

# センサーネットワークにおけるポテンシャル場を用いた モバイルシンクの移動制御手法の提案と実装

藤田 勇希<sup>†</sup> 豊永 慎也<sup>†</sup> 小南 大智<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒565-0871 吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> 大阪大学 経済学研究科 〒560-0043 豊中市待兼山町 1-7

E-mail: †{y-fujita,s-toyonaga,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp

あらまし 近年、モバイルシンクをセンサーネットワークに導入することで、ネットワークの接続性や寿命を改善する手法が多く提案されている。既存の手法の多くは、センサーノードがGPSなどの測位機器を搭載していることを前提としているが、計画的なセンサーノードの配置を行わない限り、このような位置情報の収集自体が困難である。本稿ではこのようなモバイルシンクとして巡回型ロボットを想定し、巡回行動を行うモバイルシンクがネットワークに近づいた際に、移動先として選ばれたセンサーノードに向けて誘導を行う移動制御手法を提案する。提案手法では、移動先選ばれたノードが最小値を持つポテンシャル場を構築し、モバイルシンクの移動制御にこのポテンシャル場を用いることで、モバイルシンクを目的ノードに近づける。実機を用いた実験により、ポテンシャル場を用いた巡回型ロボットの移動制御によって、制御を行わない場合では安定して到達できなかった目的ノードへ、5分程度で到達することを示した。

キーワード モバイルシンク、移動制御、ポテンシャルルーティング、センサーネットワーク

## Proposal and implementation of controlled sink mobility using potential fields in wireless sensor networks

Yuki FUJITA<sup>†</sup>, Shinya TOYONAGA<sup>†</sup>, Daichi KOMINAMI<sup>††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>††</sup> Graduate School of Economics, Osaka University

E-mail: †{y-fujita,s-toyonaga,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In recent years, many studies have been conducted on incorporating mobile sinks into sensor networks and controlling their mobility in order to improve network connectivity and extend network lifetime. In existing methods, however, all or some nodes must know their own geographic location using special devices such as GPS receivers. Yet it entails a high cost when each node is equipped with a GPS receiver. Moreover, GPS-based localization cannot provide reliable location estimation in indoor environments and in the presence of obstacles. In this paper, we use a patrolling robot as a mobile sink and propose a controlled mobility to navigate the mobile sink towards the targeted sensor nodes. In our method, the targeted node constructs a potential field and the mobile sink can approach the target node using that field. We evaluate our method by implementing it into a cleaning robot for a mobile sink. We show that the mobile sink with our proposed method can reach the targeted node in about 5 min.

**Key words** mobile sink, controlled mobility, potential-based routing, sensor network

### 1. はじめに

無線センサーネットワークにおいては、計画的なセンサーノードの配置を行わない限り、シンクノードへのデータの到達性を保証することは難しい。このような問題に対して、セン

サーノードの無線送信出力を大きくすることで解決が可能であるが、消費電力の増加を招いてしまう。そこで近年、モバイルシンクを配置して、その移動を制御することで、ネットワークの接続性や寿命を改善する手法が多く提案されている。その中で、モバイルシンクの移動をネットワークの内外から動的に

制御することによって、動的に変化するネットワークにおいても通信性能要求や電力要求を満たす controlled mobility が注目を集めている [1-3]。しかしこれらの移動制御手法は、センサーノードが GPS などの測位機器を搭載し、モバイルシンクが個々のセンサーノードの位置を把握していることを前提としたものが多く、測位精度誤差や、また前述のとおり測位情報収集が問題となる。

本稿では、このようなモバイルシンクとして巡回型ロボットを想定し、巡回行動を行うモバイルシンクがセンサーネットワークに近づいた際に、センサーネットワークの中から移動先として事前に選出されたセンサーノード（目的ノード）に向けて誘導を行う移動制御手法を提案する。目的ノードに向けてのモバイルシンクの移動制御の際には、ポテンシャルルーティング [4-6] で用いられるポテンシャル場を利用する。ポテンシャルルーティングでは、個々のノードがポテンシャルと呼ばれるスカラー値を保持し、シンクノードに近いセンサーノードほど低いポテンシャルをもつ。このような、ポテンシャル場を構築すれば、センサーノードは自身よりも低いポテンシャルを持つノードを中継してデータを送ることで、データをシンクノードに届けることができる。このようなポテンシャル場の構築には、個々のノードが自身の所持するポテンシャルを、隣接するノードに通知する必要がある。

