

# 通信と移動の状態を考慮した 通信接続性維持のための移動センサノードの配置動作

Study of mobile sensor node arrangement for maintaining communication connectivity  
considering communication and mobility conditions

○学 川畑 皓司 (東京電機大)

正 鈴木 剛 (東京電機大)

Koji KAWABATA, Tokyo Denki University, k.kawabata@nrl.c.dendai.ac.jp

Tsuyoshi SUZUKI, Tokyo Denki University

As an information collecting means to grasp the damage situation in an environment where communication is unstable, internal situation such as underground malls and subway premises is hard to confirm when a disaster occurs, we have been studying a system gathering disaster area information by utilizing the rescue robot and Wireless Sensor Network (WSN) built on Mobile Sensor Nodes (MSN). This paper proposes MSN arrangement method to maintain wireless communication connectivity considering a long-time operation of the network. The MSN compares evaluation values of communication quality and remaining energy level with the neighbors and moves to a suitable location maintaining the communication connectivity. The Simulation of change of energy consumption by several communication settings is conducted to confirm the usefulness of the proposed method.

**Key Words:** Wireless Sensor Network, Mobile Sensor Node Arrangement, Information Gathering System, Rescue robot

## 1. 緒言

近年、大規模な災害等による被害が頻発していることから、減災活動[1]の重要性が増している。減災活動では災害発生時の対応、および、発生後の早期の復旧復興のために、被災状況の迅速な情報収集が求められる。これまで、被災状況の情報収集には、ヘリや 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の遠隔操作による情報収集や被災者救助支援のシステムなど、様々な種類のロボットが研究・開発されている[2]。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、ロボット遠隔操作等を行う際の通信接続性および安定性は重要である。特に、地下街や地下鉄駅構内のような閉鎖空間では、内部状況が把握しづらく、かつ、屋外に比べて通信が不安定な環境であることが多い。また、このような閉鎖空間では、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。さらに遠隔操作によるロボットの活用においては、四方が壁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。そのため通信が不安定となり遠隔操作性の低下が発生する。

そこで我々は、このような閉鎖空間における情報収集支援を目的として、Wireless Sensor Network(WSN)と遠隔操作ロボットを利用した被災地情報収集支援システム Robot Wireless Sensor Networks(RWSN)を提案及び検討している(図 1)。

## 2. Robot Wireless Sensor Networks

Robot Wireless Sensor Networks(RWSN)とは遠隔操作ロボットと Wireless Sensor Network(WSN)を利用した被災地情報収集支援システムである。移動機構を備えたセンサノード移動型無線中継センサ端末(MSN: Mobile Sensor Node)で WSN を構築し、WSN を介して災害対応ロボットの無線遠隔操作を行う。

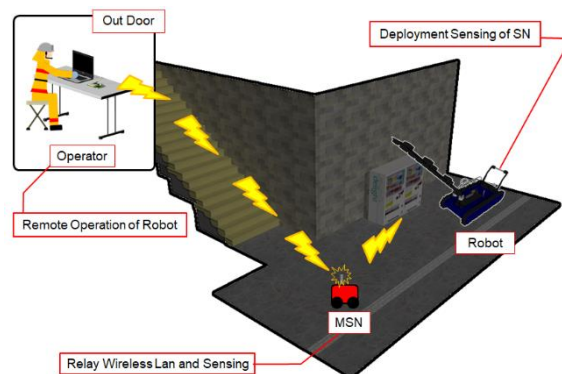


Fig.1 Robot Wireless Sensor Networks

環境内の情報は、MSN を無線中継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られる。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。

災害時の地下空間で RWSN を運用するためには、無線接続性を維持することが求められる。そのためには、MSN の位置をレスキューロボットや他 MSN の移動、遮蔽物による通信変動に対して適応的に調整する必要がある。また MSN は供給電源がバッテリーであることからエネルギー資源が有限である。そのため、MSN は、動作停止などに起因するネットワーク分断をしないように動作する必要がある。

