

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870232

研究課題名(和文)電力残量に適応して動的再配置可能な無線通信網の自律構築・最適化

研究課題名(英文)Effective Deployment of Wireless Mesh Network using Mobile Robots Based on RSSI

研究代表者

服部 聖彦(Hattori, Kiyohiko)

国立研究開発法人情報通信研究機構・耐災害ICT研究センター ワイヤレスメッシュネットワーク研究室・主任
研究員

研究者番号：00435794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では受信電波強度(RSSI)のみで自律分散的にロボットを所望エリアに展開・拡散させ、無線メッシュネットワーク構築手法を提案した。具体的にはRSSIのみを用いて効率的な被覆・展開を可能とするロボット展開アルゴリズムを提案し、災害時の路面状況や地形、通信環境を総合的に考慮したシミュレーションによる検証および実機群ロボットを用いてその有用性を評価した。その結果、提案手法は様々な条件下において、従来手法の大きな問題であった非効率な移動距離を劇的に短縮できることに加え、所要時間も従来手法と同程度かそれ以下の時間で展開できることが明らかになり、従来手法に対する提案手法の優位性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：This research propose a novel deployment method of Wireless Mesh Network (WMN) using a group of mobile robots equipped with a wireless transceiver. Our proposed method utilize rough relative positions of the robots estimated by Radio Signal Strength Indicators (RSSI) to deploy WMN. Our algorithm is consist of following two parts; (1) Fully distributed and dynamic role decision method among robots and (2) Adaptive direction control using time difference of RSSI. In this research, we evaluate performance of proposed and conventional methods which use RSSI at simulated disaster area including radio-wave propagation and wireless communication protocol models. As a result of simulations and real robots experiments, our proposed method outperform conventional methods in aspects of required deployment time and traveled distance of the robots.

研究分野：群ロボット

キーワード：センサー被覆問題 無線ワイヤレスメッシュネットワーク Swarm Robotics, Resilient ICT

1. 研究開始当初の背景

指定された領域を通信機器もしくはセンサ機器で被覆することを考えた場合、これはセンサ領域被覆問題として抽象化することが出来る。センサ領域被覆問題へのアプローチ法として(1)固定ノードを用いたセンサーネットのアプローチと、(2)通信機器を保持する小型移動ロボット群を用いたアプローチの2つに大きく分類することが出来る。

前者(1)のアプローチとしては Himanshu や服部に代表される手法がある。これら手法では監視する領域に対し予め必要十分な数のセンシングノードが一葉ランダムに配置されていることを想定し、適切なノード群を選択、最小ノード数(省電力性の最大化)で領域を被覆することが大きな目的である。被覆領域と通信有効距離、センシング有効距離が決まれば理論的な最適位置、個数を求めることができる。しかしながら、実環境における通信有効距離、センシング有効距離は配置された環境に大きく依存するため、実環境で実際にセンシングや通信を行いつつ逐次的に適切なノードを選択することが必要となり、容易に解決できる問題ではない。

一方、後者(2)の小型移動ロボット群を用いたアプローチの手法の一つとして Blanket coverage [Payton, 2005]が挙げられる。これは既定数のロボットが初期位置にある程度固まって配置され、各ロボットが局所通信と自律制御により指定被覆領域に拡散し、被覆率が可能な限り向上するように配置場所を探索するものである。

2. 研究の目的

本研究では災害等により既存のセンサ・通信網が使用不能な環境を想定し、通信機等を保持した小型自律ロボットを多数導入・展開させることで、動的かつ頑健な臨時通信網の構築の実現を目的とする。具体的には多数の小型ロボットが飛行機・トラック等から逐次的に対象領域に放出された後、ロボット自身が環境と近隣ロボット群との関係を認識、完全自律制御で迅速・適切に対象領域に展開して通信網を構築、通信領域の最大化するアルゴリズムの提案およびシミュレーションによる検証、実機実験を用いた評価を行う。

3. 研究の方法

本研究ではネットワークシミュレータと実機実験を通して提案手法の有効性を検証した(実機実験に関しては紙面の都合上割愛した。詳細は雑誌論文(1)を参照されたい)。提案手法では、通信機を搭載した複数のロボットが他ロボットとの通信およびそれに付随する受信電波強度 RSSI を用い、ロボット間距離が効率的に離れるよう移動・展開制御を行う。RSSI に基づいてロボットを展開させるために、(1)移動ロボット・基準ロボット・停止ロボットの3つの役割の自律・動的決定および、(2)移動方向の修正からなる方法を