提案手法では、目的ノードのポテンシャルを最小とすることで、モバイルシンクがこのポテンシャルを傍受し、ポテンシャルルーティングにおけるデータの中継と同様に、より低いポテンシャルを持つノードを探し、そのノードに接近することで目的ノードに到達する。多くの場合、あるノードへの接近には、GPS などから得られる、そのノードとモバイルシンク自身の座標情報が必要とされるが、提案手法は傍受したポテンシャルとその受信信号強度を利用することで GPS を用いない移動制御を可能としている。

本手法の応用先としては、監視などの作業を行う巡回型ロボットが局所的に配置されたセンサーネットワークからデータを収集する、緊急時に人の所持する PDA がネットワークを構築することで、災害救助ロボットを救助者のもとに誘導する、といったものが考えられる。

提案手法の有効性は、計算機を用いたシミュレーション及び実機を用いた実験により評価する。実験においては、モバイルシンクとして自動掃除ロボットである iRobot 社のルンパを用いており、掃除作業中にセンサーネットワークに近づいた際には、事前に選出された目的ノードに近づき、目的ノードがネットワーク内のセンサーノードから収集した観測情報を受けとる。巡回型ロボットには掃除や監視などの本来の巡回目的があり、本実験においても、モバイルシンクを一時的に目的ノードに誘導し、モバイルシンクがデータを受信した後は本来の巡回動作に戻る。

本稿は、以下のような構成となっている。初めに 2. 章で提案する移動制御手法を説明する。3. 章では提案手法の有効性をシミュレーションによって確認する。4. 章において、提案手法の実装方法について述べ、5. 章で実機を用いた実験によって提案手法の有効性を検証する。最後に、6. 章に本稿のまとめを述べる。

## 2. ポテンシャル場を用いたモバイルシンクの移動制御手法の提案

本章では、ポテンシャル場の構築手法及びモバイルシンクの

移動制御手法について詳細を述べる。

### 2.1 ポテンシャル場を用いた経路制御

本稿で提案する移動制御手法はポテンシャルルーティングに用いられるポテンシャル場を利用する。目的ノードへのモバイルシンクの誘導を行うことが目的であるため、ここでは、非常に単純なホップ数を用いたポテンシャル場を構築する。すなわち、ポテンシャルとして各ノードは目的ノードまでの最小ホップ数を保持する。

ポテンシャル場の構築及び更新を行うために、ネットワーク中のセンサーノードは隣接ノードとポテンシャル場の構築に必要な情報を含めた経路制御メッセージを定期的に交換する。経路制御メッセージには `node_id`, `potential`, `net_id` が含まれ、それぞれ送信ノードのノード ID、送信ノードが保持するポテンシャル、送信ノードが所属するネットワーク ID を表している。この経路制御メッセージをモバイルシンクが傍受し、自身の移動を制御する。

### 2.2 モバイルシンクの移動制御手法

モバイルシンクは、移動中にポテンシャル場の構築に用いる経路制御メッセージを受信したとき、ポテンシャル場の勾配に沿った移動制御を開始する。経路制御メッセージの `potential` を確認し、より小さい `potential` を受信した際には、`node_id` と `potential` を記憶し、そのノードへの接近を試みる。目的ノードが収集したデータを受信した後は、収集済みのネットワーク ID として `net_id` を記憶し、そのネットワーク ID をもつノードからの経路制御メッセージを無視する。

このとき、経路制御メッセージに含まれる情報のみでは、接近すべきセンサーノードへの方向を決定することは不可能である。そこで、モバイルシンクがセンサーノードから受信する信号の受信信号強度 (RSSI) を測定することで、モバイルシンクの移動方向を決定する移動制御アルゴリズムを提案する。提案手法はモバイルシンクの持つ無線アンテナに指向性が存在しない場合を想定しているが、指向性アンテナを用いることで、より高精度に移動方向を決定することが可能である。移動制御アルゴリズムを以下に示す。

`potential` と `node_id`、RSSI はそれぞれ、受信したメッセージに含まれているポテンシャルとノード ID、メッセージの受信信号強度を表す。`potential_min` と `node_id_min`、`RSSI_min` はそれぞれ、モバイルシンクが受信したメッセージの中で最小のポテンシャルとそのときのノード ID、受信信号強度を表す。

(1) モバイルシンクはセンサーノードから経路制御メッセージを受け取るごとに次の処理をする。

(a) `potential_min > potential` の場合: `potential` と `node_id` と RSSI を記憶し、(2) の処理を行う。

