

# 特別研究報告

## 題目

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  
モバイルシンク移動制御手法の実装と提案

## 指導教員

村田 正幸 教授

## 報告者

藤田 勇希

平成 25 年 2 月 12 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

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  
モバイルシンク移動制御手法の実装と提案

藤田 勇希

内容梗概

情報収集を行う無線センサーネットワークにおいて、多くの場合、センサーノードの観測データを収集し、その観測データを利用者へ直接届けることが可能なノード（シンクノード）の配置が前提とされる。しかしながら、人の立ち入ることが困難な環境においては、シンクノードの配置が困難な状況も考えられ、このようなシンクノードが存在しない場合には、それぞれのセンサーノードがセンシングしたデータを利用者に届けるために、遠距離通信を行うことによって利用者に直接データを届ける必要がある。しかし、このとき、センサーノードの消費電力が増大し、無線センサーネットワークの長期運用は困難となる。そこで、この問題を解決するために、移動機能を備えたシンクノード（モバイルシンク）をセンサーネットワークに導入する研究がこれまでに多くなされている。豊富なバッテリーと長距離の通信能力を持つモバイルシンクが、観測データを収集し、利用者へ直接届けることで、センサーノードの電力消費を抑制することができる。この場合、モバイルシンクが進入できるような環境であれば、利用者は観測したい領域のみにセンサーノードを配置するだけで良い。

本報告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、建物の監視などの別の目的で巡回行動を行う巡回型ロボットを、データを所持するセンサーノードに誘導する移動制御手法を提案し、実機を用いた実験により評価を行う。提案手法では観測領域に複数のセンサーノードを配置し、残余電力などのメトリックから選出されたセンサーノードがモバイルシンクとセンサーネットワークをつなぐプロキシノードとして振る舞い、ネットワーク内の観測データを収集する。このとき、プロキシノードへのデータの収集にはポテンシャル場を用いた経路制御手法を用いており、モバイルシンクの移動制御にもこのポテンシャル場を用いることで、モバイルシンクはプロキシノードに近づき、観測データを収集することができる。本報告では、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到達できなかったプロキシノードへ、6分程度で到達することを示した。

主な用語

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

## 目次

1	はじめに	5
2	関連研究	9
2.1	モバイルノードの移動制御手法	9
2.2	ポテンシャル場を用いた情報収集手法	11
3	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	13
3.1	ポテンシャル場を用いた経路制御	13
3.2	モバイルシンクの移動制御手法の提案	15
4	シミュレーションによる移動制御の検証	18
5	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	20
5.1	システムの概要	20
5.2	システムの機器構成	20
5.3	システムの開発環境	22
5.4	環境情報収集のための経路制御手法の実装方法	23
5.5	モバイルシンク移動制御手法実装方法	26
6	実機を用いた評価実験	33
6.1	実験概要	33
6.2	実験環境	34
6.3	実験結果	35
7	終わりに	38
	謝辞	39
	参考文献	40

## 目 次

1	モバイルシンクによるポテンシャル情報の取得 . . . . .	7
2	ポテンシャルモバイルシンクの移動経路 . . . . .	8
3	$N = 20$ 、 $S = \{1, \dots, 16\}$ とした場合のセンサーネットワークの例 . . . . .	11
4	Roomba 790 . . . . .	21
5	IRIS Mote XM2110 . . . . .	22
6	FT232RL . . . . .	23
7	IRIS 上での送信電力設定 . . . . .	24
8	実験環境におけるネットワークトポロジー . . . . .	25
9	ルンバの移動制御フェイズの遷移図 . . . . .	27
10	擬似指向性アンテナ . . . . .	29
11	ルンバの自転時における各方向での RSSI のサンプリング . . . . .	31
12	RSSI が最大値を示す方向が複数ある場合の方向の合成 . . . . .	31
13	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 . . . . .	32
14	プロキシノードが観測領域の境界付近にある場合 . . . . .	33
15	実験の様子 . . . . .	34
16	使用機器の構成 . . . . .	35
17	処理の流れ . . . . .	36
18	ルンバの移動アルゴリズム . . . . .	37

