

令和元年6月27日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06192

研究課題名(和文) 遠隔操作するロボットに資する推定通信状況を元とした行動生成に関する研究

研究課題名(英文) A study on path planning based on estimated communication condition for tele-operated mobile robot.

研究代表者

羽田 靖史 (Yasushi, Hada)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：70455450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：被災地の調査を行う遠隔操作型災害対応ロボットが、現在地点の無線通信状況と環境情報を元に、活動範囲の無線通信状況を動的に推定し、その結果から半自動的に通信状況の悪化防止・改善を行う技術の研究を行った。本研究により、災害対応ロボットが通信切断により行動不能に陥る事故を抑えることができる。

研究では電波伝搬シミュレーション技術を用いた建屋内の電波状況を推定し、ここから環境の電波状況を推定し、電波の弱い個所を避けつつ目的地に向かう経路を生成することができた。

また、通信が不可能な広い環境において、中継器を設置する個数、場所を決定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

災害対応ロボットは、有線通信を利用することがあるが、ケーブルの重量や引っかかりなどの問題がある。無線通信の不確実性を解決すれば、ロボットの無線遠隔操縦をより信頼性高くすることができる。

本研究は、我々がこれまでに行なった電波伝搬シミュレーション技術を用いて環境の電波状況を可視化する研究をさらに推し進め、環境中で通信が途切れないような走行経路を求めた。また通信断絶がおきるような広範囲の環境では無線中継技術を用いるが、環境中のどこに、何台の中継器を置くのが最適かを求める研究も行なった。これらの研究により、災害対応ロボットの通信トラブルを減らすことができる。

研究成果の概要(英文)：We studied on a path planning method based on wireless communication condition which is estimated by electromagnetic simulation to prevent communication lost between remote controlled mobile robot and its operator. This technology enables the robot to avoid a weak place of radio waves in its navigation area.

We also studied on installation number and placement of communication repeaters in wide area navigation of mobile robot.

研究分野：ロボットのための通信

キーワード：ロボット 遠隔制御 電波計測 シミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

2011年の東日本大震災は、我が国で災害対応ロボットが本格的に用いられた初の大規模災害であった。本研究代表者も、当時 NEDO「閉鎖空間内高速探査群ロボット」（代表研究者：田所諭）プロジェクトにおいて開発していた「クインス」を改良したロボットを、東京電力福島原子力発電所の内部探査に用いた。このロボットは、無線通信の不確実性を避けるため、有線ケーブルを用いた通信を利用していたが、数回の探索の後、ケーブルの断線により建屋内で行動不能に陥った。もし無線通信の不確実性を回避できれば、このようなトラブルを避けることができたであろう。

そのため、本研究代表者は、平成 25 年度から科研費若手研究(B)「遠隔操作する災害対応ロボットに資する電界強度マップの動的生成に関する研究」において、ロボットが自らのセンサで未知環境の地図を作成しながら、その地図を用いた電波伝搬シミュレーションを行うことにより、未知環境の電波状況を推定する研究を行った。

2. 研究の目的

本研究は、以前の研究を推し進め、推定電波状況を用いて電波の弱い個所を避けつつ目的地に向かう経路を動的に生成し、操作者に提示することを目的とした。本研究により、災害対応ロボットが通信切断により行動不能に陥る事故を抑えることができる。

3. 研究の方法

本研究は、①過去及び未来の無線通信状況の推定技術の高度化、②通信状況の悪化を抑えるための行動生成、③状況悪化時の自律動作による通信回復、の三つの要素からなる。

③については本研究では当初、ロボットが通信断絶した際に自律的に移動し通信状況の復旧を行う技術の開発を計画したが、平成 30 年度に出された「空の産業革命に向けたロードマップ 2018」によると、ドローンの目視外飛行においては自機の状態を目視に変わり確認する機能が必須とされ、すなわち通信がなされない状態での自律行動は禁止されることとなった。もちろん直ちに地上の災害対応ロボットにもあてはまるものではないが、本研究はドローンでの利用も考えていること、また通信断絶時の復旧よりも、まず通信を断絶させないことが重要であると考えたことから、通信断絶の防止の研究を行うこととした。限られた電波出力で通信を断絶させないためには、中継器を用いて通信範囲を広げる手法（無線マルチホップ通信）が考えられる。我々は以前の研究において、ロボットが自ら中継器を設置することにより通信可能な範囲を広げる研究を行ったが、本研究ではこれを推し進め、環境中のすべてで通信可能となる中継器の最適な位置ならびに個数についての配置計画の研究を行った。

