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—

建 部 尚 紀*・服 部 聖 彦**・加 川 敏 規**
大和田 泰 伯**・浜 口 清**・高 玉 圭 樹*Effective Deployment of Wireless Mesh Network Using Mobile Robots Based on RSSI
—Performance Evaluation from the View Point of Movement Impossibility Rate—Naoki TATEBE*, Kiyohiko HATTORI**, Toshinori KAGAWA**,
Yasunori OWADA**, Kiyoshi HAMAGUCHI** and Keiki TAKADAMA*

This paper 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 outperformed conventional methods in aspects of required deployment time and traveled distance of the robots.

Key Words: sensor cover problem, wireless mesh network, swarm robotics, resilient ICT

1. はじめに

近年、災害時における臨時通信網の一つとして、無線メッシュネットワーク (以下、WMN と呼称) が着目されている。WMN とは複数の無線通信機で構成されるマルチホップ無線通信網であり、各通信機が中継することにより、通常の見通し通信では不可能な遠距離、広範囲でも通信が可能になるという大きな利点がある。加えて、WMN はネットワーク的な頑健性をもち、任意の通信機が故障した場合も自動的にそれを検知、迂回ルートを構築することができる。これらの特徴から、災害時に焦点を当てた WMN の研究¹⁾が存在する。特に東日本大震災に代表される大規模災害発生時には、通常利用されている公衆無線基地局や基幹網の破損に加え、通信集中

による輻輳で通信が困難になることが報告²⁾されている。このような状況では被災者間の通信、被災者と支援組織の通信および被災地と支援地との通信などが困難になり、効率的な避難支援や救助活動を行なうことが難しい。また、被災者が家族・知人との連絡を取ることも困難になり、安否確認ができないなどの社会的不安の要因³⁾にもなり得る。この問題への対処法の一つとして、多数の無線通信機 (以下、無線ノードと呼称) を発災後に被災地に迅速に設置、臨時的 WMN を構築する案が提案¹⁾されている。

そこで本研究では、無線通信機を搭載した移動ロボット群を移動・展開させることにより WMN を構築するアルゴリズムを考える。被災地における瓦礫などの障害物が多数存在する路面状況での移動に伴う駆動部の故障や乗り上げを抽象化した行動不能率を新たに提案し、それを適用したシミュレーションおよび実機実験を通して提案手法の有効性を検証することを目的とする。

以下、2 章において関連研究についてまとめ、3 章では被災地路面状況の独自モデル化である行動不能率について説明する。つぎの 4 章で提案手法について説明した後、5 章と 6 章でそれぞれシミュレーションの詳細と結果について説明し、続く 7 章で実機ロボットを用いた実験について述べる。最後の 8 章で本研究をまとめる。

* 電気通信大学大学院情報理工学研究所 調布市調布ヶ丘 1-5-1

** 情報通信研究機構防災 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 仙台市青葉区片平 2-1-3

* Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu

** Resilient ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, 2-1-3 Katahira Aoba-ku, Sendai

(Received June 15, 2015)

(Revised January 27, 2016)

2. 関連研究

本章では、WMN 構築に着目した既存研究について紹介した後、その特徴をまとめる。ここで、既存研究の無線ノード設置法に着目すると、(1) 固定の無線ノードを多数設置した上で使用する通信ノードを状況に応じて選択・ネットワークを構築するアプローチと、(2) 無線通信機を搭載した移動ロボット群を用い、ロボット群が状況に応じて適宜移動・展開することによりネットワークを構築するアプローチの大きく二つに分けることができる。

(1) 固定の無線ノードを設置するアプローチ

このアプローチでは Fig. 1 に示すように、あらかじめ目標領域に無線ノード群を多数配置するアプローチ⁴⁾である。この場合、使用する最小数の無線ノードを選択・被覆することで全体としての電力使用量を削減、ネットワーク全体の寿命を延ばすことが目的であり、代表的な研究として Gupta らの研究⁵⁾が挙げられる。このアプローチでは、無線ノードに移動機能などが不要なため小型化、低コスト化が可能という利点がある。一方で無線ノードを何らかの方法で目標領域に展開する必要があるため、災害時に適用可能な展開方法が必要である。

(2) 移動ロボットを用いるアプローチ

このアプローチでは Fig. 2 に示すように目標領域に、無線ノードを搭載した移動ロボットが展開、移動することで、領域全体を被覆するというアプローチである。このアプローチでは移動ロボットはほかの移動ロボットおよび環境との位置関係を何らかの方法で取得した後、行動を決定する。移動ロボットを用いるアプローチでは使用する無線ノード数を減らせるという利点がある。一方で、各無線ノードに位

置推定機能や移動機構とそれを支える大容量のバッテリーが必要という制約もある。

本研究では、必要な無線ノード数が比較的少なく、動的に配置可能な移動ロボットを用いるアプローチに着目することとし、本論文においてロボットはすべて無線ノードとしてふるまうことができるものとする。

つぎに移動ロボットを用いた既存研究として Payton らの研究⁶⁾が挙げられる。Payton らの手法では、各ロボットに 8 個の赤外線通信機兼距離センサを搭載することで、他ロボットとの相対位置を推定する。これにより、他ロボットとの距離間隔を一定に維持、領域に展開することを可能としている。赤外線を用いて測位するため、ロボット間距離が広い場合や屋外での適用が困難という問題がある。