(b) `potential_min < potential` の場合: 直進を続ける。

(c) `potential_min = potential` の場合:

i. `node_id_min = node_id` の場合: RSSI が `RSSI_min` よりも大きければ直進を続ける。そうでない場合、(2) の処理を行う。

ii. `node_id_min ≠ node_id` の場合: 直進を続ける。

(2) 移動方向の探索を行う。一定時間、現在の地点 (`L_c`) を中心とした円周上を移動し、RSSI が最大となる地点 (`L_max`) を記憶した後に、`L_c` に戻る。その後、`L_c` から `L_max` に向かう方向に直進を続ける。

(3) 目的ノードの通信可能範囲にモバイルシンクが到達した場合、モバイルシンクは目的ノードからデータを受け取り、通常の巡回アルゴリズムに戻る。

表 1 シミュレーション結果

	到達時間
移動制御を用いる場合	138.78±67.17 s
移動制御を用いない場合	308.30±102.58 s

### 3. シミュレーションによる移動制御の検証

提案手法においてモバイルシンクの移動を制御できていることを示すためにシミュレーションによる評価を行なった。120 m×80 m の観測領域にセンサーノードを 7 個ランダムに配置し、モバイルシンクを 1 台配置した。7 個のセンサーノードのうち 1 個は目的ノードとして動作する。

シミュレーションは、OMNeT++ 4.1 シミュレーターを使用し、モバイルシンクが目的ノードと通信を終えるまでの時間を、到達時間として評価している。モバイルシンクは、初めにセンサーノードからデータを受信するまではランダムウェイポイントモデル [7] に従って 1 m/s で移動し、センサーノードから初めて経路制御メッセージを受信した場合に、前章に示した方法で移動制御を行う。

シミュレーションの無線モデルとして、通信可能範囲を 50 m とし、距離に応じて減衰していく単純なモデルを用いている。無線通信速度は 250 kbps、データサイズは 128 byte である。また、各ノードは 1 s ごとの周期で経路制御メッセージを送信している。モバイルシンクの円運動時の角速度は  $\frac{\pi}{6}$  rad/s である。

シミュレーションに際しては、移動制御手法をモバイルシンクに適用した場合と適用しない場合のそれぞれにおいて、モバイルシンクが移動を開始してからモバイルシンクが目的ノードからデータを受信するまでの時間を比較している。シミュレーションの試行回数は 50 回であり、信頼区間を 95% とした場合のシミュレーション結果を表 1 にまとめる。

シミュレーションの結果から、移動制御手法を用いる場合のシミュレーション時間の方が移動制御手法を用いない場合よりも短く、ポテンシャルによる移動制御によりモバイルシンクの誘導を行うことができていることが分かる。また、移動制御手法を用いない場合の信頼区間は大きく、これはランダムウェイポイントモデルのランダム性に起因している。一方で移動制御手法を用いる場合では、平均到達時間に対する信頼区間の比が大きい。この原因は、比較的時間を要する回転による進行方向の探索の回数、モバイルシンクがポテンシャル場の中に侵入してきた場所によって大きくばらついていることである。

### 4. ポテンシャル場を用いたモバイルシンクの移動制御手法の実装

本章では、ポテンシャル場を用いたモバイルシンクの移動制御の実装方法について述べる。

#### 4.1 システムの概要

提案するシステムでは、一定の観測領域において、温度の観測を行い観測データの収集を行う。観測領域に配置されたセンサーノードが定期的に温度を観測し、観測情報を一時的に目的ノードとして振る舞うセンサーノードに集め、モバイルシンクが目的ノードの通信範囲にまで移動を行うことで、目的ノードに集まったデータを収集する。また、本稿ではモバイルシンクとして全自動掃除機ロボットを用いる。全自動掃除機ロボットには掃除という目的があるため、掃除中の巡回型ロボットを一時的に目的ノードに誘導した後は、本来の掃除動作に戻す。

#### 4.2 システムの機器構成

今回の実験では、巡回型ロボットとして iRobot 社の自動掃除用ロボット、ルンバ (Roomba 790) を使用する。これは、ルンバのシリアルインタフェース仕様が iRobot 社によって公開されているためである [8]。このシリアルインタフェースに対してソフトウェアからコマンドを送ることで、外部からルンバの移動制御を行う。