そこで、ネットワークの無線接続性を維持し、通信変動やバッテリーのエネルギー残量を考慮した配置動作手法の検討を本研究の目的とする。

## 3. 提案手法

### 3.1 配置動作アルゴリズム

RWSN におけるネットワーク全体の無線接続性を維持するためには、MSN 間の無線接続性を考慮する必要がある。また RWSN ネットワーク全体の稼働時間は、ネットワークを構成する MSNs の最小エネルギー残量に依存することから、MSNs

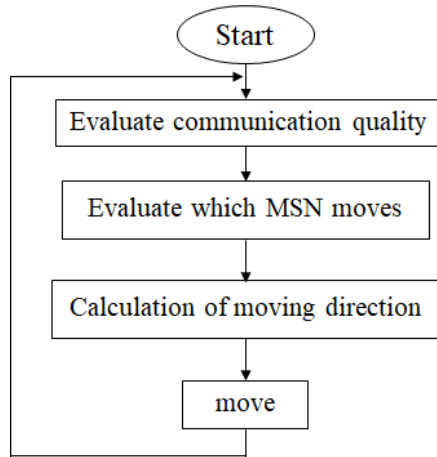


Fig.2 Main moving algorithm

でエネルギー残量を均一化させることで各 MSN の動作時間のばらつきを無くし、各 MSN のパフォーマンスに適した RWSN ネットワーク全体の稼働時間を保てると考えられる。そこで提案手法では、MSN 間の通信品質と隣接 MSN とのエネルギー残量の比率に基づいて、各 MSN の配置動作を決定する。図 2 に MSN の配置動作までの処理の流れを示す。MSNs は隣接 MSN と定期的に通信品質を計測しており、通信品質が低下したことを確認した MSN は、移動する前にエネルギー残量の比較処理に移行する。この処理は MSNs のエネルギー残量にばらつきがあるかどうかを評価しており、ばらつきがある場合、エネルギー残量が多い MSN が移動することにより、無線接続性の維持と MSN の不要な動作時間の消耗を抑える。

### 3.2 通信品質とエネルギー残量に基づく制御

本手法における通信品質指標として、受信信号強度(RSSI: Received Signal Strength Indicator)を用いる。各 MSN は隣接 MSN と定期的に RSSI を計測している。RSSI に閾値を設定し、その閾値以下となる時、エネルギー残量の評価をする。

MSNs のエネルギー残量の均一化を図るため、エネルギー残量が多い MSN が優先的に移動する処理を実行する、まず通信品質が低下した経路内にいる MSN を対象に、次式によって自身と隣の MSN のエネルギー残量を評価する。

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

$E(i)$ 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。この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。次にこの値を次の条件に従ってどちらの MSN を移動させるか決定する。

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

$\varphi_{th}$ は閾値である。移動する MSN が決定したのち、移動方向を算出し、移動を開始する。

そして、決定された MSN は隣接 MSN の相対情報から移動方向を算出し、RSSI が閾値以上になるまでその方向へ移動する。

### 3.3 障害物回避

提案手法における障害物回避アルゴリズムは、Virtual Force Field (VFF) Method[3]により制御される。この手法は個々の超音波センサから障害物との強度を基に、障害物からセンサまでの距離に応じた反力ベクトルを算出する。図 4 で示すように、この反力ベクトルとの合力ベクトルが、障害物回避時に MSN が移動する方向となる