これに対し、無線通信を用いる方法も存在する。Cortes らの手法⁷⁾は位置情報が取得可能なロボット群を用いることで、適切なロボット間距離での配置が可能である。無線通信を用いた方法では、赤外線などと違い遠距離通信が可能というメリットがある一方、反射波やマルチパスフェージングによるノイズで距離や位置推定が容易ではないという大きな問題がある。このため Cortes らの手法に代表されるように通信機に加えて位置推定センサなどを用いる手法が多い。ここで位置推定方法に着目すると、移動ロボットを用いるアプローチはさらに以下のように分類できる。

A) 絶対位置センサを用いるアプローチ

絶対位置情報を取得できる GPS などのセンサを用いる方法。

B) 相対位置センサを用いるアプローチ

他ロボットとの相対的な位置情報を取得できる赤外線、距離センサなどを用いる方法。

C) 測位センサを一切用いないアプローチ

Cortes らの研究をはじめとした A) 絶対位置センサを用いるアプローチや B) 相対位置センサを用いるアプローチに分類される研究では、主としてロボット間の物理的な距離を均一化することに注目している。これは、無線通信の品質が通信機間の距離が離れるほど弱くなることが知られているため、通信品質を保つためには物理的な距離間隔を均一にすれば良いという考えに基づいている。

一方で、通信品質はマルチパスフェージングなどの影響により、物理的な距離との単純な比例関係にないことも知られている。そこで、通信品質を維持するために通信品質指標の一つである受信電波強度 (RSSI) を計測し、その値に基づき適応的に配置を決定する研究も存在する。

Saitou らの研究⁸⁾では、位置センサを用いてロボット間の相対位置ベクトルを取得し、RSSI との積により移動方向の決定を行なうことで、RSSI が均一になるように移動する手法を提案している。これにより、固定基地局-リーダーロボット間の通信を中継するという動作を実ロボットで実現した。

Zhong らの研究⁹⁾では、周囲のロボットの RSSI および位置情報を Fuzzy Neural Network の入力とすることで周囲ロ

Fig. 1 Node selection from prefixed nodes for area coverage

Fig. 2 Area coverage using mobile nodes

ボットの配置状態を 5 状態から識別し、必要に応じて移動させる手法を提案している。

以上のような A) 絶対位置センサを用いるアプローチおよび B) 相対位置センサを用いるアプローチでは、比較的正確な測位が可能な一方で、測距センサや GPS などの追加のセンサが必要なため 1 台あたりのコストが高くなるという欠点がある。このコストはノードを多数使用する WMN ではシステム全体のコストを増大させる要因となりえる。加えて GPS を用いる場合、屋内で使用できないという大きな制約もある。

C) センサを用いないアプローチでは、RSSI によって配置を決定する研究が行なわれている。位置センサを用いないため、適用範囲の拡大やコストの削減が期待できる。加えて、このアプローチでは、RSSI という通信品質指標を基に配置を決定するため、Saitou らの研究や Zhong らの研究のように、通信品質の確保も可能である。Correll らの研究¹⁰⁾や、それを改良した芝田らの研究¹¹⁾では、位置センサを用いずにロボットを配置可能な RSSI に基づく手法を提案している。これらの手法は位置情報を用いないため、移動方向がランダムという非常に効率性の低い動作に頼らざるを得ないという欠点がある。なお、RSSI を用いて位置推定を行なう研究¹²⁾も存在するが、RSSI という外乱の影響を受けやすい値を使用していることから推定精度が悪く、そのままでは正確な移動制御には適さないと考えられる。

以上で述べた移動ロボットを用いる従来研究と提案手法の特徴を **Table 1** にまとめる。Zhong らの手法や Saitou らの手法は位置情報を使うことで比較的高速な展開と通信品質の維持を実現できる一方、Shibata らの手法は展開速度は遅いが位置情報不要の手法を実現できている。仮に位置センサを用いずに高速な展開が可能というこれらの手法の長所を合わせた手法が実現できれば、適用範囲の拡大やコストの削減が可能になると考えられる。

そこで本研究では芝田らの研究を参考に、RSSI に基づく移動ロボットの展開アルゴリズムを提案する。RSSI を用いる芝田らの手法をはじめとした従来研究の大きな課題として、移動方向制御に関して RSSI を使用しておらず、ランダムであることが挙げられる。そのため非効率的な移動に起因する所要時間の増大やバッテリーの浪費という問題があった。これはロボットの移動が気体の分子が振動することによって拡散するエントロピー的な弱い疑似力に従って制御されているため、長時間の無駄な移動が必要となってしまうからである。これに対し本研究では、移動方向の修正・制御を移動前後の RSSI の差から決定することで、より効率的な移動方向の修正が可能な手法を提案する。

WMN 構築に着目したロボット配置手法を現実の被災地に適用する場合、瓦礫などの未知の障害が大きな問題となる。災害時に着目して障害物を乗り越えられる走破性の高いロボットの研究¹³⁾も存在するが、このようなロボットは複雑な機構が必要となりコスト増加やメンテナンス性の劣化を招くため、WMN 構築のような多量のロボットが必要とされる場合には