環境情報の観測及び通信を行う無線センサーノードとして Crossbow Technology 社の IRIS Mote XM2110 を使用する。IRIS は無線センサーネットワークの開発に広く使用される無線機器であり、無線通信方式として、IEEE 802.15.4 ノンビーコンモードを採用している。本実験では、環境情報を観測しポテンシャル場を構築する IRIS (情報観測用 IRIS) と、情報観測用 IRIS が送信する経路制御メッセージを傍受し、ルンバの移動をコントロールする機器 (移動コントローラー) に対して傍受したポテンシャル値とメッセージの RSSI の値を送信する IRIS (基地局用 IRIS) の 2 種類の機能を持つ IRIS の実装を行う。

#### 移動コントローラー

本実験では基地局用 IRIS が情報観測用 IRIS から受け取ったポテンシャルの値とメッセージの RSSI の値を元に、ルンバに入力すべきコマンドを決定し、ルンバにコマンドを入力する移動コントローラーとしてノートパソコン (Let's Note CF-S9) を使用する。基地局用 IRIS とノートパソコンの接続は USB インタフェースを用いることで実現できる。一方ルンバとの接続に関してもノートパソコン側の USB インタフェースを用いるが、ルンバのシリアルインタフェースに適したシリアル変換を行う必要があるため、後述のシリアル変換モジュールを利用する。

#### シリアル変換モジュール

移動制御用 PC が送信したコマンドをルンバに与える際に、それらのコマンドをシリアル変換する必要がある。そのため、シリアル変換モジュールとして FT232RL USB シリアル変換モジュールを使用する。ノートパソコンと FT232RL を USB ケーブルで接続し、FT232RL の RXD (データ受信ピン) と TXD (データ送信ピン) とルンバの TXD と RXD をそれぞれ接続することによって、ノートパソコンからルンバへのコマンド入力が可能となる。

#### 4.3 システムの開発環境

IRIS の開発環境として、無線センサーネットワーク用の OS である TinyOS 2.1.0 を使用する。TinyOS は限られた資源下で高効率な処理を行えるように設計されており、消費電力を小さく抑えられるという特徴がある。本実験では Ubuntu 10.04 上において TinyOS 開発環境を構築し、C 言語を拡張したプログラミング言語である nesC を用いた実装を行う。

移動制御を行うノートパソコンでは、C 言語を用いて作成した移動制御用ソフトウェアを実行する。作成するソフトウェアにおいては、常時シリアルインタフェースを監視し、インタフェースが基地局用 IRIS からメッセージを受け取る度に、ルンバに対して状況に応じたコマンドを送信する。

#### 4.4 ポテンシャル場構築の実装方法

##### 定期的な経路制御メッセージの送信

TinyOS 上の Timer コンポーネントを利用することで、定期的なメッセージの送信を行うことが可能である。本稿においては、すべてのセンサーノードは 1 s 間隔で経路制御メッセージを行うこととしている。経路制御メッセージに含まれる情報に

表 2 実装における経路制御メッセージ

経路制御情報	型	型の説明
node_id	nx_uint16_t	2 バイトの符号なし整数
potential	nx_uint16_t	2 バイトの符号なし整数
net_id	nx_uint8_t	1 バイトの符号なし整数

表 3 ルンバの移動制御のフェーズ一覧

フェイズ名	フェイズの説明
FIND_NEWIRIS	ポテンシャルがより小さい IRIS の発見
APPROACH_IRIS	FIND_NEWIRIS で発見した IRIS への接近
REACH_PROXY	目的ノードとなる IRIS への到達
CLEAN	移動制御を行わない

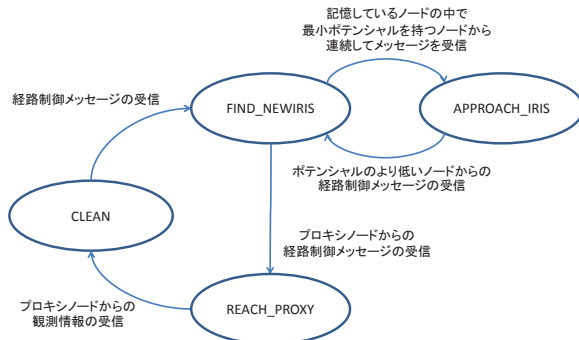


図 1 ルンバの移動制御フェーズの遷移図

に関して、表 2 に示す。

各センサーノードは、経路制御メッセージを受信するごとに、ポテンシャルを再計算する。ここでは目的ノードまでのホップ数を用いているため、記憶している最小のポテンシャルに 1 を加算したものが自身のポテンシャルとなる。