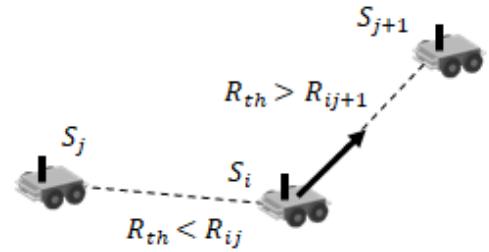


Fig.3 conceptual scheme movement based RSSI between MSN

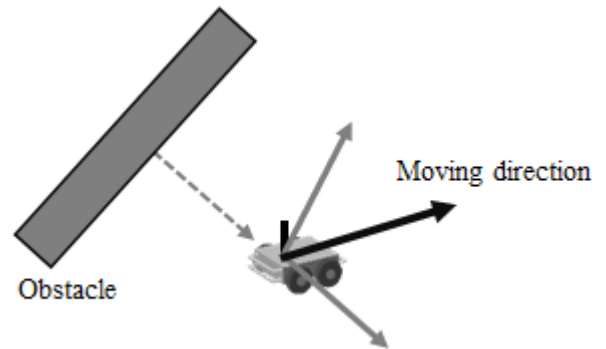


Fig.4 Conceptual scheme of the obstacle avoidance

## 4. 計算機実験

### 4.1 実験概要

提案手法では MSN の移動や無線通信でエネルギー消費量にばらつきが現れることを前提としている。そこで無線通信のみに着目し、様々な通信状態におけるノードのエネルギー消費量を評価し、エネルギー消費量にどの程度変化がみられるかシミュレーションにより確認した。RWSN で利用するマルチホップ通信をする上で、パケットロス等により、受信部に近いノードほど受信パケット数は減少すると考えられる。そうすると受信部に近いノード程、総エネルギー消費量は少ないと考える。そこで転送量、パケットサイズを変えてシミュレーションすることで、送受信のエネルギー消費量にどのような影響が現れるか比較する。

シミュレーション設定を表 1 に示す。シミュレーションでは、ノードを図 5 のように障害物のないシングルホップでの通信を行うように配置する。

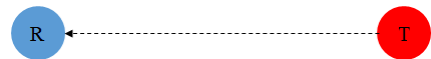


Fig.5 The communication method and placement of nodes

赤のノードは送信ノード、青のノードは受信ノードである。送信ノードは設定された転送量、パケットサイズに従って、受信ノードにシミュレーションが終了するまで伝送させる。なお本シミュレータでは、パケットサイズはパケット全体のサイズではなく、ペイロードのサイズのことを意味している。OFDM による伝送速度は、転送量が 1[kbps], 1[Mbps], 5[Mbps] の時は 6[Mbps], 10[Mbps] の時は 12[Mbps], 15[Mbps] の時は 18[Mbps], 20[Mbps] の時は 24[Mbps] と設定している。各ノードが使用するエネルギーモデルはリチウムイオン電池の非線形モデル[4][5]を使用する。このモデルは、シミュレータのリチウムイオンバッテリーモデルの初期設定として採用されている

モデルである。また本シミュレーションで用いる無線通信エネルギーモデル式は次式で定義する。

$$E_{t+1} = E_t + V * (t_{i+1} - t_i) * I_{t+1} \quad (2)$$

$V$ は電源電圧[V],  $I$ は消費電流[mA]であり,  $E_{t+1}$ は総消費エネルギー量[J]である。リチウムイオンバッテリーであるため, 電源電圧は, 時間経過に対して非線形に低下していくが, 本実験では満充電時の最大電圧を電源電圧とする。使用している無線通信エネルギーモデルは, 物理層がパケットの送受信, 待機状態になった時に, 消費電流が事前に設定してある値に切り替わることで送受信, 待機時の消費エネルギー量をそれぞれ計算している。評価はシミュレーション時間終了時の送受信ノードのエネルギー消費量及びパケットロスを用いる。

Table 1 Simulation setting

Parameter	Value
Number of node	2
Distance of between nodes[m]	30
Simulation time [sec]	60
Physical layer	ieee802.11g
Application layer	UDP
Modulation rate	OFDM
Data rate [Mbps]	0.001, 1, 5, 10, 15, 20
Packet size [Byte]	512, 1024, 1500, 1800
Idle current [mA]	250
Transmission current [mA]	380
Received current [mA]	310

## 4.2 実験結果

各パケットサイズ, 転送量による送受信ノードの無線通信エネルギー消費量の結果を図 6 に, その時のパケットロス率を図 7 に示す。図 6 より, 各転送量の時の平均総エネルギー消費量は 1[kbps]で, 126.82[J], 1[Mbps]で 135.81 [J], 5[Mbps]で 161.29[J], 10[Mbps]で 164.44[J], 15[Mbps]で 161.38[J], 20[Mbps]で 158.89 [J]となったことから, 転送量が増加するとエネルギー消費量が増加することが確認できた。しかし, 転送量を大きくさせても線形的に上がるわけではないことが, 今回の実験で示された。各転送量におけるパケットサイズを変更しても, エネルギー消費量の変化は微小であった。このことからパケットサイズによるエネルギー消費のばらつきの影響は少ないと言える。図 7 より, パケットロス率が 0[%]の時は, 送受信のエネルギー消費量に差はほとんどなかった一方で, パケットロス率がある時にはある程度差が出る結果となった。各転送量ではパケットサイズが 512 の時が, 一番パケットロスが発生する結果となったが, それが直接エネルギー消費量に影響を与える結果とはならなかった。このことからパケットサイズやパケットロス率に比例して総エネルギー消費量に変化するような傾向にならないことが示された。