Table 1 Methods comparison

	Leader	Position estimation	Equalization	Real-robot experiments	Verified robots number on simulations (Experiments)
Proposed			RSSI	Yes	50 (12)
Shibata ¹¹⁾ Correll ¹⁰⁾			RSSI	Yes	30 (9)
Zhong ⁹⁾		required	RSSI and position		50
Saitou ⁸⁾	required	required	RSSI and position	Yes	3 (2) *Exclude base and leader
Cortes ⁷⁾		required	position		32
Payton ⁶⁾	available	required	position	Yes	N/A (20)

適さない。そこで本研究では簡易な機構の移動ロボットを用い、瓦礫などに乗り上げるなどにより確率的に行動不能になる移動ロボットが発生する環境を行動不能率として抽象化し、その抽象化された環境においても提案手法が十分な領域被覆を実現できるかに焦点を当てる。

3. 行動不能率

災害時における臨時の WMN 構築をシミュレーションを用いて表現する場合、瓦礫などで荒れた路面状況における移動を抽象化する必要がある。そこで本研究では、ロボットが移動により瓦礫などに乗り上げてスタックした場合や駆動系が故障して移動不能となる事象を抽象化した行動不能率を新たに定義する。ここで瓦礫などの障害物を考える場合、ロボットが障害物に乗り上げるのは移動を試みた場合であるから、行動不能率は時間ではなく移動距離の関数として表現することが妥当である。そこで、系のうち最も弱い部分が破損した場合に系全体が故障となるモデルである最弱リンクモデルを表現できるワイブル分布を元に行動不能率を定義する。

$$F_m(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right) \quad (1)$$

$$f_m(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right) \quad (2)$$

ワイブル分布の累積故障率 $F_m(t)$ は (1) 式に、故障率の確率密度関数は (2) 式に表わせる。ここで、 m はワイブル分布の形状を決定する形状パラメータ、 η は勾配を決定する尺度パラメータである。累積故障率は信頼度とも呼ばれ、時刻 t において故障している確率を表わす。ワイブル分布を用いることで、ある物体が時刻 t において故障する確率 $F_m(t)$ を導出することが可能である。

$$\lambda_m(t) = \frac{f(t)}{R_m(t)} = \frac{f(t)}{1 - F_m(t)} = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \quad (3)$$

(1) 式に表わされる信頼度をもつ物体の故障率 $\lambda_m(t)$ は (3) 式により導出される。ここで、 $R_m(t)$ は物体が故障していない確率である信頼度を表わし、 $R_m(t) + F_m(t) = 1$ である。ここで、故障率 $\lambda_m(t)$ は時刻 t における故障率を表わす。

本論文では、ワイブル分布をロボットの行動不能率に適用することを考える。すなわち、ロボットが移動することによって行動不能となる現象をワイブル分布における故障として表現する。このとき、移動による行動不能率は移動距離を引数に取るワイブル分布で表わされる。また、行動不能の原因となる瓦礫などの障害物が一様分布していると仮定した場合、故障率 $\lambda_m(t)$ は t によらず一定の確率となる。以上より、ロボットの行動不能率はワイブル分布において、 t を移動距離とし、形状パラメータ m は移動距離に対する行動不能率が一定となる $m = 1$ とすることで表わすことができる。

$$R_1(t) = 1 - F_1(t) = \exp\left(-\frac{t}{\eta}\right) \quad (4)$$

$$\lambda_1(t) = \frac{1}{\eta} \quad (5)$$

この場合の移動距離に対する信頼度は (4) 式、行動不能率は (5) 式のように表わされる。このとき、(5) 式から距離 t に対して一定の行動不能率になることが確認できる。

この信頼度をグラフにすると **Fig. 3** のように表わせる。このグラフは、縦軸が信頼度、横軸が移動距離を表わし、各線は尺度パラメータ η を 50~600 まで変更してプロットしたものを表わす。このグラフを見ると、ロボットは初期に多数が行動不能に陥り、移動距離が増えるにつれて行動不能台数が増えづらくなることが読み取れる。このように、信頼度を計算することが容易にできることもワイブル分布を選択する理由である。

本研究におけるロボットの行動不能とは、通信や制御機構は正常に機能し移動のみ不能となるものとする。これは、ロボットが瓦礫などに乗り上げたとしても移動不能になるだけであり、仮にモータ駆動回路などが破損したとしてもマイコンや無線通信機を含む制御回路の動作不良は回路の電氣的分離などにより回避可能だと考えられるからである。なお、後述のシミュレーションにおいては尺度パラメータ η を 0 としているケースが存在するがこれはワイブル分布に従わずに、行動不能が一切発生しない環境を表わしている。

Fig. 3 Reliability vs. Distance Traveled (each lines represent scale parameter η)

4. 提案手法

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・展開制御を行なう。その結果として目標領域を被覆するような WMN 構築のための自律展開アルゴリズムである。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・待機ロボットの三つの役割の自律・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。

RSSI による目標領域被覆を目的とした Correll らの研究¹⁰⁾や芝田らの研究¹¹⁾では、ロボットの移動方向がランダムに決定されている。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できる。これにより、近づいている場合は方向転換し、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。ここで提案手法における通信とは、直接通信可能なロボット間でのみ行なわれる一般的な通信とする。提案手法においてロボットは **Fig. 4** 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三つの状態を遷移することで展開を行なう。(1) 移動ロボット状態はほか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、ほか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。詳細をつぎの節で述べる。