4. 研究成果

①過去及び未来の無線通信状況の推定技術の高度化

以前の研究では、SLAM 技術を用いて逐次的にロボットの環境地図を作成し、これを元に逐次的に電波伝搬シミュレーションを行ったが、環境の構成材料については推定を行っておらず、もっぱらコンクリートを仮定していた。本研究では、地図をおおまかな群に分割し、それらを各々「金属」「非金属」の 2 種の可能性を考えシミュレーションを行い、複数仮説を立て、その後ロボットを進行させて計測した実測値と比較することで、過去に遡及して仮説を検証し構成材料を推定する。研究の結果、ビル内環境での検証では、58～74%の精度で物体の素材を推定できた。この時、環境中に部材が n 個あるときには、 n 乗通りの仮説に基づいたシミュレーションを行う必要があり計算が膨大になるため、逐次生成される SLAM 地図の増分の部材に限り仮説を立てることにより、計算時間を圧縮した。

また、以前の研究の問題点として、ロボットが進行するにつれ環境地図が大きくなり、シミュレーション時間が膨大になり、かつ発信源から離れた場所の精度が悪化することが明らかとなっていた。このため、特に現在のロボット周囲の環境が複雑でない場合において、電波伝搬シミュレーションを周囲の限定した範囲のみで行い、計算時間を圧縮する手法を開発した。また、SLAM 地図を作るために用いているレーザースキャナにはノイズがあり、特に段差の隅部分において地図が不正確になることが明らかとなったため、ノイズを取り除きより正確な電波伝搬シミュレーションを行う技術を研究した。

図 1 と図 2 に、工学院大学新宿校舎地下 2 階の環境地図とそこから求められた電界強度マップの一例を示す。

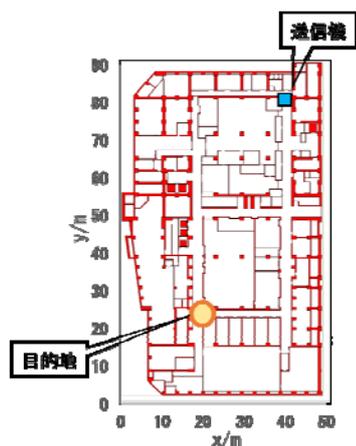


図 1：環境地図

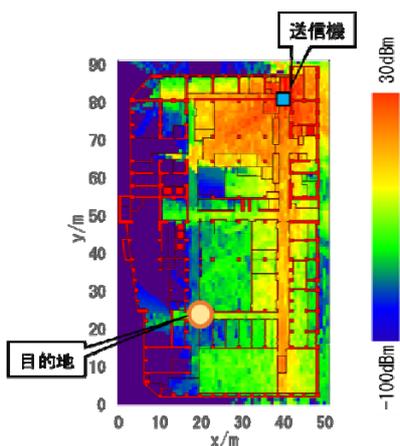


図 2：電界強度マップ

②通信状況の悪化を抑えるための行動生成

電波伝搬シミュレーションで求めた環境中の電界強度地図から、ロボットの行動経路を生成する研究を行なった。手法としては、まず環境地図の走行可能な場所を交差点単位でグラフ化し、通路単位での大域的な経路生成を行う。その次に、各経路内での電波の弱い個所を避けた詳細な経路を生成し、最終的にこれらをつなぐことで詳細な経路を生成する。