## 表目次

1	5つに分類したノードクラスの機能一覧 . . . . .	10
2	経路制御メッセージが含む情報 . . . . .	14
3	シミュレーションの設定値 . . . . .	19
4	シミュレーション結果 . . . . .	19
5	実装における経路制御メッセージ . . . . .	24
6	情報収集実験の結果 . . . . .	26
7	ルンバの移動制御のフェイズ一覧 . . . . .	27
8	移動制御実験の結果 . . . . .	36

## 1 はじめに

自律分散的に動作する多数のセンサーノード、及び少数のシンクノードで構成される無線センサーネットワークへの関心が強まっている。無線センサーネットワークでは、温度、湿度、音、圧力、振動などの様々な環境情報をセンサーノードが観測し、多くの場合、観測したデータを利用者からアクセスが可能なデータ収集用のノードであるシンクノードに送り届ける。このような無線センサーネットワークは、機器同士が無線通信によって相互に接続されているため、特別なインフラストラクチャーを用意することなく情報の収集が可能であり、様々なアプリケーションへの応用が期待できる。アプリケーションの例としては、環境のモニタリング、災害予測や災害時における被災地の様々な状況把握、施設管理、生物や物体のトラッキングなどが挙げられる [1]。

一方で、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は、センサーノードにとって必ずしも保証されるものではない。また、人の立ち入ることが困難な環境においては、そもそもシンクノードの配置が困難な状況も考えられる。しかしながら、このようなシンクノードが存在しない場合、それぞれのセンサーノードがセンシングしたデータを利用者に届けるためには、遠距離通信を行うことによって利用者に直接データを届ける必要があるが、これに要する電力は非常に大きい。無線センサーネットワークでは、センサーノードがバッテリーによって動作することが想定され、長期間の運用のためには省電力化も重要な課題となる。

これらの問題の解決のために、移動機能を所持するノードがネットワーク中を移動する、モバイルノードに関する研究が注目を集めている [2]。また、モバイルノードの中でもデータの収集を行うためにネットワーク中を移動するモバイルノードは特にモバイルシンクと呼ばれ、モバイルシンクを有するセンサーネットワークに関して様々な研究がなされてきた [3-5]。豊富なバッテリー、長距離の通信機能、移動機能を備えたモバイルシンクが、観測した情報を所持するセンサーノードの近くまで移動するため、センサーノードは少ないホップ数でシンクノードにデータを送信することが可能であり、ネットワーク全体としてデータの転送回数を減らすことが可能である。また、それぞれのセンサーノードは、モバイルシンクが最も近づく距離があらかじめ分かっているならば、モバイルシンクと通信が行える範囲まで送信電力を抑えることで省電力化が可能となる [4]。このようなモバイルシンクとしては、PDA を持つ歩行者やロボット、通信端末を装着した動物、同じ経路を定まった時間に通過する乗り物、例えばバスや電車に通信端末を備えたものが考えられている。

近年では、モバイルノードのモビリティを制御する“controlled mobility”の研究が盛んに行われている [6-14]。Controlled mobility とは、移動体に接続されたコントローラーが、ネットワークの内部あるいは外部から受信した信号をもとに、移動体のモビリティを動的に制御する手法である。人や動物は比較的ランダムな移動、乗り物はあらかじめ決められた経路やパターンに従った移動が行われるが、いずれも動的に移動の制御を行うことは想定されておらず、このような移動体の動的なモビリティ制御が考えられた背景には、近年のロボット開発や無線通信技術のめざましい進展がある。Controlled mobility の利点は、モバイルノードのモビリティを時々刻々と変化するネット

ワークの状況に応じて制御を行うことで、ネットワークに要求される通信性能や電力要求を満たすことが可能となる点である。例えば文献 [6] では、モバイルノードのモビリティを動的に制御することによって、ネットワーク環境の変化に伴うトラフィックパターンの変化に応じて、ネットワークのトポロジーを再構成する利点を論じている。特に、モバイルシンクのモビリティを、センサーノードの残余電力や保持しているデータ量などに応じて制御することで、省電力、収集処理の高速化などの様々な観点からネットワークの改善が期待できる。文献 [10] では、ネットワークの寿命を最大化するために、モバイルシンクの移動先、その場所における滞在時間を整数線形計画問題を解くことで導出している。モバイルシンクの移動はそれ自体が非常に大きな電力を要するため、文献 [9] では、モバイルシンクの残余電力が一定以下になった場合に基地局で充電を行う機能を実装し、モバイルシンクの移動による電力消費量増大に対応する手法が提案されている。