4.1 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 **Fig. 5** に示すような手順で決定される。前述のとおり、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。すべてのロボットの初期状態は待機状態であり、図の **Fig. 5(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。そして後述の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、**Fig. 5(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、**Fig. 5(c)** のよ

Fig. 4 State transitions of proposed method

Fig. 5 Illustration of role allocation algorithm

うに RSSI 測定を行なうことで RSSI の強い上位 $N_{landmark}$ 位のロボットに対し, Fig. 5(d) のように停止命令を送信することで基準ロボットに指定する. これは, すべてのロボットに停止命令を送信すると同時に移動できるロボット数が極端に減ってしまうため, 近い位置に存在するロボットだと予想される上位 $N_{landmark}$ 台に限定するためである. なお, 停止命令を受信したすべてのロボットは強制的に自身の現状をキャンセルして基準ロボットに遷移する.

$$T_n = U_{rand} * (c - N_n * b) - r_{max} * a \quad (6)$$

待機ロボットが移動ロボットになるまでの待機時間は (6) 式によって決定される. 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.

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} の二つから求められる. これを図で表わすと以下の Fig. 6 のようになる. この Fig. 6 において, きわめて近い Repel 領域にはほか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

Fig. 6 Geometry image of RSSI thresholds

Algorithm 1 移動ロボットのアルゴリズム

```

1: procedure ROBOT_MOVE
2:   last_rssi ← send_stop_message_to_landmark()
3:   for i ← 1, N_turn do
4:     move_forward( $T_{move}/N_{turn}$ )           ▷ Move for
                                          $T_{move}/N_{turn}$  steps
5:     new_rssi ← send_stop_message_to_landmark()
6:     if new_rssi <  $R_{min}$  then return      ▷ This robot
                                         become waiting robot
7:   end if
8:   if new_rssi > last_rssi then
9:     turn( $A_{turn} * \text{uniform}()$ )
10:    rssi ← new_rssi
11:  end if
12: end for
13: end procedure

```

Fig. 7 Update of moving direction

動する. このとき, 移動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.

4.2 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, Algorithm1 に示すような疑似コードに従い, 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なう. ここで Fig. 7 を元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・比較を行ない,

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 A_{turn} (後出の Table 3 で記述) 度だけ方向転換を行なう。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。以上の手順において、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、複数回の試行を行なうことにより移動ロボットが基準ロボットから離れる方向への確率的な移動が実現できる。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。このことから、本研究において赤外線センサや GPS などによる位置推定は一切用いていない。

4.3 RSSI の変動

本手法において用いている RSSI には、マルチパスフェージングなどが原因で局所的に弱くなるヌルスポットと呼ばれる現象が発生することが予想される。ロボットがヌルスポットで停止した場合、RSSI は閾値より弱くなるためその結果停止条件を満たしてしまい本来の移動ができない、もしくは通信不能になる可能性がある。しかしながら、展開動作中においては周囲のロボットが頻繁に移動するため、ヌルスポットも常に移動すると考えられる。このため、完全に移動できなくなるケースが発生する可能性は非常に低いと考えられる。つぎに 4.2 節で示した移動方向の修正においては、移動前後の RSSI を比較しているため、RSSI の変動により誤判定してしまう可能性が考えられる。しかしながら移動方向の修正は繰り返し行なわれるため、誤判定の影響は小さいと考えられる。実際、上にあげたような動作は実験やシミュレーションの双方でも一部観測されたが、展開全体に影響するような大きな問題になることは観測されなかった。

5. シミュレーション

提案手法の有効性を検証するため、3 章で定義した行動不能率を適用した準実環境においてシミュレーションモデルを構築した。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 Scenargie¹⁴⁾を用いた。シミュレーション環境として、つぎの Table 2 に示す 3 種類の被覆目標領域および使用するロボット台数について、それぞれ 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 試行を行なった。

5.1 Scenargie シミュレータ

本研究では、代表的なネットワークシミュレータの一つである Scenargie を用い、提案手法および比較手法を実装し、シミュレーションおよび解析を行なった。Scenargie は通信における電波伝搬のモデル化だけでなく、通信プロトコルレベルで忠実にシミュレーションを行なえる。そのため、無線通信において起こりうる距離減衰、マルチパス、回折に加え、プロトコルレベルでのデータの破損なども忠実に実装されている。これにより、電波伝搬環境や PHY/MAC 層、TCP/IP

Table 2 Simulation environments and settings

Parameter name	Values
Pairs of target area size and number of robots (area size [m], number of robots)	(150 * 150,5), (300 * 300,15), (400 * 400,25)
Scale parameter (η)	600, 400, 200, 100, 50, 0(=None)
Velocity of robots [m/s]	0.2
Link-Layer protocol	IEEE 802.11g (AD-HOC)
Network/Transport layer protocol	TCP/IP
Radio-wave propagation model	Two-Ray Ground
Frequency [GHz]	2.4
Bandwidth [MHz]	20
Tx Power [dBm]	20
Preamble detection power threshold [dBm]	-82
Energy detection power threshold [dBm]	-62