実装においては、ポテンシャル場を構築する IRIS の送信電力を、TinyOS 上の設定ファイル上で変更可能な Power Register の値を用いて適当な値に設定している。ここでいう適当とは、実験を行う環境において全てのノードがフルメッシュで繋がっていることがなく、また、いずれかのノードが孤立することがない程度の電力を指している。

#### 4.5 モバイルシンク移動制御手法の実装方法

ルンバの移動制御は主に 3 つのフェイズから構成され、現在のフェイズについては、情報観測用 IRIS から受け取った経路制御メッセージを用いて基地局用 IRIS が判断する。このとき用いるのは、ポテンシャルの値、IRIS を識別するためのノードの ID、IRIS が所属するネットワークの ID である。基地局用 IRIS は現在のフェイズを判定した後に、現在のフェイズと経路制御メッセージの RSSI を移動コントローラーに伝える。移動コントローラーは、RSSI の値の大小に応じて、現在のフェイズにおいて適切なコマンドを判断し、ルンバにコマンドを入力する。以上のようにしてルンバの移動制御を行う。表 3 に、実装におけるルンバの移動制御のフェイズを示す。以降では基地局用 IRIS と移動コントローラーが行う処理及び実装に関してそれぞれ述べる。

##### 4.5.1 基地局用 IRIS が行う処理

基地局用 IRIS は、情報観測用 IRIS から受信したポテンシャルの値に基づき判断した現在の移動経路制御におけるフェイズを移動コントローラーに伝える。同時に、情報観測用 IRIS から受け取ったメッセージの RSSI の値を移動コントローラーに送信する。図 1 に、処理の流れを表した状態遷移図を示す。

図 1 におけるフェイズの遷移に関しては、以下に示すように基地局用 IRIS がフェイズを管理し、移動コントローラーに伝える。

#### CLEAN フェイズ

経路制御メッセージを受信した際に、移動制御における次フェイズとして、FIND\_NEWIRIS を移動コントローラーに伝える。

#### FIND\_NEWIRIS フェイズ

目的ノードから経路制御メッセージを受信した場合は、目的ノードが所属するネットワークの ID を記憶する。移動制御における次フェイズとして、移動コントローラーに REACH\_PROXY を伝える。情報観測用 IRIS からメッセージを受信した場合には、移動コントローラーに受信した経路制御メッセージの RSSI を伝えと共に、移動コントローラーに次フェイズとして APPROACH\_IRIS を伝える。

#### APPROACH\_IRIS フェイズ

情報観測用 IRIS から経路制御メッセージを受信した際に、メッセージに含まれるポテンシャルの値を参照し、記憶している最小ポテンシャル値と比較する。

- 記憶している最小ポテンシャル値よりも、メッセージに含まれるポテンシャル値の方が小さい場合、最小ポテンシャル値とそのポテンシャルを持つ情報観測用 IRIS の ID を更新し、移動コントローラーに次フェイズとして FIND\_NEWIRIS を伝える。
- 記憶している最小ポテンシャル値よりも、メッセージに含まれるポテンシャル値の方が大きい場合は、特に処理を行わない。

- 二つの値が等しい場合、それらが同一の情報観測用 IRIS のポテンシャルであるならば、移動コントローラーに受信した経路制御メッセージの RSSI を伝える。異なる場合には、RSSI の値がより大きい情報観測用 IRIS の ID を記憶する。

#### REACH\_PROXY フェイズ

到達した目的ノードと同一のネットワークに所属する情報観測用 IRIS をネットワークの ID から判別し、それらの情報観測用 IRIS が送信する経路制御メッセージを一定期間無視する。移動制御における次フェイズとして、移動コントローラーに CLEAN を伝える。

##### 4.5.2 移動コントローラーが行う処理

移動コントローラーは、基地局用 IRIS が判断した現在の移動制御フェイズ、基地局用 IRIS が受信したメッセージの RSSI の値をもとに、ルンバに入力するコマンドを決定し、入力を行う。

#### FIND\_NEWIRIS フェイズ

基地局用 IRIS が新たに向かうべき情報観測用 IRIS を発見した際に、移動コントローラーは FIND\_NEWIRIS フェイズに遷移する。この際、以前記憶していた RSSI に関する情報や、後述するルンバの自転角度に関する情報がある場合、初期化する。