本報告では、controlled mobility の概念をもとに、センサーネットワーク内で送受されるメッセージを利用したモバイルシンクの移動制御手法を提案する。以降では説明を簡単化するために、モビリティを制御するコントローラーはモバイルシンク本来の移動コントローラー内に組み込まれていることとし、モバイルシンクとコントローラーを同じ意味で用いる。提案手法は、ネットワーク中でセンサーノード同士が送りあうメッセージをモバイルシンクの移動制御に用いることで、様々なネットワーク状況の変化に適応した移動が可能となる点に着目する。ネットワーク中のメッセージを移動制御に利用することは、以下に示すように様々な利点を持つ。

- ネットワークの変化に対する適応的なデータ収集

センサーノードの故障や追加によってネットワークのトポロジーが変化した場合や、ノードの電力切れや故障によってネットワークが分断された場合も、傍受したメッセージをもとにモビリティを制御することによって、適応的にデータ収集を継続的に行うことができる。

- 低コストでのセンサーノードの配置

モバイルシンクが動的にデータを所持するセンサーノードに近づくことができるため、シンクノードまでの到達性やセンサーノード同士の接続性を考慮しないでセンサーノードの初期配置を行うことが可能である。そのため、計画的なセンサーノードの配置に要するコストを考慮しないでよい。さらに、情報の収集のためには、観測を行いたい地点の周辺のみセンサーノードを配置すればよく、配置するセンサーノード数を小さくできるため、経済的なコストの点でも有利である。

- 残余電力の少ないセンサーノードの充電

残余電力に関するメッセージがネットワーク中で送信されていれば、モバイルシンクが残余電力の少ないノードに接近することで、残余電力が著しく減少しているノード、例えば中継負荷が高いノードの充電を行うことが可能となる。

提案手法では観測領域に複数のセンサーノードを配置し、残余電力などのメトリックから選出されたセンサーノードがプロキシノードとして振る舞い、観測データを一時的に収集する。モバイル