や UDP などの通信プロトコルに関し現実に近い環境において動作検証を行なうことが可能となり、シミュレーションの信頼性を飛躍的に高めることができる。

5.2 シミュレーション条件

すべてのシミュレーションケースにおいて各ロボットの初期位置は目標被覆エリアの中央付近とし、初期方向はランダムに設定する。ここで初期位置は、目標エリアの中心に位置する一辺が 30 m の正方形で表現される領域内で、x 座標と y 座標は一様乱数によって設定される。同様に初期方向も 0 度から 360 度までの一様乱数によって設定される。

各シミュレーションケースにおいて使用するロボット台数は、あらかじめ 5 台刻みでロボット台数を変更させて予備実験を行ない、いずれの手法においても領域被覆が可能な最小台数を用いた。目標エリアは、既存研究でも一般的な正方形の物理的な壁によって囲われているものとし、ロボットは壁への衝突を検知できるものとする。ロボットが壁に衝突した場合、壁が進行方向よりも左側にあれば右回転、右側にあれば左回転するというアルゴリズムで回避する動作を提案手法と比較手法群のすべてに実装した。

比較手法としては、提案手法と同様に RSSI を使用するアプローチである芝田らの手法¹¹⁾と、位置情報を用いる手法の中で実験を用いて動作検証されている Saitou らの手法⁸⁾を用いる。提案手法、芝田手法および Saitou 手法のシミュレーションで使用するパラメータをそれぞれ Table 3～Table 5 に示す。

ここで簡単に比較手法の特徴をまとめる。芝田手法は、停止条件を満たすまでランダムな方向に一定の時間移動を繰り返す手法である。停止条件は、Fig. 8 に示すようにグレーの領域内に存在 ($P_{ry} < RSSI < P_{rx}$ を満たす) するロボット台数 N が $\alpha < N < \beta$ を満たすことである。これにより、近隣ロボット間距離を適切な状態に保つことが可能である。

Saitou らの手法は、オドメトリに基づく位置情報による

Table 3 Simulation parameters for proposed algorithm

Parameter name	Values
Repel RSSI (R_{min}) [dBm]	-85
Repel acquire RSSI (R_{acq}) [dBm]	-80
Turn angle (A_{turn}) [degrees]	30
Landmark number ($N_{landmark}$)	1
Turn per move (N_{turn})	3
Move time (T_{move}) [sec]	120
Wait time after moving ($T_{waitaftermove}$) [sec]	30
Rssi update interval (T_{update}) [sec]	100
Sleep sort coefficient (a)	1
Sleep sort coefficient (b)	0
Max random wait time (c) [sec]	10

Table 4 Simulation parameters for Shibata's algorithm

Parameter name	Values
Min RSSI (P_{ry}) [dBm]	-85
Max RSSI (P_{rx}) [dBm]	-80
Min robot (α)	2
Max robot (β)	5
Interval [sec]	40

Table 5 Simulation parameters for Saitou's algorithm

Parameter name	Values
Virtual force gain of RSSI	1
Virtual force gain of obstacle	0
Interval [sec]	40

Fig. 8 Stop condition of Shibata method

周囲のロボットとの距離と RSSI の積を均等化することにより、距離間隔および通信品質を均等化することが可能な手法である。

$$\Delta R_{ij} = \bar{R}_i - R_{ij} \quad (7)$$

$$\vec{F}_{R_{ij}} = \begin{cases} \text{sgn}(\Delta R_{ij}) R_{ij} \vec{d}_{ij} & (\Delta R_{ij} \neq 0) \\ R_{ij} \vec{d}_{ij} & (\Delta R_{ij} = 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$\vec{F}_{C_1} = \sum_j^{N_R(i)} \vec{F}_{R_{ij}} \quad (9)$$

Saitou らの手法は (7)(8)(9) 式により **Fig. 9** に示されるようなベクトルを導出することで、展開動作を実現する。なお、この式における ($\bar{R}_i$) はロボット i の隣接ロボット RSSI の平均値、 R_{ij} はロボット i, j 間の RSSI、 $\text{sgn}(x) = x/|x|$ 、 $\vec{d}_{ij}$ はロボット i から j へのベクトル、 $N_R(i)$ はロボット i の隣接ロボットをそれぞれ表わす。なお Saitou らの手法に関しては、目標領域に展開するためのリーダーロボットを加えて

Fig. 9 Abstract of Saitou method

おり、これは中継機能がなくカバレッジ計算時には考慮されないロボットとして設定した。リーダーロボットをすべてのケースにおいて 4 台追加、使用しており、それぞれ初期位置から東西南北の 4 方向に障害物に接触するまで直進を続けるものとする。

シミュレーションは、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、領域の何割が被覆できたかを表わす (1) 最終カバレッジ、(2) シミュレーションが終了するまでの所要時間、(3) 全ロボットの移動距離の総和および (4) シミュレーションが終了までに行動不能になったロボット台数を用いる。

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わす指標である。各ロボットの被覆範囲は半径 100 m 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 100 m 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わす。シミュレーション試行は一つのケースにつき 5 試行行なっているため、結果は各評価指標を試行ごとに計算し、その平均と分散を算出してグラフで表わしている。

