドを装備することで給電機能を実装した。また、胸部にRGB-Dカメラ (RealsenseD415)を装備し、給電対象の認識に用いる事が可能である。

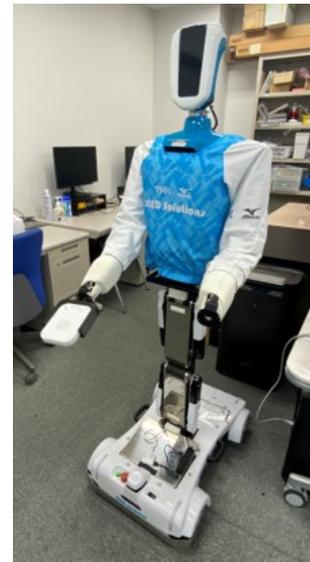


図2 先行研究のWPT-Robot外観

(3) システムを構成する諸機能

a) 屋内測位システム

電波タグには環境側で測距を行う送信機となるアンカーと、測位対象に取り付ける受信機となるマーカの

2種類が存在する。先行研究では環境側に複数のアンカーを設置し、測位対象となる給電対象とWPT-Robotにマーカを取り付けた。マーカは、各アンカーとマーカ間の距離情報をUWB通信で取得し、得られた距離情報はXbee通信により管理サーバに送信される。管理サーバは、取得した距離情報から逐次計算法により、給電対象とWPT-Robotの位置推定を行う。また、管理サーバは内部システムとして、WPT-Robotへの動作指令システム、給電のタスクスケジューリングシステムを持つ。

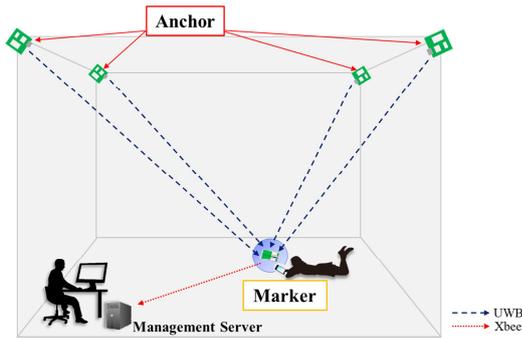


図3 電波タグを用いた屋内測位システム

b) ロボットナビゲーション

先行研究では自己位置推定と地図構築を同時に行うSLAM技術を用いて、WPT-Robotの自己位置推定と屋内の地図生成を行った。Fast SLAM 2.0を採用したオープンソースパッケージであるgmapping[7]を用いてWPT-Robotが動作する空間の地図を事前に作成した。WPT-Robotは作成した地図を読み込み、管理サーバから受信した目標座標へのナビゲーションに利用した。なお、地図の読み込み及び目標座標へのナビゲーションは経路計画を行うパッケージであるmove_base[8]を用いて行った。

c) 給電対象の認識機能

屋内測位システムを用いて給電対象へ接近した後、WPT-Robotは胸部のRGB-Dカメラを用いて、給電対象を認識し、より詳細な三次元位置を取得した。先行研究では給電対象に搭載したAprilTag[9][10]を認識することで、給電対象の三次元位置を取得し、マニピュレータに搭載された送電コイルの目標座標として使用した。

(4) 実験

実験環境として、図4のようなオフィス空間を用い、机上に携帯端末を配置した。図中の斜線部は棚と壁を、灰色の部分は机を表している。青の長方形はロボットの初期位置であり、赤丸部が端末の位置である。先行研究では、図4の環境にて上述のシステムにより、WPT-Robotが給電対象付近へ移動し、給電動作が実行されることを確認した。図5はシステム起動時のWPT-Robotの動作の様子を表している。WPT-Robotはサーバから、給電対象の位置及び移動開始の命令を受け取り、移動を

開始した(図中(b)の状態へ移行)。給電対象の正面に到着後は、胸部カメラを用いて給電対象の位置を認識し(図中(c)の状態へ移行)、マニピュレータの軌道計画を行い、給電対象への給電動作を実行した(図中(d)の状態へ移行)。よって、限定条件下ではあるが、先行研究の手法がオフィス空間内において、WPT-Robotによる一連の給電動作が実行可能であることが示された。