#### APPROACH\_IRIS フェイズ

基地局用 IRIS から受けとった RSSI 値に基づき、現在向かうべき情報観測用 IRIS に近づくフェイズである。ルンバに自転のコマンドを入力することで RSSI の強い方向を探索し、その後、RSSI が増加する限り直進を行う。2. 章で説明したアルゴリズムと異なり、ルンバに円周運動を行わせることは難しいため、反時計回りに自転を行うこととしている。このとき、基地局用 IRIS の位置は自転中ほとんど変化せず、RSSI の値はほとんど変化しない。そこで、図 2 に示すようにアンテナの背面にアルミ製の反射板を放物線状に備え付けることで、アンテナに擬似的な指向性をもたせている。情報観測用 IRIS への接近は、'進行方向の探索'、'進行方向への回転'、'進行方向の修正' の 3 つからなる。それぞれについての詳細を以下に示す。



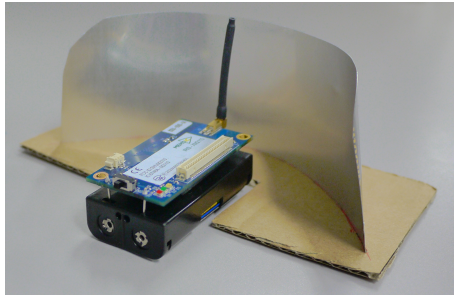


図 2 擬似指向性アンテナ

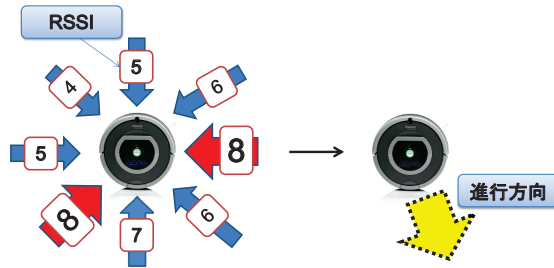


図 3 RSSI が最大値を示す方向が複数ある場合の方向の合成 (サンプリング数 8 の場合)

- 進行方向の探索

RSSI が最大値を示す方向を探索する。実験に用いる情報観測用 IRIS は 1 s 毎にポテンシャルを送信し、ルンバは角速度 0.45 rad/s で自転を行うように設定している。このとき、ルンバは一回転の間に 14 方向の RSSI を取得する。ここで、ルンバの進行方向を示すパラメータを `RoombaDirection` とする。`RoombaDirection` は自転開始時に 0 であり、1 s 毎に 1 ずつインクリメントする。受信したメッセージの RSSI が最大であったときの `RoombaDirection` を `TopRoombaDirection` として記憶する。`TopRoombaDirection` が複数存在する場合は、最後に記憶した 2 つの `TopRoombaDirection` である、TRD1、TRD2 の平均値を `TopRoombaDirection` と再設定することで、進行方向の誤りを吸収する。ただし、TRD1 と TRD2 の差が 7 以上である場合は  $\frac{TDR1+TDR2+14}{2} \bmod 14$  を `TopRoombaDirection` とすることで、逆方向への進行を防ぐ。処理終了の判定は探索開始時に起動したタイマーによって行い、探索開始から 14 s が経過した場合に処理を終了する。図 3 には、8 方向をサンプリングする際の進行方向の決定の例を示している。

- 進行方向への回転

進行方向の探索終了時に `TopRoombaDirection` と現在の `RoombaDirection` の差分を用いて、ルンバの移動方向を調整する。具体的には、`TopRoombaDirection` が 7 以上である場合は  $(14 - \text{TopRoombaDirection})$  秒の間時計回りに自転を行い、6 以下の場合は `TopRoombaDirection` 秒の間反時計回りに自転を行う。

- 進行方向の修正

探索後の進行中にもかかわらず RSSI の値が減少する場合、探索で得られた方向が誤っているといえる。そこで、受信したメッセージの RSSI の増減傾向を用いて、進行方向の修正を行う。RSSI 観測値の指数移動平均 (EMA) を算出し、 $N$  秒ごとに  $N$  秒前の EMA と比較して増減傾向を判断する。式 (1) に EMA の導出方法を示す。 $E_n$  を  $n$  回目の RSSI 観測時点での EMA、 $R_n$  を  $n$  回目の RSSI の観測値、 $\alpha$  を指数移動平均計算時の重み付け係数とする。