6. シミュレーション結果

シミュレーションの結果を以下の **Fig. 10**～**Fig. 16** に示す。

Fig. 10～**Fig. 12** は各手法 (提案, 芝田, Saitou) の初期位置と最終位置の一例を領域サイズごとにまとめた展開・被覆例である。図における点は各ロボットを表わし、円は各ロボットのカバー範囲である半径 100 m の円を表わしている。Fig. 10 の目標領域が 150×150 m のケースに着目すると、被覆すべき目標領域に対して、各ロボットのカバー範囲がかなり大きいことがわかる。このことから、各ロボットは初期位置からわずかに移動するだけで被覆が完了する。対照的に、Fig. 11 と Fig. 12 では被覆すべき目標領域が各ロボットのカバー範囲に対して十分広いことから、正確な移動・拡散が重要であると考えられる。また展開後の配置に着目すると、ロボット間 RSSI が一定になるよう制御を行なう提案手法および芝

Fig. 10 Examples of deployment results (150 * 150)m

Fig. 11 Examples of deployment results (300 * 300)m

Fig. 12 Examples of deployment results (400 * 400)m

Fig. 13 Results of final coverage

田手法と、リーダーロボットの引力に基づく Saitou 手法で、展開傾向が異なることが読み取れる。提案手法および芝田手法はロボット間隔が比較的均等で、提案手法は芝田手法に近い領域被覆が実現できている。一方で Saitou 手法はロボット間距離が短くなっている部分が存在することがわかる。これは、Saitou 手法におけるロボット間仮想引力に対し、周囲の物体に対して働く仮想斥力が相対的に弱いことが原因の一つと考えられる。

Fig. 13 は最終カバレッジと行動不能率の関係を表わすグラフであり、縦軸は最終カバレッジ、横軸は行動不能率 (scale parameter) をそれぞれ表わす。これを見ると、各手法とも行動不能率が高くなる (尺度パラメータ η が小さくなる) 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わかる。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。つぎに手法別に見ると、芝田手法は行動不能率を適用したすべてのケースで最終カバレッジ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わかる。これは芝田手法のほうが 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から、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 (たとえばロボットのスタックや駆動

Fig. 14 Results of deploy time per final coverage

Fig. 16 Results of fault count

Fig. 15 Results of distance traveled

系故障の頻度が高い) 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いえる。

つぎの Fig. 14 は被覆所要時間の平均と行動不能率の関係を表わすものであり、縦軸は単位カバレッジあたりの所要時間、横軸は行動不能率をそれぞれ表わす。ここで、単位カバレッジあたりの所要時間は被覆所要時間を最終カバレッジで割ることで、カバレッジあたりの所要時間表わしている。被覆所要時間を手法別に見ると、領域サイズが 150×150 m の場合を除いたすべてのケースで提案手法の所要時間が最も短いという結果が得られた。これは提案手法の大きな目的の一つである効率的な移動制御が有効に機能し、効率的な移動・拡散を実現したからだと考えられる。一方で 150×150 m の場合を見ると、提案手法が芝田および Saitou 手法と比較し若干

被覆所用時間が延びていることが読み取れる。この原因として、 150×150 m のような狭い被覆領域を半径 100 m の通信領域をもつロボットを用いて被覆する場合、各ロボットが初期位置からランダムな方向にわずかに動く程度で被覆可能であることが考えられる。このような場合では待機時間が長く、同時に動けるロボット数が制約される提案手法よりも、同時並列的に動ける Saitou 手法や芝田手法のほうが効率的であると考えられる。

つぎの Fig. 15 は総移動距離と行動不能率の関係を表わすグラフであり、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わす。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。これは、3 章で述べたロボットが行動不能になる確率と移動距離の関係を表わす Fig. 3 から読み取れるように、行動不能台数が高いことが原因でより短い距離で多くのロボットが被覆を完了する前に故障・停止してしまい、結果として総移動距離が短くなったことが原因と考えられる。これはつぎに述べる Fig. 16 から読み取れる。ここで、Fig. 15 を手法別に見ると、 150×150 m の場合を除き提案手法の総移動量が短いことが読み取れる。このことから、芝田手法での大きな課題であったランダム方向への非効率な移動が、提案手法において改善されていることが考えられる。

最後の Fig. 16 は行動不能になったロボット台数と行動不能率の関係を表わし、縦軸は行動不能になったロボット台数、横軸は行動不能率をそれぞれ表わす。両手法ともに 150×150 m の場合を除いて行動不能率が上がるにつれて行動不能台数が増加していることが読み取れる。これは、行動不能率の定義上妥当であると考えられる。手法別に見ると、芝田手法の行動不能台数が 150×150 m のケースおよび行動不能率なし

のケースを除き、ロボット使用台数と一致していることが読み取れる。これはすべてのロボットが行動不能となっていることを表わし、移動できるロボットがある段階から全く存在しなくなり領域被覆に失敗していることがわかる。一方で、提案手法や Saitou 手法は行動不能台数が比較的少ないことから、行動不能率が高いような環境下においても比較的安定して動作することが予想される。

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。このことから、提案手法は位置推定を使用する手法に匹敵する効率的な移動を、位置推定なしに実現できていることといえる。

7. 実機実験

提案手法が実環境においても想定した動作をするか確認するため、実機ロボットを用いた実験を行なった。Fig. 17 に実験に用いたロボットを示す。ロボットの通信機には ZigBee 準拠の通信機 XBee Pro Series2, ロボット本体には iRobot 社の Roomba, 制御用マイコンとして Arduino MEGA を使用した。