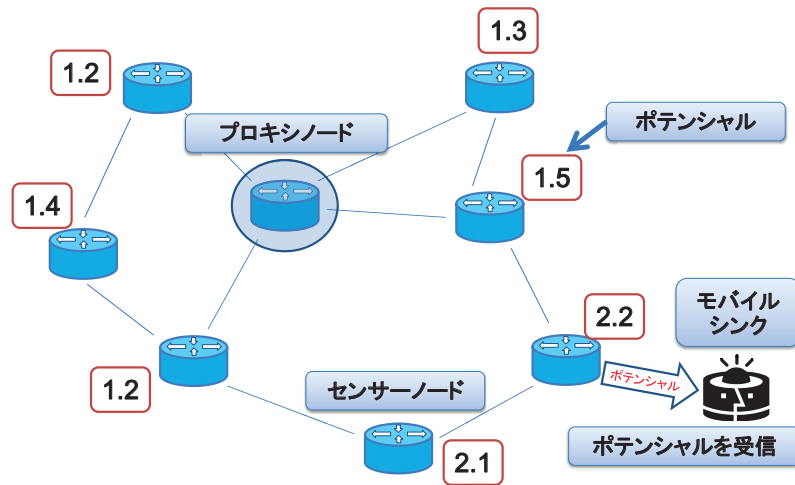


図 1: モバイルシンクによるポテンシャル情報の取得

シンクはネットワーク内で交換される経路制御用のメッセージを傍受し、得られる情報に基づいてプロキシノードに近づいて観測データを回収する。このように、残余電力に基づいてプロキシノードを選択することで、センサーネットワーク内での中継負荷の分散が実現できる。センサーノードの中から選ばれたプロキシノードは、データの収集にポテンシャル場を用いた経路制御手法を用いる [15–20]。ポテンシャル場を用いた経路制御手法では、各センサーノードはポテンシャルと呼ばれるスカラー値を保持し、定期的に隣接ノードに対してブロードキャストする。プロキシノードに近いセンサーノードのポテンシャルほど周囲のノードのポテンシャルに比べて低くなるように、各センサーノードは自身のポテンシャルを計算する。このようにして各ノードが所持するポテンシャルを物理学におけるポテンシャルとみなせば、センサーネットワーク内に仮想的なポテンシャル場が構築される。センサーノードが自身よりも低いポテンシャルを所持するノードに対してデータを転送することで、観測データはいずれプロキシノードに到達する。モバイルシンクは、経路制御に用いられるポテンシャル場に近づき、ポテンシャルを受信した際には (図 1)、データの転送と同様に、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 (図 2)。接近の判断には定期的にブロードキャストされるポテンシャルの値と受信信号強度 (RSSI) を用いており、GPS 等の位置情報を測定する機器を用いない移動制御を実現している。このように、ポテンシャル場を利用した移動制御を行うことで、モバイルシンクはプロキシノードに接近し、モバイルシンクとしてプロキシノードからデータを収集する。

提案手法の有効性については、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を行う。近年、モバイルシンクの例として巡回移動型のロボットの利用が注目されている [21]。巡回型ロボットは本来決められた仕事を行うために一定の広さの敷地内の巡回を行うもので、その例として、全自動掃除機ロボットや監視ロボット、レスキューロボットなどが挙げられる。例えばモバイルシンクとして全自動掃除機ロボットを想定する場合、ロボットが掃除を行うために室内を巡回する際



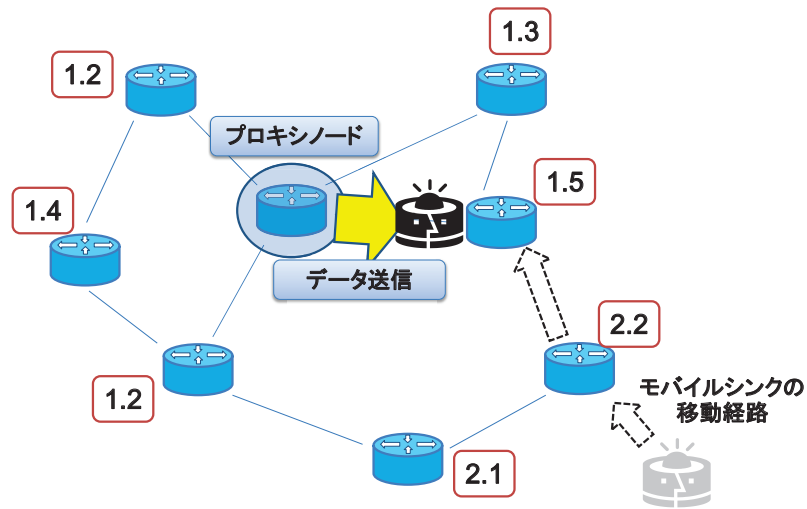


図 2: ポテンシャルモバイルシンクの移動経路

に、室内に設置されたセンサーネットワークから、室内の温度や湿度などの環境情報を収集するといったアプリケーションが考えられる。被災地におけるレスキューロボットでは、人感センサー以外にも、被災者が持つ端末からの信号をもとにして移動を行うアプリケーションが考えられる。本報告においても、このような巡回型ロボットのひとつとして全自動掃除機に提案手法を実装し、評価を行う。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るため、実装においては、巡回型ロボットを一時的にプロキシノードに誘導し、データの受信後は本来の巡回動作に戻す。

本報告は、以下のような構成となっている。初めに 2 章で関連研究について述べ、3 章では、本報告で提案する移動制御手法を説明する。4 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。5 章では、提案手法の実装方法について述べ、6 章で実機を用いた実験によって提案手法の動作の確認及び性能の評価を行う。最後に、7 章に本報告のまとめを述べる。

