

通信および移動経路のグラフ構造に基づく 移動型センサノードの配置手法の検討

○川畑 皓司（東京電機大） 鈴木 剛（東京電機大）

Study of mobile sensor node deployment strategy using graph structure based on estimation of communication connectivity and movement path

○Koji KAWABATA(Tokyo Denki University), and Tsuyoshi SUZUKI(Tokyo Denki University)

Abstract: We have been studying an information gathering system, Robot Wireless Sensor Networks (RWSNs), using information gathering robot and mobile sensor nodes (MSNs) in an underground space such as underground shopping mall where communication is unstable at post-disaster. In this paper, we propose a mobile sensor node deployment strategy for construction of RWSN. MSNs move toward target locations given by a graph structure which is represented based on estimation of wireless communication connectivity and environmental shape features, and determine the deployment locations by evaluating their wireless communication connectivity and operation time. We evaluate the effectiveness of the proposed method in several graph structures by conducting a computer simulation using network simulator.

1. 緒言

近年，大規模な災害等による想定外の被害が頻発していることから，減災活動の重要性が増している^[1]。減災活動では，被災状況の迅速な情報収集が求められるため，これまで，被災状況の情報収集には，ヘリコプタや UAV 等による上空からの広範囲な観測，無線通信設備やインターネット等の既存インフラの利用，レスキュー活動従事者による直接的な情報収集活動などが行われている。さらに，最近では災害対応にロボット技術を応用し，レスキューロボット等による情報収集や被災者救助支援のシステムなど，様々な研究が行われている^{[2][3]}。ロボット技術を利用することで，広範囲による被災情報の収集やレスキュー活動従事者の活動負担の軽減の他，閉所や狭所，水中等人が容易に立ち入れない環境での活動支援が可能である。

これらシステムにおいては，被災地環境への影響や作業の安全性の観点から，ロボットは遠隔操作されることが多く，したがって遠隔操作を行う際の通信の接続性および安定性は非常に重要である。特に，地下街や地下鉄駅構内等の環境（以下，地下空間）では，内部状況が把握しづらく，前述した上空からの観測など，これまでの情報収集手法の利用が困難である。さらに地下空間は，屋外に比べて通信が不安定であることが多く，かつ，四方が壁などに囲まれた空間的特徴から，電波反射等の外乱による影響が屋外に比べて発生しやすい。

そこで我々は，このような通信が不安定な環境における情報収集支援を目的として，遠隔操作ロボットと Wireless Sensor Networks (WSN)^[4]を利用した被災地情報

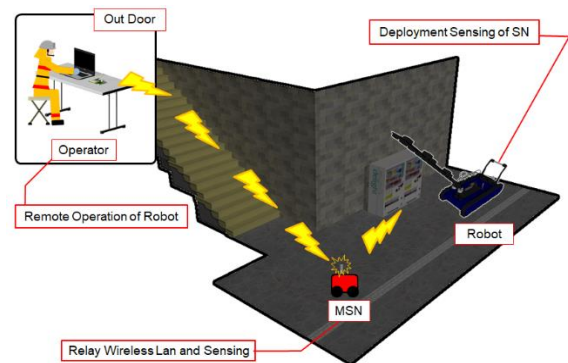


Fig.1 Robot Wireless Sensor Networks

収集支援システム Robot Wireless Sensor Networks (RWSN)を提案および検討している(図 1)。

2. Robot Wireless Sensor Networks

RWSN は，遠隔操作の情報収集ロボット（以下，ロボット）と複数台の移動型無線中継センサ端末(Mobile Sensor Node: MSN)により WSN を構築し，WSN を介してロボットの遠隔操作を行う。また，ロボットおよび MSN により収集した環境内の情報は，WSN を介して操作者端末に送信することで，減災活動に必要な情報を得る。RWSN ではロボットの遠隔操作によって任意の環境に一時的な情報通信インフラを構築できることから，災害発生時の情報収集手段として有効であると考えられる。