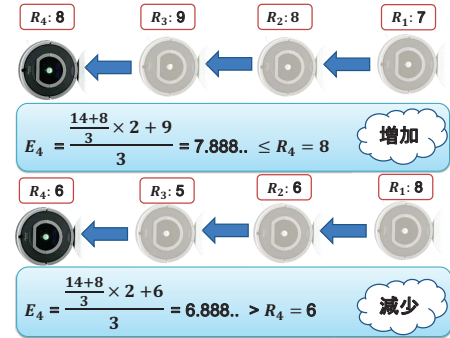


図 4 ルンバの直進時における増加傾向を示す場合と減少傾向を示す場合の RSSI のサンプリング例

$$E_n = (1 - \alpha) \cdot E_{n-1} + \alpha \cdot R_n \quad (1)$$

$R_n$  が  $E_{n-1}$  以上の場合には、RSSI は増加しているとみなし、直進を続ける。そうでない場合には進行方向を再探索する。図 4 に増加傾向を示す場合と減少傾向を示す場合のそれぞれの例を示す。

### REACH\_PROXY フェーズ

目的ノードの経路制御メッセージを受信した際にこのフェーズに遷移する。ルンバに停止のコマンドを入力し、目的ノードと基地局用 IRIS の通信を終えるのに十分な時間だけ待機する。

### CLEAN フェーズ

ルンバに掃除のコマンドを入力し、ルンバ本来の移動アルゴリズムに従って移動を行う。

## 5. 実機を用いた評価実験

本章では提案手法の有効性を示すため、提案手法を実装した機器を用いた評価実験を行う。モバイルシンクが移動を開始してから目的ノードの通信可能範囲に到達するまでの時間を、移動制御を行った場合と移動制御を行わない場合で比較する。無線通信におけるデータリンク層プロトコルは IEEE 802.15.4 ノンビーコンモードを用いており、非同期の常時通信を可能としている。また、前章で説明した移動平均の重みづけ係数  $\alpha$  を 0.2、増減傾向判定時の  $N$  を 5 に設定している。以降に、実験の概要、環境、実施方法、評価指標及び評価結果を述べる。

### 5.1 実験概要

マルチホップのネットワークを形成するように間隔を調整した上で、室内に IRIS を配置する。実験においては移動制御の到達時間を評価するため、目的ノードに選ばれるノードは固定とする。ルンバを特定の位置から起動し、ルンバが目的ノードへ到達するまでの遅延を測定する。上記の実験を、ルンバに対して移動制御を行った場合と、ルンバが独自のアルゴリズムで移動した場合とで比較し、移動制御が効果的に機能していることを示す。

### 5.2 実験環境

広さは 12 m × 8 m の室内に 6 台の IRIS を配置して実験を行った。実験はルンバの移動を阻害しない程度に障害物を撤去する。また、IRIS が利用する無線ネットワークのチャネルは、無線 LAN に広く用いられている IEEE 802.11 の 2.4GHz 帯と重複するため、周辺での利用状況を確認し、最もノイズの少ないチャネル 26 (2480MHz) を用いることとした。

#### 実験の実施方法

基地局用 IRIS と移動制御用ノートパソコンをシリアルポートを介して接続し、FT232RL と移動制御用ノートパソコンを基地局用 IRIS とは別のシリアルポートを介して接続する。ま



図 5 処理の流れ

表 4 移動制御実験の結果

	平均到達時間	到達率
移動制御を用いる場合	295.92±47.53 s	100%
移動制御を用いない場合	269.75±125.08 s	42.86%

た、実験を行う室内に 6 台の情報観測用 IRIS を配置して行う。実験開始時には情報観測用 IRIS によってポテンシャル場の構築が完了していることとする。モバイルシンクであるルンバの初期位置は固定であり、移動制御用ノートパソコン上で移動制御プログラムを起動することで実験を開始する。図 5 に処理の流れを示す。

#### 評価指標

実験の開始位置から起動したルンバが目的ノードに到達するまでの遅延時間を測定する。実験ではルンバに対して移動制御を行った場合と、ルンバ独自の掃除用アルゴリズムで移動した場合の 2 通りに対して、ルンバの移動を制御することによって、目的ノードに到達できることを示す。到達とは、基地局用 IRIS が目的ノードから閾値以上の RSSI の値を持つメッセージを受信することをいう。

#### 5.3 実験結果

本実験では、実験時間を 10 分とし、実験時間中にモバイルシンクが目的ノードに到達するまでの時間を計測する。なお、10 分以内に到達できなかった場合には到達失敗とする。実験結果は表 4 に示す通りであり、移動制御を用いた場合に到達失敗となることはなかった。ただし、信頼区間は 95 % とし、移動制御を行わない場合の平均到達時間は 10 分以内に到達した場合のみを考慮している。移動制御を用いない場合では、各試行における目的ノードまでの到達時間の分散は大きく、到達率は移動制御を行った場合と比較して半分以下となり安定した到達は望めない。従って、移動制御を用いることで目的ノードへの安定した誘導が実現できているといえる。