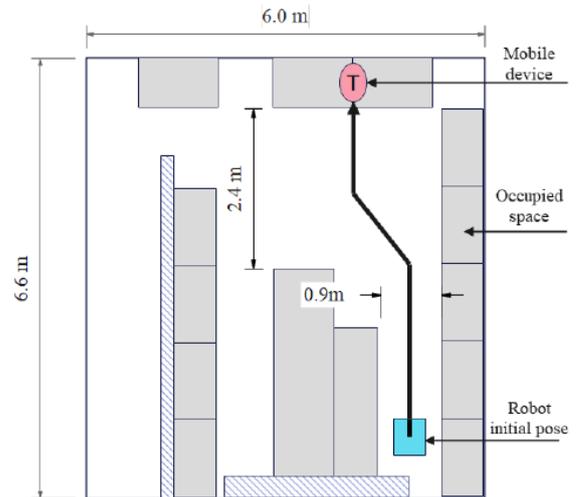


図4 先行研究の実験環境

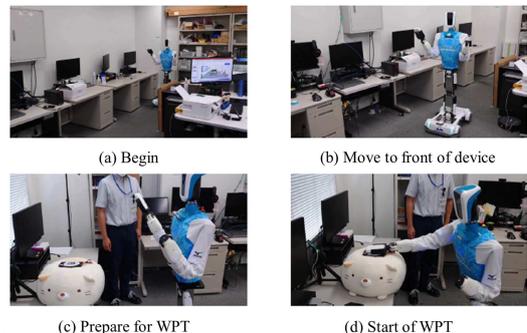


図5 先行研究の実験結果

3. 提案手法

(1) 先行研究の課題

先行研究のシステムは、机上に給電対象以外の障害物が存在しない環境にて実行し、有効性が示された。しかし、現実の環境においては、給電動作の実行が困難となる局面が大きく二つある。

一つ目はマニピュレータが給電対象に届かない場合である。先行研究のシステムで用いている屋内測位システムの生成座標は、偶然誤差に加えて家電や什器を原因とする系統誤差を含む場合があることが分かっている[11]。よって、WPT-Robotの移動先の座標が給電対象から数十cmほど離れた位置になってしまう可能性が考えられる。

給電対象がマニピュレータの可動域内に収まっていないときは、無線給電が可能な位置に送電コイルを移動させることができないため、給電対象への軌道計画は失敗する。先行研究のシステムは軌道計画が成功しない限り、WPT-Robotは動作しないため、このとき給電動作は実行されない。

もう一つはマニピュレータの軌道上に障害物がある場合である。マニピュレータの軌道計画の計算はMoveIt!を用いて行った[12]。MoveIt!は様々な軌道計画アルゴリズムが実装されたフレームワークである。MoveIt!には障害物の情報をマニピュレータのコンフィギュレーション空間に取り込み、回避軌道を生成することができるアルゴリズムがあるが、軌道が生成されない限り動作は実行されない。そこで、無線給電は高効率給電が可能な送電コイルの位置が複数あることを利用し、手先の送電コイルが到達可能かつ高効率給電が可能な別の位置へ手先の目標座標を変更することで、障害物を考慮した給電動作の実行が可能であると考えた。しかし、給電対象の給電効率が送受電コイルの位置関係でどのように変化するかを先行研究のシステムでは判断できないため、障害物回避と高効率給電の両立は困難である。

(2) 課題に対する本研究のアプローチ

マニピュレータが給電対象に届かない場合への対応として、著者は屋内測位システムの生成座標の誤差楕円を考慮した移動先の決定手法を提案する。生成座標の誤差共分散行列から三次元の誤差楕円を生成し、マニピュレータの可動域が誤差楕円を内包することができる位置をWPT-Robotの移動先の座標として設定する。これにより、生成座標が誤差を含んでいても、マニピュレータが届かないことで給電動作が実行されないという事象を防ぐことができる。