3. 提案システム

地下空間は構造が堅牢なため耐震性に優れており，被災時にも壁や天井の崩落が少ないとされている^[5]。そ

のため、著しく構造が変化する可能性は小さいが、被災状況により障害物等が生じ、事前の地図情報をそのまま利用することは難しい。また、前述のように無線通信も不安定な環境である。このような環境で、ロボット遠隔操作の通信安定性を維持するためには、WSNを構成するMSNを適切に配置し、安定した無線中継を行う必要がある。またMSNは供給電源がバッテリーであることから稼働のエネルギーが有限である。そのため、動作停止などに起因するネットワーク分断が発生しないよう考慮する必要がある。そこで、本研究は、地下空間を想定したMSNの配置動作を提案する。

状況が未知の被災地環境において、ロボットを遠隔操作しながら複数台のMSNを個々に制御することは困難であるため、MSNは自律移動しつつ環境に対して適応的に通信接続性を維持する位置に調整配置されることが望ましい。しかし、前述したとおり、被災地環境でのロボットの完全自律動作は誤動作などの不安がある。そこで本研究では、操作者が、ロボットに移動目標を与え直接的な遠隔操作を行い、その移動経路情報をWSNで共有しMSNの移動経路としてロボットに追従させることでMSNを間接的に操作する。また、各MSNは経路上を移動しながら通信および自身の稼働状態を評価し、その評価に基づき経路上に配置される。

3.1 環境表現

複数台のMSNを環境の状況に応じて配置するには環境の把握が必要である。ロボットによる環境把握にはSLAM技術が多く利用されており、本研究でもロボットはSLAMにより環境を把握しながら情報収集を行う。一方、MSNには、詳細な環境形状よりも通路の変曲点のような、移動経路上の特徴的な地点を与えたほうが、ロボットに追従させ易い。そこで、MSNに与える環境情報の表現として、トポロジカルマップを用いることとした。トポロジカルマップとは、環境中の特徴的で見分けのつきやすい地点とそのつながりを図2のようにグラフとして表現した地図である。トポロジカルマップを用いることで、ノードとエッジ情報を保持するだけで良いため、メモリを節約しながら環境適応的な移動が可能となる。グラフのノードは、通信状態が変動しやすい、かつ移動するのが比較的難しい地点、例えば通路の曲がり角や十字路、階段部などが考えられる。エッジはロボットとMSNの移動経路に設定する。

3.2 トポロジカルマップの構築

ロボットは、搭載している測距センサ等によって環境情報を収集し、特徴的な地点の座標をグラフノードとして設定してノードとエッジを接続していくことでトポロジカルマップを構築する。また、そのデータをMSNと基地局に送信し、システム全体でマップを共有

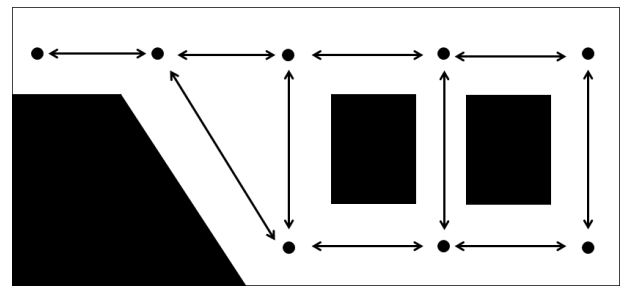
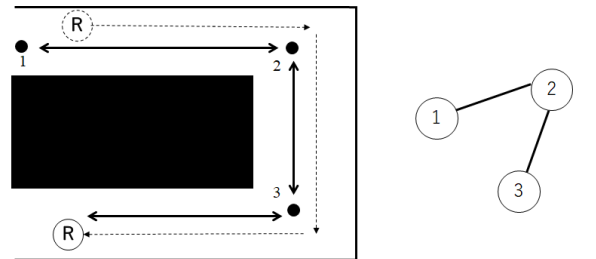