実験は Fig. 18 に示すような屋外においてロボットを 12 台使用し、制御用マイコンに提案手法と芝田手法動作を行なうプログラムを実装した上で 5 試行を実施した。なお、シミュレーションと同様に、衝突を検知した場合は方向転換を行なう機能も組み込んだ。使用した屋外環境がシミュレーションと異なり非常に目標領域が小さいため、提案手法の特徴である移動方向制御の効果が確認できるように、ロボットの停止条件である RSSI の閾値を非常に近い距離で停止するように設定した。

評価指標としては、実験開始から展開終了までにかかる所

要時間、消費電力および行動不能台数を用いた。ここで展開終了の判定条件として、すべてのロボットが 30 秒間以上停止するか、600 秒以上経過した場合とする。実験に用いたパラメータを以下の Table 6~Table 9 に示す。

実験の結果を Fig. 19, Fig. 20 に示す。これらのグラフの縦軸は実験開始から展開終了までにかかった所要時間、消費電力および行動不能になったロボット台数を示す。グラフを見ると、展開所要時間が提案手法のほうが短いことに加えて、移動距離や故障台数も小さいことがわかる。このことから、提案手法の方向制御アルゴリズムが有効に動作していることが考えられる。一方、シミュレーションの結果から見られるような劇的な高速化の傾向を見ることはできていない。これは、実験において 600 秒経過時に打ち切ったため、芝田手法が展

Table 6 Environments of experiments

Parameter name	Values
Pairs of target area size and number of robots (area size[m], number of robots)	(23.9 * 8.2 + 6.2 * 7.1, 12)
Velocity of robots [m/s]	0.2
Transceiver Module	XBee Pro S2B (Whip Antenna)
Protocol	ZigBee (ZigBee PRO Feature Set)
Frequency [GHz]	2.4
Tx Power [dBm]	10

Table 7 Implemented packet

Length [Byte]	Content	Values
	Packet header	'P'
2	Message kind	Stop, RSSI request, RSSI request (moving)
2	RSSI value [dBm]	RSSI value of RSSI request packet

Table 8 Experimental parameters for proposed algorithm

Parameter name	Values
Repel RSSI (R_{min}) [dBm]	-85
Repel acquire RSSI (R_{acq}) [dBm]	-80
Landmark number ($N_{landmark}$)	1
Turn per move (N_{turn})	3
Move time (T_{move}) [sec]	12
Wait time after moving ($T_{waitaftermove}$) [sec]	3
Rssi update interval (T_{update}) [sec]	10
Sleep sort coefficient (a)	0
Sleep sort coefficient (b)	0.5
Max random wait time (c) [sec]	5

Table 9 Experimental parameters for shibata algorithm

Parameter name	Values
Min RSSI [dBm]	-85
Max RSSI [dBm]	-80
Min robot (α)	2
Max robot (β)	5
Interval [sec]	4

Fig. 17 Pictures of the robot and the microcomputer

Fig. 18 Target area of experiments

Fig. 19 Results of deploy time

Fig. 20 Results of power consumption and faulty robots

開を完了できていないことが原因だと考えられる。実際、芝田手法は各試行を 600 秒で打ち切っており、所要時間が 600 秒となっていることが読み取れる。

なお、シミュレーションにおいては $150 \times 150 \text{ m}$ という狭い領域において比較手法のほうが高速という結果が出ているが、実験結果では提案手法のほうが高速という結果となっている。これは、実験において各種パラメータをシミュレーションと比較して非常に小さな目標領域に合わせて設定したことに加えて、停止条件が異なることが原因と考えられる。位置情報取得をリアルタイムに取得が可能なシミュレーションでは、常にカバレッジを計算しており、(1) カバレッジが 99% になった時点、(2) 一定時間 (実験: 30 秒, シミュレーション: 3000 秒) 全ロボットが停止する、(3) 実験, シミュレーション開始から一定時間以上経過したときのどれか一つの条件に適合した場合に展開が終了し、その時点までの時間や移動量、カバレッジなどで評価を行なっている。一方、実験時にはリアルタイムのカバレッジ計算が困難であることから、(1) の終了条件を適用していない。確認のため予備実験として実験環境を再現したシミュレーションも実施しており、実験結果と類似した結果が得られることを確認している。

8. ま と め

本研究では災害時の臨時通信網構築に着目し、目標領域を被覆し無線メッシュネットワークを構築するための RSSI ベースロボット群自律展開手法を提案した。災害時などの荒れた環境を抽象化した行動不能率を定義し、さまざまなケースでシミュレーションおよび実験を用いて比較手法と提案手法の比較を行なった。その結果、提案手法は比較手法と比べ被覆所要時間、総移動距離といった点で優位性を示すことができた。このことから、提案手法は災害時などのロボットが移動