また、マニピュレータの軌道上に障害物がある場合への対応として、給電効率情報をWPT-Robotが参照するシステムを提案する。これにより、障害物を回避しつつ、高い給電効率を保証する送電コイルの位置を探索することが可能となる。まず、送受電コイルの各相対位置における給電効率を記録し、給電効率マップを作成する。作成した給電効率マップを事前情報として保持し、WPT-Robotは最も高効率給電が可能な位置を送電コイルの目標座標に設定して、軌道計画を行う。このとき、胸部カメラから取得したカメラ画像から、給電対象の周囲の障害物を認識し、事前に回避軌道を生成する。障害物などが原因で、最高効率点への軌道計画が不可能の場合は、給電効率マップを用いて、次点で給電効率が高く、到達が可能な点を目標座標に設定する。これにより、障害物回避による給電効率低下を防ぎつつ、周辺環境に応じて最も高効率給電が可能な位置をロボットが自律的に探索することが可能となる。

(3) 提案手法のシステム構成

提案手法のシステム構成図を図6に示す。提案システムは屋内測位システムによる給電対象の検知から給電対象付近までの移動を行う自律移動部と給電対象への接近後に、カメラで給電対象を認識し、送電コイルを移動させて無線給電を行う無線給電部に大別される。なお、本稿のシステム開発およびデータ通信は、ROS (Robot Operating System) を使用して実装した。

a) 自律移動部

屋内測位システムにより、管理サーバは給電対象の位置と誤差楕円を取得する。取得した位置情報をもとに管理サーバはWPT-Robotの移動地点の候補点を複数生成する。その後、WPT-Robotは候補点に移動したと仮定し、手先の送電コイルを給電対象に誘導する軌道計画を遠隔で行う。同時に、給電対象の誤差楕円をマニピュレータの可動域が内包できているかを、軌道計画の成否で照合する。しかし、誤差楕円上のすべての座標に対して軌道計画を行うのは非効率であるため、誤差楕円が外接する直方体の頂点を考える。給電対象の座標と、直方体の8つの頂点に軌道計画を行い、全点で成功すれば、誤差楕円をマニピュレータの可動域内に内包できているとみなす。これにより、計算時間を大幅に短縮することが可能となる。直方体の頂点に対して軌道計画を行い、全点で軌道計画が成功すれば、補正後の候補点の座標を保存し、失敗した点がある場合は、失敗した点に接近するように、候補点の位置に補正項を加える。そして、補正後の候補点から再度軌道計画を試みる。これを繰り返し、補正を加えた候補点を複数保存し、候補点の中で最短距離で到達可能な座標を、WPT-Robotの最終的な移動地点とし、事前に作成した環境地図をもとに自律移動を行う。以上が、自律移動部の処理である。

b) 無線給電部

自律移動部の処理が終わり、移動地点にWPT-Robotが到達すると、無線給電部の処理が始まる。WPT-Robotはカメラから給電対象を認識し、給電対象の位置姿勢を取得する。次に、認識した給電対象の給電効率マップを読み込む。WPT-Robotは給電効率マップを参考に最高効率での給電が可能な位置を、送電コイルの目標座標とし、軌道計画を行う。このとき、給電対象の周辺の障害物はカメラで認識し、軌道計画時に回避する。障害物等が原因で、軌道計画に失敗した際は、給電効率マップを用いて、次点で給電効率の高い点に目標座標を変更し、軌道を再計画する。これを繰り返し、最終的に軌道計画が成功したら、給電動作を実行する。これにより、障害物情報を考慮しながら、到達可能な点の中から最高効率で給電が可能な点を探索することが可能となる。以上が無線給電部の処理である。