新たに提案、導入する。

ここで、既存研究に着目すると、RSSI による目標領域被覆を目的とした Correll の研究や芝田の研究では、ロボットの移動方向がランダムに決定されるという効率の面で大きな課題があった。一方本研究では、効率的に移動方向を修正・制御するために、移動ロボット・基準ロボットの役割を導入する。移動ロボットは移動中に複数回基準ロボットと通信を通して RSSI を測定することにより、移動中のロボット自身が基準ロボットに対し近づいているか、遠ざかっているかを間接的に推定することが出来る。これにより、接近時は方向転換し、遠ざかっている場合は現在の移動方向を維持、前進するという考えが提案手法における移動方向修正の基本的なアイデアである。提案手法におけるロボットは図1に示すように、(1)移動ロボット状態、(2)基準ロボット状態、(3)待機ロボット状態の3つの状態を遷移することで展開を行う。(1)移動ロボット状態は他の基準ロボットとの通信により RSSI を測定しながら基準ロボットから離れるように移動する。(2)基準ロボット状態は移動ロボットが移動を終了するまで停止し続け、移動ロボットから要求が来たときは RSSI を測定し、測定結果を返信する。(3)待機ロボット状態では一定時間待機し続け、他のロボットから基準ロボットとして指定されなかった場合は移動ロボットとなる。

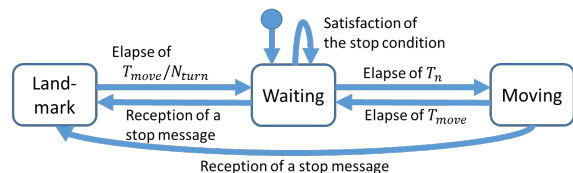


図1 ロボットの状態遷移モデル。

(1) 移動・基準ロボット状態の決定

移動・基準ロボット状態の決定は図2に示すような手順で決定される。前述の通り、ロボットは移動・基準・待機の3状態のいずれかを状況に応じて選択する。全てのロボットの初期状態は待機状態であり、図2(a)で示すように周囲のロボットとの RSSI を定期的に測定しつつ待機する。そして待機時間が満了したロボットのうち、条件を満たしているロボットは、図2(b)のように移動ロボット状態に遷移する。遷移した移動ロボットは、図2(c)のように RSSI 測定を行うことで RSSI の強い上位 N 台のロボットに対し、図2(d)のように待機命令を送信、基準ロボットに指定する。なお、待機命令を受信した全てのロボットは強制的に自身の現状態をキャンセルして基準ロボットに遷移する。待機ロボットが移動ロボットになるまでの待機時間は式(1)によって決定される。

$$T_n = U_rand * (c - N_n * b) + r_max * a \quad (1)$$

ここで、 n はロボットの ID、 T_n はロボット n の待機時間[s]、 U_{rand} は[0,1]の一様乱数、 r_{max} はロボット n の周囲ロボットとの電波強度[dBm]のうち最強のもの、 N_n はロボット n の周囲ロボットの数、 a および b は最強の電波強度および周囲ロボット台数をどのくらい重視するかを示す重み係数であり、 c はどの程度乱数要素を入れるかを示す重み係数である。なお、 r_{max} は負の値であることに注意されたい。この式によって、周囲に存在するロボットとの距離が近いロボットほど待機時間が短くなり移動ロボットに遷移しやすくなるため、ロボットが密集している部分の展開が促進され、効率的な拡散が期待できる。

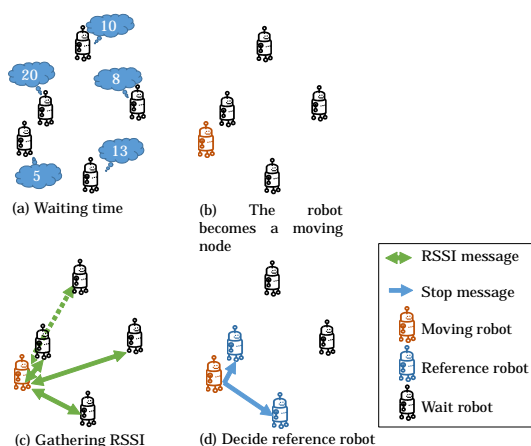


図2 ロボットの役割分担の流れ

移動状態のロボットが停止するための条件として、移動ロボットの周囲に存在するロボットとの間で計測した RSSI 値の中で最強値を使用する。この値が閾値以下の場合、周囲ロボットとの距離が十分に離れていると判定してロボットは停止する。これは最近接ロボットとの距離が閾値以上になれば停止することを意味する。停止条件の閾値は、移動を開始できる斥力発生閾値 R_{acq} と、移動を中断する閾値 R_{min} の2つから求められる。これを図で表すと以下の図3のようになる。この図3において、きわめて近い Repel 領域に他のロボットが存在する場合は移動ロボットに遷移する。移動ロボットに遷移した場合、基準ロボットから離れるように移動する。この時、移動のしすぎによる通信不能を抑制するため、ロボット間距離をある程度以下に保つ必要がある。そこで、移動ロボットは RSSI が R_{min} を下回らないように注視し、下回る Stop 領域に入った場合は即座に停止する。これにより通信リンクが切れることを防ぐ。