Fig.2 Graph structure based on environment



(a) Setting of graph node and edge (b) Graph network

Fig.3 Node and edge construction by rescue robot

する。図3は、ロボットがグラフ構造を構築する図である。これにより、環境情報を収集しながらWSNの展開に利用可能なMSNの移動経路情報を得られる。また、エッジのコストを通信状態とすることで、通信が安定している経路をMSNが移動できる。

3.3 経路計画

操作者—ロボット間の遠隔操作を円滑に行うには、MSNをトポロジカルマップに基づく移動経路上の、通信接続性を維持する位置に配置する必要がある。マップ上での経路計画が必要となるため、最短経路を求める。始点はMSN自身の座標で、終点を隣接MSNの座標とする。MSNは、自己位置推定に基づき、共有するトポロジカルマップ内のノードとの直線距離で最短となるノードと2番目に最短となるノードの2つに始点と終点のエッジを接続する。そして始点と終点までの最短経路を経由するノードを選出し、その座標をデータメモリに格納する。移動時はそのデータメモリから座標を順次参照して移動する。

3.4 MSNの配置動作アルゴリズム

MSNの配置動作の流れを図4に示す。各MSNは、隣接MSNとの通信接続性を評価するために、通信品質を定期的に計測する。通信品質の低下を検知すると、各MSNがさらにエネルギー残量を評価し、その評価値によってエネルギー残量の多い、つまり、稼働時間に余裕のあるMSNが優先的に移動を開始する。MSNの移動により通信品質が閾値以上になったら移動を終了する。

3.4.1 通信品質とエネルギー残量の評価

通信品質の指標は、受信電界強度(RSSI: Received Signal Strength Indicator)を用いた。RSSIが事前に設定し

である閾値より下回った時に通信品質が低下した経路にいる MSN がそれぞれエネルギー残量の評価をする．エネルギー残量の評価は式(1)で評価する．

$$\varphi = \frac{|E(i) - E(j)|}{\max(E(i), E(j))} \quad (1)$$

$E(i)$ は自身のエネルギー残量， $E(j)$ は隣接 MSN のエネルギー残量である．評価値が大きいほど両端末におけるエネルギー残量の差が大きいと言える．そして，次の条件に従って移動する MSN を決定する．

- ・ $\varphi \leq \varphi_{th}$ の時，自身が移動
- ・ $\varphi > \varphi_{th}$ の時， $\max(E(i), E(j))$ の MSN が移動

ただし， φ_{th} はエネルギー残量の評価値の閾値である．評価値による条件によって移動する MSN が決定した後，移動を開始する．

3.4.2 トポロジカルマップに基づく移動制御

図 5 は，RSSI の低下によって MSN が配置動作行う様子を表している．RSSI を向上させるために，移動する MSN は最短経路となるノードの座標をデータメモリから参照し，サブターゲットとして設定する．サブターゲットとの相対座標から移動方向を算出し移動する．設定したサブターゲットに到達した時，サブターゲットの次のノードの座標を新たなサブターゲットとして再度設定し，移動方向を計算して移動する．

4. 計算機実験

本実験では，提案手法の有用性を検証するために，通信状態を考慮した MSN の配置動作が可能か計算機シミュレーションを行った．なお，ここでは，設定した環境に基づいてグラフ構造を与えている．本実験では，無線通信機能を有したセンサノードを Node と定義し，その中でも基地局となる Node を Sink，移動機構を有した Node を MSN，ロボットとなる Node を Leader robot と位置づける．評価するのは MSN，Leader robot，Sink 間の RSSI である．

4.1 実験条件の設定

実験環境は 50m×50m の障害物が存在しないフィールドで行う．Node 数は 4 台で，各 Node の初期座標は，Sink が(0, 0)，MSN1 が(1, 1)，MSN2 が(2, 2)，Leader robot が(3, 3)である．ネットワークは Sink-MSN1-MSN2-Leader robot の直線状に構築する．事前に構築するグラフ構造のノードは，個別に ID を設定しており，それぞれ座標情報を保持している．ID に対応した座標情報は，1 (5, 5)，2 (22, 5)，3 (48, 5)，4 (22, 48)，5 (48, 48)，6 (5, 48)である．グラフ構造は図 6 に示すように，単純な構造 2 つと複雑な構造 1 つの計 3 つでそれぞれ比較する．エッジの重みは，グラフのノード