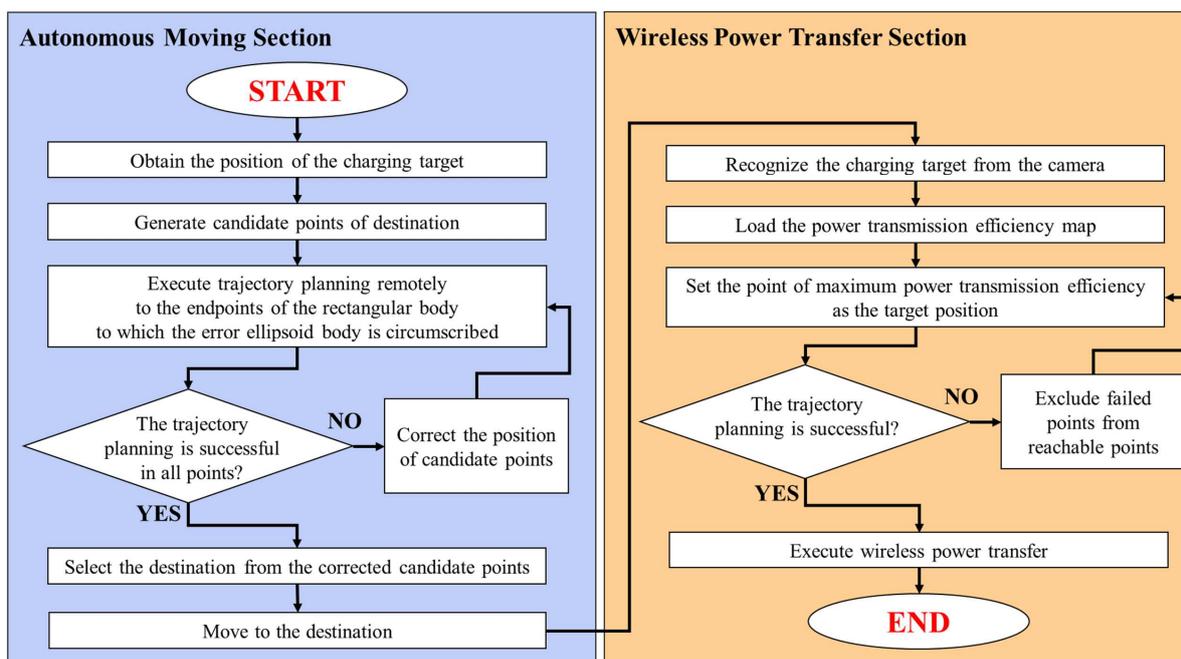


図6 提案システムのフローチャート

4. シミュレーション

(1) 実験機

本稿では、先行研究と同様に、SEED-Noid-Mover を WPT-Robot として使用した。SEED-Noid-Mover の 3D モデルには汎用グリッパーが備わっているが、本シミュレーションでは使用しないため除去した。そして、汎用グリッパーの代わりに送電コイルを模した簡易モデルを作成し、SEED-Noid-Mover のモデルの手先に装着した。

(2) シミュレーション環境

本稿では、提案システムの自律移動部と無線給電部が正常に動作することをシミュレーションにより確認した。Gazebo シミュレータを用いて、自律移動部の検証を行う空間（以降、空間 A と呼称）と無線給電部の検証を行う空間（以降、空間 B と呼称）を構築し、それぞれの機能の動作検証を行った。

作成した空間 A を図 7 に、空間 B を図 8 に示す。両空間は WPT-Robot 本体の初期位置を原点とする 3 次元空間で構成される。空間 A には 3 つの机を配置し、それぞれの天板の上には給電対象に見立てた AprilTag を設置した。空間 A にて、先行研究の屋内測位機能により、給電対象の位置を捕捉できたことを前提に、本稿の提案システムの自律移動部の動作検証を実施した。給電対象の誤差楕円を考慮し、マニピュレータの可動域内に給電対象を内包できる座標へと移動することができれば、自律移動部は正常に動作しているものとみなす。空間 B には WPT-Robot の目の前に 1 つの机を配置し、天板の上には AprilTag と、障害物としてワインボトルのモデルを設置

した。空間 B の机には障害物があり、先行研究のシステムでは給電動作が実行できないことが事前に確認されている。空間 B にて、先行研究の屋内測位機能と提案システムの自律移動部により、給電対象付近までの移動したことを前提に無線給電部の動作検証を実施した。机上の障害物と障害物情報を考慮し、到達可能な座標の中で最も給電効率が高い座標を選択し、給電動作を実行することができれば、無線給電部は正常に動作しているものとみなす。