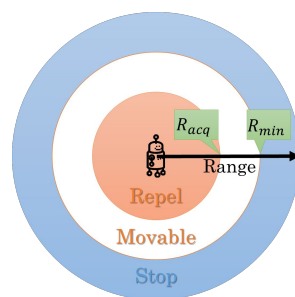


図3 RSSI 閾値設定

(2) 移動方向の修正

移動ロボットと基準ロボットが先のアルゴリズムで自律分散的に決定された後、移動ロボットは一定間隔で基準ロボットとの RSSI を計測、距離が適切に離れているかを確認しながら移動を行う。ここで図4をもとに詳細を説明すると、移動ロボットは移動の前後で基準ロボットとの RSSI の測定・比較を行い、RSSI が強くなっていた場合は基準ロボットに近づく方向に移動している可能性が高いため、右にあらかじめ設定された角度、 A_{turn} 度だけ方向転換を行う。一方 RSSI が弱くなっている場合は移動方向が適切であると考えられるため、現在の移動方向を維持・直進する。移動ロボットが確実に基準ロボットとの距離が離れる方向に移動することを保証はできないが、複数回の試行を行うことにより確率的な移動を実現している。また本手法では RSSI の時間変化のみを使用しているため、相対および絶対位置情報が不要である。

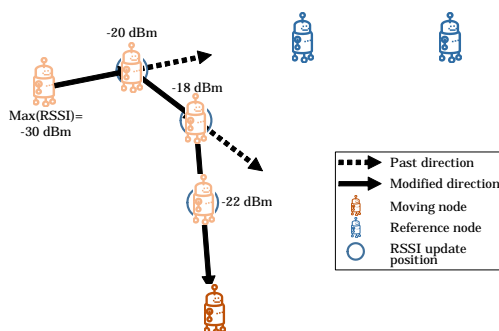


図4 RSSI 時間差分を用いた移動方向制御

4. 研究成果

提案手法の有効性を検証するため、シミュレーションモデルを構築した。また、Saitou および芝田の手法を比較法として採用しているシミュレーションには無線通信、電波伝搬およびプロトコルレベルでの検証が可能な Space-Time Engineering 社のネットワークシミュレータ Scenargie を用いた。シミュレーション環境として、6 種類の行動不能率を適用した計 18 通りを設定し、すべての組み

合わせにおいて乱数 Seed を変更して 5 試行を行った。詳細は文献(1)を参照されたい。

シミュレーションでは、ロボット群が目標エリアへの展開を完了したと判定される場合に終了する。ここでの展開完了条件は、(1)目標領域の被覆面積率(カバレッジ)が 99%以上になる、(2)開始からシミュレーション内時間で 24 時間経過する、(3)一定時間被覆面積率の変動がない場合のいずれか一つが満たされた場合である。また評価には、領域の何割を被覆できたかを表す(1)最終カバレッジ、(2)全ロボットの移動距離の総和を用いる。ここでの被覆面積率(カバレッジ)とは、目標領域のうち何割の領域がロボット群の通信機能範囲で被覆されているかを表す指標である。各ロボットの被覆範囲は半径 100m 以内の領域に無線ネットワーク網を提供できるものとして定義される。カバレッジの最大値は 1(100%)であり、これは領域内の任意の地点から最近ロボットまでの距離が 100m 以下となり、すべての地点でネットワーク網への接続が可能であることを表す。結果は各評価指標の平均と分散を算出してグラフで表している。

シミュレーションの結果を図 5、6 に示す。図 5 は最終カバレッジと行動不能率の関係を表すグラフであり、縦軸は最終カバレッジ、横軸は行動不能率(scale parameter)をそれぞれ表す。これを見ると、各手法とも行動不能率が高くなるにつれて最終カバレッジが低下していることが読み取れる。このことから芝田手法、Saitou 手法、提案手法のいずれの手法も行動不能率の上昇にともない領域被覆に失敗しやすくなることが分かる。これは行動不能率が上がると移動不能になるロボットが増加し、結果的に領域被覆に貢献可能なロボット数が減少するからであると考えられる。次に手法別に見ると、芝田手法は行動不能率を適用した全てのケースで最終被覆率が低下しているのに対し、Saitou 手法と提案手法では常に高い最終カバレッジを維持可能なことが分かる。これは芝田手法の方が Saitou 手法や提案手法と比較して被覆に必要な移動距離の平均が長いため、結果として行動不能になるロボット台数が増加することが原因だと考えられる。このことから、Saitou 手法と提案手法は領域被覆において行動不能率が高いような環境においても比較的環境の影響を受けずに被覆する能力が高いと言える。