工学院大学新宿校舎地下二階の地図を用いた結果を以下に示す。この地図内の経路をつないだグラフ構造が図 3 であり、通路内の電波伝搬シミュレーションの結果を図 4 に示す。このグラフ構造で大域的な経路生成を行うと、スタート(A)→(B)→(C)→ゴール(F)という大まかな経路を生成することができる。この経路生成にはダイクストラ法を用い、経路コストは通路内の平均受信電力値を用いた。結果から、電界強度が低い(D)(E)間や(E)(F)間を避けることができているのがわかる。

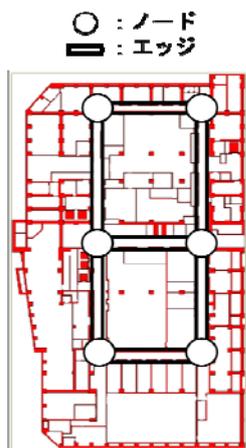


図 3：経路を元にしたグラフ構造

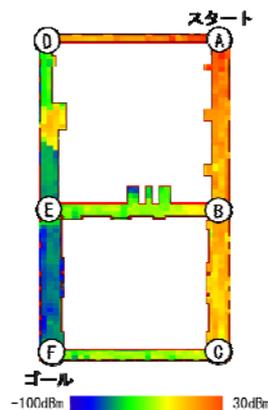


図 4：経路グラフ上の電界強度値

次に、大域的な経路生成で得た(A)(B)間、(B)(C)間、(C)(F)間の各経路において、詳細な経路生成を行った結果が図 5~7 である。この経路生成では、ポテンシャル法を用い、一般的に用いられる評価値であるゴールからの引力、ならびに壁面からの斥力に加えて、本研究では電界強度値を元にした斥力場を加えた評価指揮を開発した。この手法により、単に電波状況的に優位な経路を取るだけでなく、環境中の障害物との衝突なども考慮した経路を生成することができる。結果を見ると概ねうまく電界強度の低い場所ならびに障害物を避けた経路生成ができていたが、ゴール直前の(F)近傍において、避けるべき場所を通過してしまっている。これはゴール近傍ではゴールに向かう引力場が大きくなるためであり、電界強度による斥力場の与え方の改良が今後の課題である。

これらの経路を提示することにより、操作者は通信品質の最も良い（遭難をすることのない）経路を確認しながらロボットを操縦し、通信トラブルを減らすことができる。

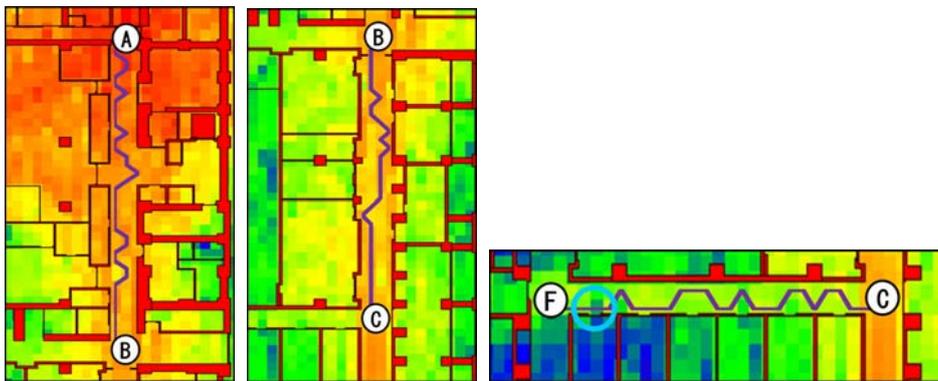


図 5 : (A)(B)間経路 図 6 : (B)(C)間経路 図 7 : (C)(F)間経路

③状況悪化時の自律動作による通信回復

中継器の配置計画の研究は、美術館問題を用いた数学的解法と、環境の諸事情を考慮した上で絞り込みを行う実用的解法の 2 種類の研究を行い、屋内外で妥当性の検証を行った。