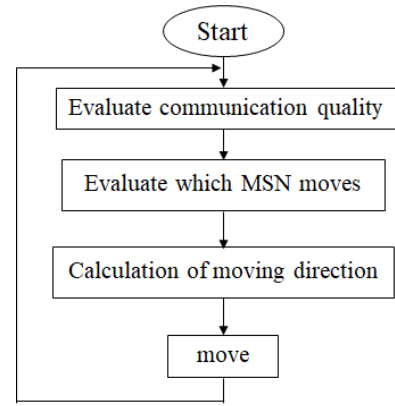


Fig.4 Movement control flowchart

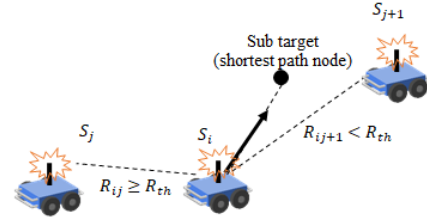


Fig.5 MSN deployment based on graph structure

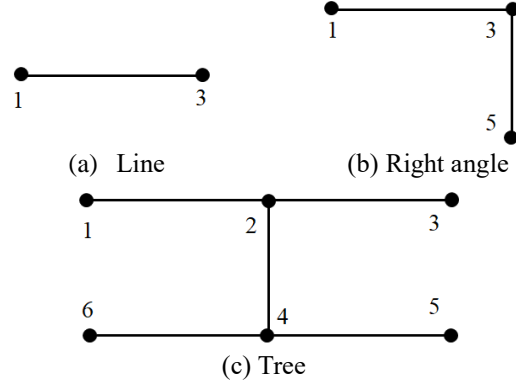


Fig.6 Each pattern of graph structure

Table1 Parameter setting

Parameter	Value
Simulation time [s]	300
RSSI threshold [dBm]	-60
Velocity [m/s]	1
Tx power [dB]	16
Application layer	UDP
Physical layer	ieee802.11g

間の RSSI として，対数距離伝搬損失モデル^[6]を基に算出する．Leader robot が移動する軌跡は，図 6(a)は 1→3，(b)は 1→3→5，(c)は 1→2→3→2→4→5→4→6 の順に移動していく．各 MSN は隣接 MSN との RSSI の状態に基づいて移動する．実験条件は表 1 に示す．

4.2 実験結果

実験結果を図 7 に示す．3 つの結果から，Node 間の RSSI が低下した時，MSN が移動することで RSSI を維

持しようと収束したことが確認できる。Leader robot が移動開始直後から Leader robot-MSN2 の RSSI が低下し始め、閾値の-60dBm を下回ったことで、MSN2 が移動を開始している。その瞬間、MSN2-MSN1 の RSSI が低下し始めている。同様に MSN1-Sink でも MSN1 が移動したことで低下し始めたと判断できる。よって、グラフ構造に基づいて通信状態を維持するための配置動作が可能なが示された。さらに、(a)に比べて(b), (c)の各 RSSI は、閾値より下回って最終的に収束した。これは、途中の各 Node 間の RSSI が閾値以下の値であるため、Leader robot が移動を停止するまで常時 MSN が移動し続けていたからである。そして、(c)の 110s から 170s までの Leader robot-MSN2 の RSSI が、向上しない結果が示された。これは Leader robot と MSN2 が同じ方向に向いて移動したことが要因である。今回、エッジの重みは距離減衰のモデルで表現しているため、同距離であれば通信状態は変わらないことになる。そのため、このように RSSI が向上しない結果になった