## 2 関連研究

本章では本報告で実装、評価を行う、ポテンシャル場を用いたモバイルシンクの移動制御と関連して、モバイルノードの移動制御手法、ポテンシャル場を用いた情報収集手法に関する近年の研究について述べる。

### 2.1 モバイルノードの移動制御手法

モバイルノードの移動制御を用いたセンサーネットワークに関する研究はこれまでに多くなされてきた。文献 [9] では、センサーネットワークにおいて、ネットワーク全体のエネルギー消費を抑えた上でデータ収集率の向上を実現するため、モバイルノードを含むセンサーネットワークアーキテクチャーを提案している。提案されているアーキテクチャーでは、ネットワークを構成するノードを、その役割と移動機能から、sensor node, collector, connector, locator, cluster head といった 5 つの異なるクラスに分類している。表 1 にそれぞれのクラスに分類されるノードの役割及び移動機能を示す。

この手法では connector が sensor node 間の接続状況に応じて移動を行うことで、ネットワークの連結性を保持する。また、ネットワークをクラスターと呼ばれる集合に分割し、それぞれのクラスターを代表する cluster head と呼ばれるいくつかのノードが、クラスター内の sensor node から一時的にデータを集める。各クラスター内では GPS 機能を所有する locator が移動を行っており、sensor node に cluster head 及び現在の locator の位置情報を伝えることで、sensor node がより近い cluster head にデータを集めることが可能となる。Collector が cluster head からデータを受け取り、基地局に収集データを転送することで、各 sensor node と cluster head の省電力化を図っている。収集データの転送と移動によって、大きなエネルギー消費が予想される collector には、基地局に向かい、定期的に充電を行う機能を備えている。

モバイルノードの中でも特にモバイルシンクの移動制御を行うことで、ネットワークの長寿命化を実現する研究も数多く存在する。文献 [10] では、controlled mobility を用いた、センサーノードから得られる残余電力情報を元に移動を制御する手法を提案している。モバイルシンクの移動先及び滞在時間を、混合整数線形計画問題 (MILP) で最適解を導出することで決定する MILP モデルを性能の上限として求め、近隣のセンサーノードの残余電力などの局所的な情報から移動を制御する Greedy Maximum Residual Energy (GMRE) を提案し、シミュレーションによる評価を行っている。提案手法では、ネットワーク内に格子状に  $q$  個のモバイルシンクの移動先候補地点を定め、移動先候補集合を  $S = \{1, \dots, q\}$  とする。 $N$  台のセンサーノードがネットワーク内の存在し、通信可能範囲にモバイルシンクが存在するノードに対して、一定時間ごとに観測しているデータをマルチホップで転送する。 $N = 20$ 、 $S = \{1, \dots, 16\}$  とした場合のセンサーネットワークの例を図 3 に示す。

MILP ではこのセンサーネットワークにおいて、モバイルシンクの一回の最大移動距離を  $d_{max}$ 、モバイルシンクの地点  $k$  ( $k \in S$ ) における滞在時間を  $t_k$ 、モバイルシンクの初期位置を  $a$  ( $a \in S$ )

表 1: 5 つに分類したノードクラスの機能一覧

クラス名	機能	移動機能
sensor node	データの計測	固定配置、もしくは僅かな範囲の自由移動
cluster head	収集データのバッファリング	固定配置
collector	cluster head からのデータの受け取り 収集データの基地局への転送	移動制御による移動
locator	GPS を用いた sensor nodes の位置決定	移動制御による移動
connector	ネットワークの連結性の保持	移動制御による移動

としたときの、 $\sum_{k \in S} t_k$  が最大となるモバイルシンクの移動経路グラフ  $D(S, d_{max})$  を整数線形計画問題として定式化し、解を導出する。MILP における制約条件として、各センサーノードのエネルギー消費量、ネットワークの接続性に関する条件が含まれており、モバイルシンクに到達しないデータは存在しないように定められている。

GMRE では MILP モデルと同様のセンサーネットワークにおいて、モバイルシンクは検知できる範囲内で残余電力が最大であるセンサーノードに向かって移動を行う。この処理を行うため、モバイルシンクはセンサーノードの残余電力を知る必要がある。この処理は主に 2 つのフェイズから構成される。