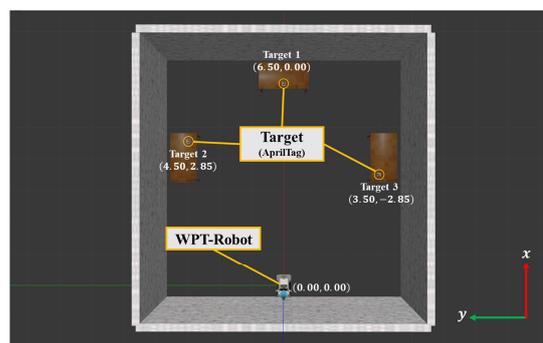


図7 自律移動部の検証を行う空間 A

(3) 事前情報の準備

a) 環境地図

先行研究と同様に、gmapping を用いて、事前にシミュレーション空間の地図を作成した。

ここで、gmapping によって描画される地図は 2 次元の

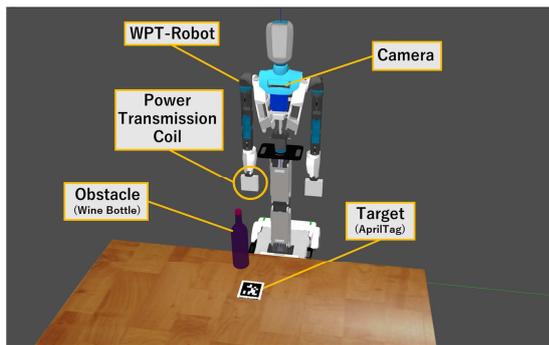


図8 無線給電部の検証を行う空間B

占有格子地図である。占有格子地図とは、床面を等間隔の格子状に区切ることによってセルに分割し、各セルが物体に占有されているかどうかを表す確率（占有確率）を計算し、その確率をもとに各セルの状態を表した地図である。各セルは、物体によって占有されている状態を示す占有空間、物体によって占有されていない状態を示す自由空間、物体によって占有されているか未確定であることを示す未知空間のいずれかの状態で表される。自律移動時の大域的経路計画は占有空間を回避するように作成されるため、占有格子地図を用いることで、予め地図上の壁や障害物を回避した経路計画が可能となる。

ただし、gmappingで取得できる占有格子地図はLidarで取得したセンサ値をもとに作成した二次元地図のため、Lidarで検知できない障害物が存在する。例として、機の脚は取得できるが、機の天板はLidarの測定範囲外に存在するため、実際は天板が存在すると推測されるセルも自由空間として保存されてしまう。ゆえに、ロボットの機構次第では、天板に衝突する可能性がある。このため、gmappingで取得した地図を編集し、予め天板等によりロボットが侵入できないセルを自由空間から占有空間に修正しておく必要がある。これにより、ロボットが机の下などに該当するセルを侵入禁止領域とみなし、事前の大域的経路計画の時点で、侵入禁止領域を回避した経路を生成することが可能となる。

b) 生成座標の誤差楕円

先行研究のシステムで用いている屋内測位システムの生成座標の誤差楕円を生成し、3次元可視化ツールであるRViz[13]を用いて可視化した。誤差楕円は、屋内測位システムの精度が±20cmであることを想定した共分散行列を設定し、求めた固有値から楕円の軸の長さを計算することで、出力している。このとき、屋内測位システムの誤差は正規分布に基づくものとする。なお、本シミュレーションで出力する誤差楕円は、周囲の仕器による変動を受けない固定値として出力した。

c) 給電効率マップの作成

無線給電には様々な方式が存在するが、マイクロ波[14]やレーザー[15]を用いた放射型と、電磁誘導[16]や磁界共鳴[17]を用いた非放射型に大きく分類される。本稿では放射型よりも安全に高効率な電力伝送ができ、電磁誘導方式よりも伝送距離が長い磁界共鳴方式による無線給電を採用した。本稿では、PCなどの大型モバイル端末や家電への給電を想定し、半径50mmのスパイラルコイルを設計した。設計したコイルのパラメータは表1の通りである。