4.3 考察

今回、グラフ構造や、MSN、Leader robot の移動状況によっては RSSI が向上しないこと、最終的に RSSI が収束するのが閾値以下であることが判明した。RSSI に基づいて配置動作をしていく上で、これら問題に対しては台数を増やすことで各 Node 間の RSSI は閾値付近に収束可能だと考える。さらに、Leader robot と MSN は同速度で移動させたが、実際は、環境やハードウェアの性能によって等速になることは少ない可能性がある。そのためそれぞれ速度が変わる場合、各 Node 間距離も時間経過によって著しく変化する可能性がある。その結果、各 RSSI の収束する時間も状況により変化すると考えられる。各 RSSI が閾値以下で収束した際に発生する RSSI の細かい振動は、MSN の微動作が要因である。この微動作はエネルギー消費量の増大という問題点に繋がるため、稼働時間を考慮する上で、MSN の移動条件を再検討する必要がある。

5. 結言

本稿では、被災地情報収集支援システム RWSN において、ロボットにより環境情報を収集しながら、その情報をトポロジカルマップで表現し、MSN の移動経路情報として与え、さらに通信品質およびエネルギー残量の評価を加えることで、通信接続性と稼働状態を考慮しながらロボットおよび複数台の MSN を操作する手法を提案した。実験の結果より、グラフ構造に基づいて MSN を移動・配置することで、通信接続性を維持可能であることを確認した。今後は、本手法を 3 次元空間へ拡張し配置動作の影響を検証するとともに、実機実験により

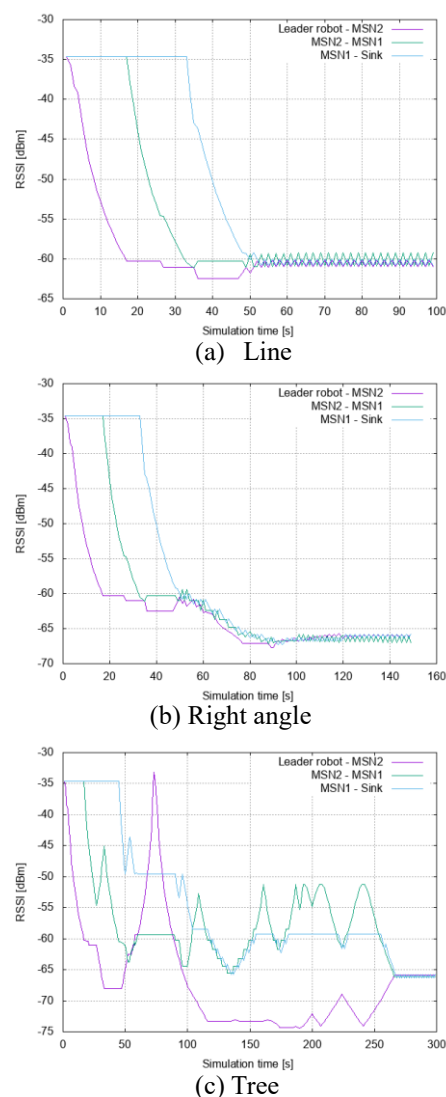


Fig.7 RSSI in each pattern of graph structure

提案手法の有用性を確認する予定である。

引用文献

- [1] 国土交通省, “最近の自然災害と防災・減災の取り組みについて”, 平成 27 年.
- [2] 小柳栄次, “災害対応ロボット 福島第一原子力発電所建屋内探査用ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.10, pp671~675, 2016.
- [3] 広瀬茂男, 松野文俊, “レスキュー用ヘビ型ロボットの開発：形態設計とその制御”, 日本機械学会誌, Vol.106, No.1019, pp769-773, 2003.
- [4] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, “Wireless sensor network survey, *Comput. Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, Aug. 2008.
- [5] Godard, J.P.: Urban Underground Space and Benefits of Going Underground, Proc. World Tunnel Congress 2004 and 30th ITA General Assembly, Singapore, pp.1–9 (May 22–27, 2004).
- [6] ns-3 Propagation Loss Model, (<https://www.nsnam.org/docs/models/html/propagation.html>)