美術館問題を応用した数学的解法については、図 8 のように環境を三角形に領域分割し、頂点に中継器を置いていくことにより、見通し通信が可能な中継器の場所と個数を求めることができる。図 9 の工学院大学新宿校舎地下 2 階の環境では、図 10 のように 19 個の中継器の位置を求めることができた。しかし電波では必ずしも見通しがなくとも通信可能であるため、ここから更に電波シミュレーションを用いて中継器台数の削減を行い、結果図 11 のように 3 個にまで通信機の位置を最適化することができた。その際の環境の電界強度シミュレーション結果は図 12 のようになり、すべての通路において通信可能となっていることがわかる。

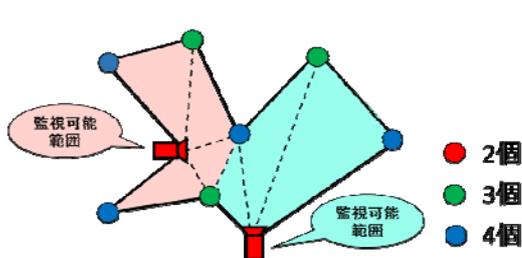


図 9 : 美術館問題の解法

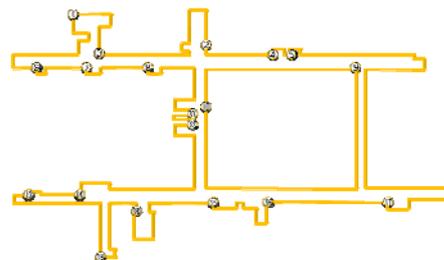


図 10 : 美術館問題で求めた設置位置候補

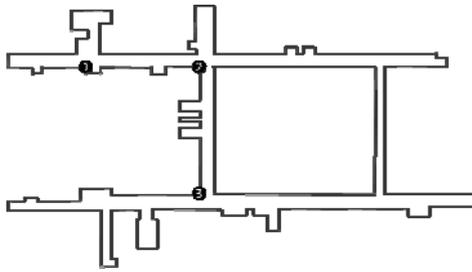


図 1 1 : 最適化した設置位置

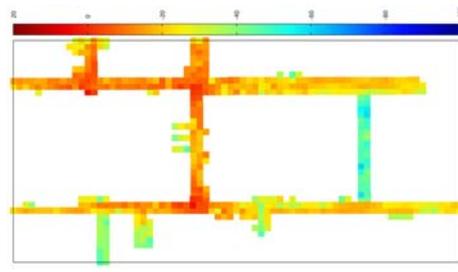


図 1 2 : 経路内の電界強度マップ

環境の諸事情を考慮した上で絞り込みを行う実用的解法については、小浅間山周辺でドローンを飛行させることを想定した、地上通信機の設置場所の検討を行った。通信機の設置場所は、アクセスのしやすさ、電源等のインフラ環境、地形、費用などにより制限を受ける。本研究ではドローン空撮業者、火山学者等のアドバイスを受け、無線機設置可能な候補点を出した上で、各候補点からの電波伝搬シミュレーションを行い最適化を図る手法を開発した。候補点は図 13 中(A)~(D)の 4 点であったが、電波伝搬シミュレーションの結果図 14 から(A)(C)の 2 か所に無線機設置をすれば、調査エリアの全てで通信可能であることを求めることができた。これにより、より実用的かつ最適な無線機設置が可能となった。