ルンバの移動アルゴリズムは、部屋中を行き渡るように設計されており、目的ノードに到達する可能性は高い。しかしながら、本実験においては擬似指向性を持たせたアンテナを利用しており、到達の判定がなされるには、目的ノードに比較的近い範囲で基地局用 IRIS が目的ノードの方向を向いている必要がある。そのため、移動制御を用いない場合では、ルンバは安定して計測時間内に目的ノードに到達することができなかった。

提案方式の実用化を考える場合、目的ノードに比較的近い範囲にモバイルシンクが到達すれば通信が可能であると考えられる。しかし、移動制御を行わないランダムな移動や、特定の仕事をを行うように移動するモバイルシンクでは、特定のノードに向かうことは困難であり、到達は低確率で生じることとなる。本提案方式は、回転を行うことで移動方向の探索を行う必要があるが、そのために実験中では 10 数秒と比較的時間を要しているが、目的ノードまでの到達には成功しており、有効であると

判断できる。

本提案方式では、RSSI の変動を考慮した移動方向の探索と調整手法を提案しているが、RSSI の変動が激しい場所やタイミングでモバイルシンクが意図しない方向に進み続ける状況が見られた。また、変動が小さい場所においても、RSSI の値が移動しても低いままでほとんど変化がなく、誤った方向へも進み続ける場合もある。これらの問題の解決は、RSSI の変化をより正確に捉えるようにアルゴリズムを改良することによって実現できると考えており、今後の課題である。

## 6. まとめ

本稿では、無線センサネットワークを対象として、ポテンシャル場を用いた移動端末の移動制御手法を提案した。シミュレーションによる評価の結果、移動制御を用いることでモバイルシンクが目的ノードからデータを受信するまでの時間を短縮できることを示し、提案手法が有効の機能していることを明らかにした。また、提案手法を巡回型掃除ロボットに実装し、提案手法なしでは到達が困難な目的ノードに 5 分程度で到達できることを示した。今後の課題として、残余電力を考慮して目的ノードを動的に変更することによる省電力化や、より実環境に適した移動制御手法、複数のモバイルシンクが存在する場合の移動制御手法についての検討が考えられる。

#### 文 献

- [1] A. Kansal, M. Rahimi, D. Estrin, W.J. Kaiser, G.J. Pottie, and M.B. Srivastava, "Controlled mobility for sustainable wireless sensor networks," Proceedings of the First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), pp.1-6, Oct. 2004.
- [2] R. Sugihara and R.K. Gupta, "Optimizing energy-latency trade-off in sensor networks with controlled mobility," Proceedings of the 28th Annual Joint Conference on the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), pp.2566-2570, April 2009.
- [3] F. Mourad, H. Chehade, H. Snoussi, F. Yalaoui, L. Amodeo, and C. Richard, "Controlled mobility sensor networks for target tracking using ant colony optimization," IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC), vol.11, no.8, pp.1261-1273, Dec. 2012.
- [4] S. Jung, M. Kserawi, D. Lee, and J.K.K. Rhee, "Distributed potential field based routing and autonomous load balancing for wireless mesh networks," IEEE Communications Letters, vol.13, no.6, pp.429-431, June 2009.
- [5] Y. Xu, F. Ren, T. He, C. Lin, and S. Das, "Building a potential field to provide real-time transmission in wireless sensor network," Proceedings of the 13th ACM International Conference on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM), pp.403-410, Oct. 2010.
- [6] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, and T. Hatauchi, "Controlled potential-based routing for large-scale wireless sensor networks," Proceedings of the 14th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), pp.187-196, Oct. 2011.
- [7] C. Bettstetter, G. Resta, and P. Santi, "The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks," IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC), vol.2, no.3, pp.257-269, July 2003.
- [8] "iRobot Roomba® 500 Open Interface (OI) Specification". available at [http://www.robotikasklubs.lv/read\\_write/file/Piemers/iRobot\\_Roomba\\_500\\_Open\\_Interface\\_Spec.pdf](http://www.robotikasklubs.lv/read_write/file/Piemers/iRobot_Roomba_500_Open_Interface_Spec.pdf).