表1 送受電コイルの設計仕様

| Parameter | Value | Dimension |
|-----------------------------|-------|-----------|
| Resonance frequency | 13.56 | MHz |
| Radius of transmission coil | 50 | mm |
| Radius of receiving coil | 50 | mm |
| Coil pitch | 2 | mm |
| Coil thickness | 3.3 | mm |
| Coil turn | 5 | turns |

ここで、送受電コイルの位置ずれが、送電コイルの半径よりも長くなる場合、電力伝送効率に著しい影響を与えることが知られている[18]。よって、本稿で使用する送電コイルの伝送距離および位置ずれの許容範囲は約50mmであるとし、給電対象の底面の中心を基準とした格子点空間を作成した。格子点の間隔は1mmであり、各格子点における給電効率を電磁界解析シミュレータであるIE3Dを用いて計算し、その結果を保存した。その後、各格子点の位置姿勢と給電効率を出力し、出力結果をRvizを用いて可視化する。

d) 障害物の認識

給電対象周辺の障害物の認識は、OctoMap[19]を用いて行った。OctoMapは八分木のデータ構造であるOctreeに基づいて3次元空間を表現する手法である。カメラ等のセンサを用いて認識した3次元空間をボクセルで区切り、物体が存在するボクセルを占有ボクセルとして表現することでボクセルグリッドマップを作成する。本稿では、WPT-Robotの胸部カメラを用いて認識した3次元空間をOctoMapによりボクセルグリッドマップに変換した。そして、物体による空間の占有情報をマニピュレータのコンフィギュレーション空間に反映することで、障害物を回避しつつ軌道計画を行うことを可能にした。

(4) シミュレーション結果

図7の空間において、Target 1の給電対象に向けて移動するWPT-Robotの様子は図9の通りである。図中の青い楕円体は給電対象の誤差楕円を表し、緑色の点は誤差楕円の中心および誤差楕円に外接する直方体の頂点座標を表している。提案システムの起動後、WPT-Robotは移動先の候補点の座標に移動したと仮定し、取得した給電対

象の座標と、誤差楕円に外接する直方体の頂点への軌道計画を遠隔で行った。その後、候補点の中から最短距離で到達可能な座標が移動先として設定され、WPT-Robotは移動を開始した。移動の様子は図9の(a)から(b), (c), (d)の順に変化していき、最終的に移動先となった座標にWPT-Robot本体が移動することができた。このとき、地図上の障害物との接触や、侵入禁止領域への侵入は起こらなかった。また、移動後に再度、誤差楕円の中心および誤差楕円に外接する直方体の頂点座標への軌道計画を行うと、すべての点で軌道計画が成功した。給電対象をTarget 2, Target 3にした場合でも、同様の結果が得られた。よって、屋内測位システムの誤差楕円を利用し、マニピュレータの可動域内に給電対象を納めることが可能な座標を移動先に指定することができた。以上から、提案システムの自律移動部が正常に動作したことが確認できた。