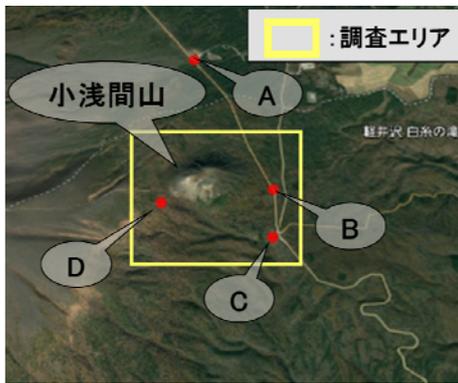


図 1 3 : 調査エリアと無線機設置候補点

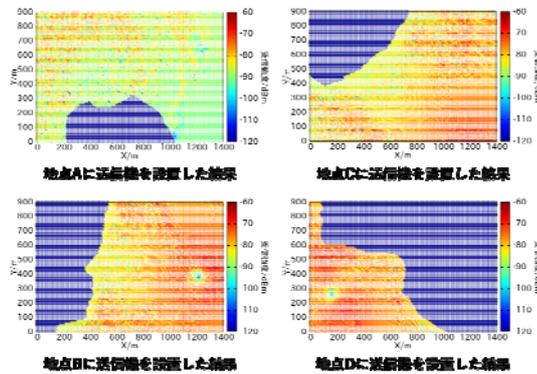


図 1 4 : 各候補点からの通信範囲

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 19 件)

- ① 金山浩士, 羽田靖史, ロボットの遭難を防ぐための電波伝搬シミュレーションにおける環境構成材料の影響, Robomech2016, 2P2-01b3, 2016.
- ② 青柳竜馬, 金山浩士, 金聖熙, 羽田靖史, 簡素な電波状況推定を用いたロボット周辺の電波状況の提示, Robomech2016, 2P2-01b4, 2016.
- ③ 長沢翼, 羽田靖史, 漏洩同軸ケーブルを用いた階段環境における通信, Robomech2016, 2P2-01b5, 2016.
- ④ 羽田靖史, ロボットの通信に係る最新動向, SI2016, 3M3-1, 2016.
- ⑤ 金山浩士, 羽田靖史, 金聖熙, ロボットの遭難を防ぐための電波伝搬シミュレーションによる環境構成材料推定, SI2016, 3M3-6, 2016.
- ⑥ 吉田裕, 羽田靖史, 半透明フィルムを用いたマルチエコーの応用システムの提案, SI2016, 3D4-2, 2016.
- ⑦ 関道人, 羽田靖史, 制御停止と電源断を併用する無線停止システムの検証, SI2016, 3M4-2, 2016.
- ⑧ 吉田裕, 羽田靖史, 信号波形を基にした測域センサにおける誤検出データ除去手法の

提案, 79th IPSJ, 3P-08, 2017.

⑨ Yutaka Yoshida and Yasushi Hada, Proposal of Corner Shape Correction Method Based on Received Intensity of Laser Range Finder, SAMCON2018, 2018.

⑩ 金山浩士, 羽田靖史, 長沢翼, ロボットの遭難を防ぐための電波伝搬シミュレーションによる環境構成材料推定の高精度化, Robomech2017, 1P2-I05, 2017.

⑪ 吉田裕, 羽田靖史, 線分環境地図のための LRF の受光強度を用いたクラスタリング手法の提案, RSJ2017, 1H2-03, 2017.

⑫ 羽田靖史, 無人移動体画像伝送システムの普及に関する検討, SI2017, 1D4-01, 2017.

⑬ 長沢翼, 羽田靖史, 屋内環境における電波伝搬シミュレーションを用いた遠隔操縦ロボットのための経路生成, SI2017, 1D4-02, 2017.

⑭ 松岡竜司, 羽田靖史, 美術館問題を応用したマルチホップ通信のためのノード配置計画, SI2017, 1D4-08, 2017.

⑮ 關道人, 羽田靖史, センサ計測可能範囲を考慮したダイクストラ法による移動ロボットのオフライン経路計画, Robomech2018, 2A2-F16, 2018.

⑯ 關道人, 羽田靖史, 事前に計算したセンサ見通し量を考慮した移動ロボットの経路計画及びその評価, SI2018, 3C2-03, 2018.

⑰ 小林美陽, 羽田靖史, 電波伝搬シミュレーションを用いた遠隔操縦ロボットのための経路生成, SI2018, 1B1-07, 2018.

⑱ 武藤裕之, 羽田靖史, 嶋地直広, 測域センサと鏡による反射を利用した筒状ライトカーテンの開発, SI2018, 3C1-12, 2018.

⑲ 關道人, 羽田靖史, 移動ロボットのセンサ計測可能範囲を考慮した経路生成, 80th IPSJ, 2018.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。