## 4.3 考察

今回 6 パターンの転送量, 4 パターンのパケットサイズで実験を行った。転送量で見た時, kbps 単位だと送受信ノードでエネルギー消費量に差は出ず, Mbps 単位で転送量が大い値になるとある程度まではエネルギー消費量が高くなる傾向となった。またパケットサイズのみで見た時, エネルギー消費量に相関性やばらつきがあまり見られなかった。以上のことから, 無線通信によるエネルギー消費は, パケットサイズやパケットロス等より転送量による影響が大きいと言える。無線通信以外の要因としては各 MSN が移動することで, 移動機構の

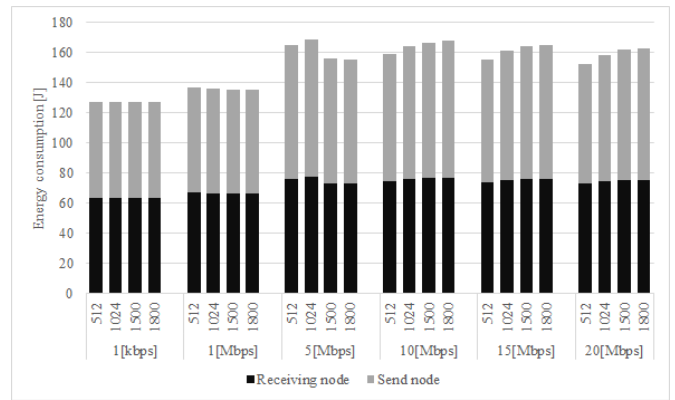


Fig.6 Total wireless communication energy consumption result

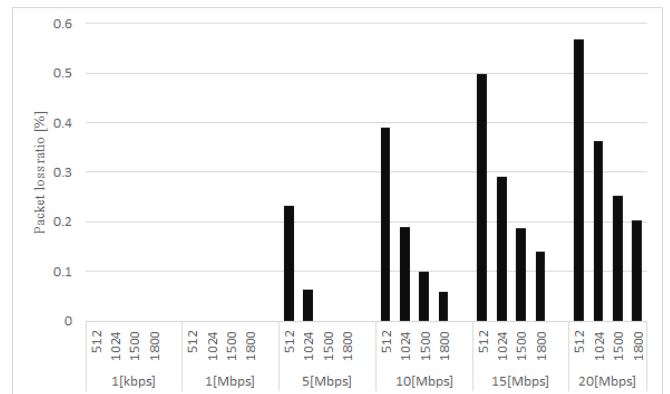


Fig.7 Result of packet loss rate

モータに負荷がかかり, 停止時より消費電流が増減することによるものが挙げられる。そのため, 提案手法によるエネルギー残量を考慮した制御手法は, 長時間経過した時に有効だと考えられる。

## 5. 結言

本稿は, MSN 間の無線接続性と MSN の動作時間を考慮した配置動作手法を提案した。本実験では, 無線通信の通信状態により, どのようにエネルギー残量にばらつきが出るか確認するために, 転送量やパケットサイズを変化させ, 総エネルギー消費量及びパケットロス率を計測した。今後は, マルチホップ通信においてエネルギー効率の良い移動制御を検討し, 実験により検証する予定である。

## 参考文献

- [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] 浅間一, “災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築”, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.1, pp37~41, 2014.
- [3] J. Borenstein and Y. Koren, “Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots in cluttered environments”, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, Vol.19, No.5, 1989.
- [4] Tremblay, O.; Dessaint, L.-A.; Dekkiche, A.-I., “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles,” Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, 2007.
- [5] C. M. Shepherd, “Design of Primary and Secondary Cells - Part 3. Battery discharge equation,” U.S. Naval Research Laboratory, 1963.