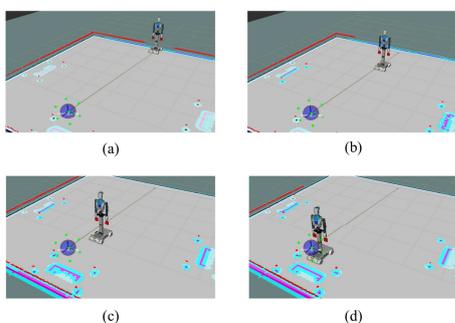


図9 空間Aでの自律移動実行の様子

次に、図8の空間において、無線給電部の検証を行った際のWPT-Robotの動作の様子を図10に示す。図中ではカメラで認識した物体がOctoMapによりボクセルグリッドマップとして表示されている。また、給電対象を中心に給電効率値が格納された点群が表示されている。各点群の位置は各格子点の位置に該当する。給電効率の高さは点群の色から判断することができ、赤色に近いほど給電効率が高くなっている。図中左は空間Bから机上の障害物(ワインボトル)を除去した状態で、提案システムを実行した際のWPT-Robotの動作の様子を表し、図中右は机上に障害物が存在する状態で、提案システムを実行した際のWPT-Robotの動作を表している。図10より、障害物を回避する軌道が生成できていることが分かる。また、机上の障害物を除去した状態で、提案システムを実行した際は、給電効率96.16%の座標が目標座標として選択された。この座標は到達可能な座標の中で最も給電効率が高い点であった。机上に障害物を設置した状態で、提案システムを実行した際は、最高効率の96.16%の給電が可能な座標ではなく、給電効率92.75%の座標が目標座標として選択された。机上に障害物がない状態のときと目標座標が変化したのは、机上の障害物を避けつつ最高

効率の給電が可能な座標にコイルを到達させることができなかったからだと考えられる。このとき、92.75%以上の給電効率を持つ座標の軌道計画の成否を確認すると、該当するすべての点において軌道計画は失敗していたことが分かった。よって、到達可能な座標の中で最も給電効率が高い座標を選択できており、提案システムの無線給電部が正常に動作したことが確認できた。

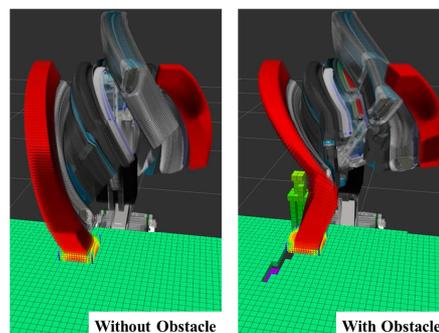


図10 空間Bでの給電動作実行の様子

5. 結論

本稿の提案システムを用いることで、屋内測位システムの誤差の影響を低減した経路計画、高効率給電と障害物回避を両立させた軌道計画が可能となり、より汎用的なシステムへと改良することができた。

しかし、提案システムの欠点として、移動前と移動後に軌道計画を行っており、処理時間がかかるだけでなく行程に無駄が生じていることが挙げられる。移動前の軌道計画の段階で、誤差楕円を考慮した移動地点決定と、移動後のマニピュレータの軌道生成の両方を完了させることが可能なシステムにすることが理想的である。上記のシステムを実装するためには、屋内の壁や障害物の位置に加えて、机上の障害物等も移動前に把握しなければならないため、RGB-Dカメラなどの3次元センサや、ORB-SLAM[20]といった3次元SLAMを用いることで、3次元地図の構築を可能にする。これにより、本稿で2次元センサを用いていたことで検出が困難であった機の天板や机上の障害物なども環境地図の情報として持つことができる。移動前の段階で、誤差楕円を考慮した移動地点決定と、障害物を考慮したマニピュレータの軌道生成が可能となり、プロセスの簡略化と実行時間の短縮が期待できる。加えて、移動前に天板の真下の空間などを進入禁止領域に設定する作業も不要となり、ユーザーが手動で設定する項目を削減できることも利点となる。

また、現在は移動後の給電対象の認識をAprilTagの認識で代用しているが、現実の生活空間ですべての給電対象にAprilTagを設置するのは現実的でなく、移動後にAprilTagの認識ができないと給電対象の位置をロボットが把握できないという欠点もある。AprilTagを用いない認識手法として、物体認識手法が挙げられる。深層学習

を用いて給電対象となる携帯端末やPC, 家電製品の形状を学習し, リアルタイムで判別を可能にすることで, AprilTagを用いない給電対象認識が可能となると考える.

さらに, WPT-Robotの要求仕様を満たしつつ, 提案システムの実行に最適な機構を備えるWPT-Robotを独自に設計し, 開発を進めていく. これにより, 冗長自由度の削減や, ロボット本体の小型化を目指すことが可能となり. 本研究の最終目標の達成のため, 屋内で動作するWPT-Robotの最適な機構設計, システム設計を継続して行い, ケーブルレス空間の実現に近づきたい.