次の図 6 は総移動距離と行動不能率の関係を表すグラフであり、縦軸は全ロボットの移動量の総和である総移動距離の平均、横軸は行動不能率をそれぞれ表す。このグラフを見ると、全体として行動不能率が上がるにつれ総移動距離が短くなるという傾向が読み取れる。以上において、提案手法は芝田手法、Saitou 手法と比較して同等以上の結果を示していることが読み取れる。

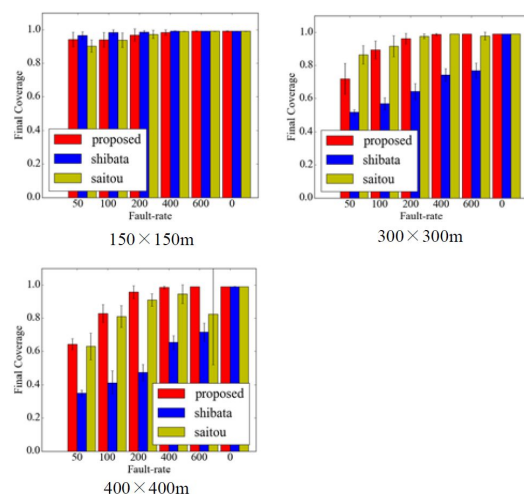


図 5 被覆領域サイズと被覆率の関係

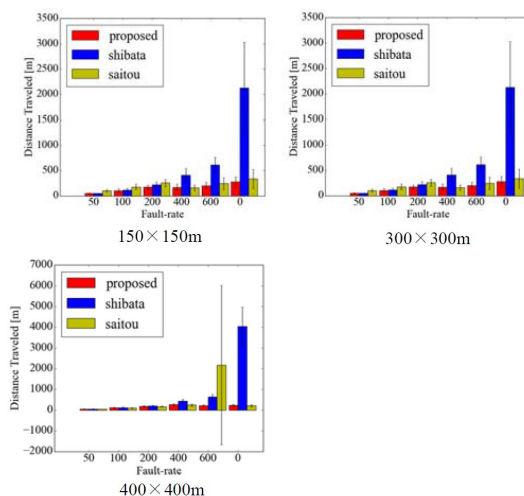


図 6 被覆完了間に必要な全ロボットの移動距離総和

これらの成果から、提案手法は災害時などのロボットが移動出来なくなる可能性のある路面状況や周囲環境においても、少ない移動距離すなわち少ない電力で効率的に臨時通信ネットワーク網の構築が可能であることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

建部尚紀、服部聖彦、加川敏規、大和田泰伯、浜口清、高玉圭樹、受信電波強度を用いた効率的な自律ロボット群展開制御による無線通信網構築 - 災害時の障害を抽象化した行動不能率による検証 -、計測自動制御学会論文誌、査読有、第 52 巻第 3 号、2016、10.9746/sicetr.52.160

〔学会発表〕(計 15 件)

Naoki Tatebe, Kiyohiko Hattori,

Toshinori Kagawa , Yasunori Owada , Kiyoshi Hamaguchi , and Keiki Takadama , Wireless Mesh Network Deployment by Real SWARM Robots based on RSSI , The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM) , 査読有 , Kyoto , Japan , 2015 年 10 月 29 日 .

Kiyohiko Hattori , Toshinori Kagawa , Naoki Tatebe , Yasunori Owada , and Kiyoshi Hamaguchi , Generalized Measuring-Worm Algorithm: High-Accuracy Mapping and Movement via Cooperating Swarm Robots , The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM) , 査読有 , Kyoto , Japan , 2015 年 10 月 30 日 .

Kiyohiko Hattori , Cooperative robotics: from disaster-resistant systems to space exploration , " Seminar of Polytechnique Montreal , Montreal , Canada , 招待講演 , 2015 年 9 月 22 日 .

Naoki TATEBE , Kiyohiko HATTORI , Toshinori KAGAWA , Yasunori OWADA , and Kiyoshi HAMAGUCHI , Energy Efficient Construction Algorithm for Mobile Mesh Networks , Asia-Pacific Conference on Communications (APCC) , 査読有 , Pattaya , Thailand , 2014 年 10 月 1 日 .

Kiyohiko HATTORI , Toshinori KAGAWA , Yasunori OWADA , Kiyoshi HAMAGUCHI , and Naoki TATEBE , Autonomous Deployment Algorithm for Resilient Mobile Mesh Networks , Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) , Sendai , Japan , 査読有 , 招待講演 , 2014 年 11 月 6 日 .

6 . 研究組織

(1)研究代表者

服部 聖彦 (Kiyohiko Hattori)

国立研究開発法人 情報通信研究機構 耐災害 ICT 研究センター ワイヤレスメッシュネットワーク研究室

主任研究員

研究者番号 : 00435794