できなくなる可能性のある路面状況や周囲環境においても、ロボット群によるメッシュネットワークを効率的に構築可能であることが明らかになった。

今後の課題として、目標領域被覆に必要なロボット台数の推計およびパラメータ設定方法の設計、壁がない目標領域を指定する手法の設計、ビルなどの障害物のある環境における動作検証、広域空間における実ロボットを用いた検証が挙げられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 25870232 の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) M. Inoue, M. Ohnishi, H. Morino, T. Sanefuji and Y. Owada: Fast Recovery from Link Failures and Black-out of Managed Wireless Mesh for NerveNet, IEEE GLOBECOMM (2010)
- 2) Google: 東日本大震災と情報, http://www.google.org/crisisresponse/kiroku311/chapter_05.html (2012)
- 3) NHK「かぶん」ブログ: 震災と携帯電話・調査結果をまとめました, <http://www9.nhk.or.jp/kabun-blog/600/83973.html> (2011)
- 4) Y. Taniguchi, T. Kitani and K. Leibnitz: A uniform air-drop deployment method for large-scale wireless sensor networks, International Journal of Sensor Networks, **9**-3-4, 182/191 (2011)
- 5) H. Gupta, Z. Zhou, R.S. Das and Q. Gu: Connected sensor cover: Self-organization of sensor networks for efficient query execution, IEEE/ACM Trans. Netw., **14**-1, 55/67 (2006)
- 6) D. Payton, M. Daily, R. Estowski, M. Howard and C. Lee: Pheromone robotics, Auton. Robot., **11**-3, 319/324 (2001)
- 7) J. Cortes, M. Sonia, K. Timur, B. Francesco and M. Senior: Coverage Control for Mobile Sensing Networks, IEEE Transactions on Robotics and Automation, **20**-2, 243/255 (2004)
- 8) T. Saitou, M. Nukada and Y. Uchimura: Deployment control of mobile robots for wireless network relay based on received signal strength, 2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), 237/242 (2013)
- 9) X. Zhong and Y. Zhou: Maintaining Wireless Communication Coverage among Multiple Mobile Robots using Fuzzy Neural Network, 2012 IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA), 35/41 (2012)
- 10) N. Correll, J. Bachrach, D. Vickery and D. Rus: Ad-hoc wireless network coverage with networked robots that cannot localize, 2009 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 3878/3885 (2009)
- 11) 芝田, 森, 四方: モバイルメッシュネットワークのためのロボット間距離を考慮した移動制御アルゴリズム, 電子情報通信学会ソサエティ大会, 66 (2011)
- 12) S. Meguerdichian, S. Slijepcevic, V. Karayan and M. Potkonjak: Localized algorithms in wireless ad-hoc networks: location discovery and sensor exposure, Proceedings of the Second ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, **3**, 1380/1387 (2001)
- 13) K. Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi and Y. Hada: Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plants using mobile rescue robots,

Journal of Field Robotics, 30-1, 44/63 (2013)

14) Network simulator SCENARGIE,

<https://www.spacetime-eng.com/en/company.html>

[著 者 紹 介]

建 部 尚 紀

2014 年電気通信大学情報理工学部総合情報学科卒業。同年電気通信大学総合情報学専攻修士前期課程に入学。現在に至る。マルチエージェントシステム、自動制御の研究に従事。学士(工学)。

服 部 聖 彦 (正会員)

2006 年東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。同年、情報通信研究機構専攻研究員。2008 年電気通信大学助手。2010 年同大学助教。2012～2013 年ベルギーブリュッセル自由大学招待研究員。2014 年情報通信研究機構研究員。2015 年主任研究員。自律分散システム、複数ロボット協調システム、無線通信システム、屋内測位、DTN の研究に従事。電子情報通信学会、人工知能学会、測位航法学会会員。

加 川 敏 規

2013 年電気通信大学大学院情報理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。同年、独立行政法人情報通信研究機構(現・国立研究開発法人情報通信研究機構)入所。現在に至る。IR-UWB を用いた高精度屋内測位、シート媒体通信を利用した生体情報センシング、無人航空機による無線中継伝送、低遅延ロボット制御通信などの研究開発に従事。IEEE、電子情報通信学会など各会員。

大和田 泰 伯

2007 年新潟大学大学院自然科学研究科修了。博士(工学)。同年、新潟大学災害復興科学センター特任助教。2008 年(株)スペースタイムエンジニアリング代表取締役社長。2010 年情報通信研究機構新世代ネットワーク研究センター研究員。2013 年情報通信研究機構耐災害 ICT 研究センター主任研究員。現在に至る。地域における分散型無線アクセスネットワークに関する研究開発に従事。電子情報通信学会、情報処理学会および IEEE 会員。

浜 口 清

1989 年東京理科大学理工学部電気工学科卒業。91 年同大学院修士課程修了。98 年大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士課程修了(博士(工学))。93 年より国立研究開発法人情報通信研究機構(旧郵政省通信総合研究所)勤務。2002～2003 年、日本学術振興会長期在外若手研究員(英国サザンプトン大学)。現在、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室長。移動無線通信の変復調方式、近距離通信システム、電波伝搬のモデル化などにかかわる研究開発に従事。

高 玉 圭 樹 (正会員)

1970 年生。98 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。同年、国際電気通信基礎技術研究所(ATR)入所。2002 年東京工業大学大学院総合理工学研究科講師を経て、2006 年電気通信大学電気通信学部助教授、2007 年准教授、2011 年教授。現在に至る。マルチエージェントシステム、分散人工知能、強化学習、創発的計算手法の研究に従事。著書に「マルチエージェント学習ー相互作用の謎に迫るー」など。IEEE、人工知能学会、情報処理学会、日本ロボット学会、電子情報通信学会などの学会会員。