謝辞:

研究活動に際し, 中村壮亮先生には研究の本質に関わる数多くの御指導を頂き, 感謝致します. 清水拓特任研究員には, 御多忙の中, システム開発のご指導, ならびに本研究に関して多大な助言を頂きました. 御礼を申し上げます. 最後に, 本研究に取り組むにあたり, 協力してくださった中村壮亮研究室の諸先輩方, 同期の学生, 後輩の皆様にご心より感謝申し上げます.

参考文献

- [1] J. Huang, Y. Zhou, Z. Ning and H. Gharavi, “Wireless Power Transfer and Energy Harvesting: Current Status and Future Prospects”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 4, pp. 163–169, August 2019.
- [2] S. Nakamura, T. Suzuki, Y. Kakinuma, S. Saruwatari, K. Yamamoto, K. Arai, K. Akiho, H. Hashimoto, “Prototype System for Energy Management of Mobile Device via Wireless Charging Robot”, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2016)*, pp. 727–732, 2016.
- [3] YS. Wu, CW. Chen, H. Samani, “Development of Wireless Charging Robot for Indoor Environment Based on Probabilistic Roadmap”, *Interactive Collaborative Robotics (ICR)*, vol. 9812, 2016.
- [4] M. Shidujaman, H. Samani, M. A. Raayatpanah, H. Mi and C. Premachandra, “Towards Deploying the Wireless Charging Robots in Smart Environments”, *Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSSE.2018.8520063., 2018.
- [5] M. Khonji, M. Alshehhi, CM. Tseng, CK. Chau, “Autonomous inductive charging system for battery-operated electric drones.” *Proceedings of the Eighth International Conference on Future Energy Systems*, pp. 322–327, 2017.
- [6] 小澤航太郎, 児野直輝, 三橋俊哉, 神山貴幸, 清水拓, 中村壮亮, “WPT-Robotの研究: 実用化に向けたシステム設計及び基礎開発”, 第23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, 3P2-B16, 2022.
- [7] G. Grisetti, S. Cyrill, B. Wolfram, “Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters”, *IEEE transactions on Robotics* 23.1 (2007): 34-46. *IEEE transactions on Robotics*, 23.1, 34-46, 2007.
- [8] “move_base”, [online] Available: https://wiki.ros.org/move_base.
- [9] D. Malyuta, “Guidance, Navigation, Control and Mission Logic for Quadrotor Full-cycle Autonomy”, *Master thesis. 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109, USA: Jet Propulsion Laboratory*, Dec. 2017.
- [10] J. Wang, E. Olson, “AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4193–4198, ISBN: 978-1-5090-3762-9, 2016.
- [11] 三橋俊哉, 鯨坂志門, 吉澤美玲, 清水拓, 中村壮亮, “屋内測位システムの高精度化に向けた電波タグ測距性能の評価”, 第22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, 3E4-07, 2021.
- [12] “MoveIt Motion Planning Framework”, 2018, [online] Available: <https://moveit.ros.org/>.
- [13] “RViz”, [online] Available: <http://wiki.ros.org/rviz/>.
- [14] K. M. Farinholt, G. Park, and C. R. Farrar, “RF Energy Transmission for a Low-Power Wireless Impedance Sensor Node”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 7, pp. 793-800, 2009.
- [15] N. Kawashima and K. Takeda, “Laser energy transmission for a wireless energy supply to robots”, in *Proc. Symp. Robotics and Automation in Construction*, pp. 373–380, 2005.
- [16] Y. Jang and M. M. Jovanovic, “A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 3, pp. 520-527, 2003.
- [17] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljac, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, *Science (80-.)*, vol. 317, no. July, pp. 83-87 (2007)
- [18] T. Imura, “Wireless Power Feeding—Basic Technology and Overview of Electromagnetic Resonant Coupling—”, *Journal of Japan Institute of Electronics Packaging* 13.6 [Translated from Japanese.], pp. 422–426, 2010.
- [19] A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss, W. Burgard, “OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees”, *Autonomous robots*, 34, pp. 189-206, 2013.
- [20] R. Mur-Artal, MMM. Jose, TD. Juan, “ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system.”, *IEEE transactions on robotics*, 31.5, 1147-1163, 2015.