1. モバイルシンクは以下の手順に従い、移動先周辺のセンサーノードから残余電力情報を送信する sentinel node を決定する
  - (a) モバイルシンクは自身の位置をフラッティングによってセンサーノードに伝える
  - (b) フラッティングによって得た情報から、センサーノードはモバイルシンクの移動先が自身と近接する可能性があるかを判断する
  - (c) モバイルシンクの移動先と近接する可能性があるセンサーノードはモバイルシンクに対して sentinel node の候補であることを伝える
  - (d) sentinel node の候補となったセンサーノードの中からモバイルシンクは sentinel node を選出する
2. モバイルシンクは、sentinel node から得られた、sentinel node 周囲のセンサーノードの残余電力情報を参照し、最小の値を送信してきた sentinel node に向かう

上記のようにセンサーネットワークにおいてデータ収集にモバイルノード、及びモバイルシンクなどの移動端末を用い、それらの移動をネットワークの状況に応じて制御することで、エネルギー消費

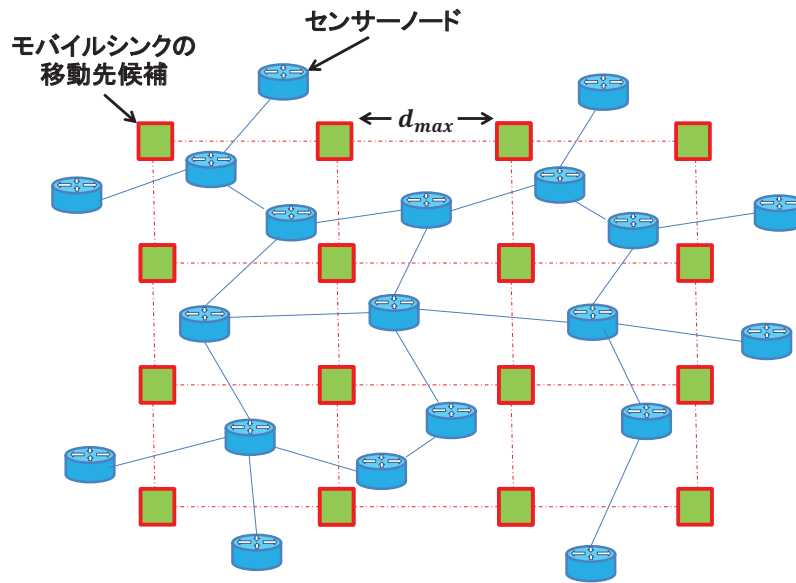


図 3:  $N = 20$ 、 $S = \{1, \dots, 16\}$  とした場合のセンサーネットワークの例

量を抑え、ネットワークの長寿命化を実現する研究は多くなされてきた。これに対して、移動端末の移動能力に言及した研究はあまりなされていない。文献 [11] ではこの点に着目し、移動端末の制御を、経路選択、速度制御、ジョブスケジューリングの三つの要素に分けて議論を行なっている。

## 2.2 ポテンシャル場を用いた情報収集手法

無線センサーネットワークにおいて、センサーノードが観測したデータをシンクノードに届ける際には、省電力の観点から、多くの場合は近接ノードを順次中継してシンクノードにデータを届ける。そのためのルーティング手法としてポテンシャル場の考え方をを用いた研究がなされている。このようなポテンシャルルーティングでは、各ノードはポテンシャルとよばれるスカラー値を持ち、その値に基づいて中継ノードを選択する。各ノードは自身および隣接ノードのポテンシャルや残余電力、シンクノードまでのホップ数などの局所情報を元にして自身のポテンシャルを決定する。このときシンクノードに近づくほどにポテンシャルが低くなるように各ノードが自身のポテンシャルを決定できれば、最もポテンシャルが低い、通信範囲内にあるノードを中継ノードとして選択することで、各ノードが順次中継を行い、シンクノードへとデータを届けることができる。

文献 [16] では、各センサーノードが、周辺ノードの残余電力の情報と、シンクノードがブロードキャストするネットワークの負荷を表す情報からポテンシャルを算出し、ルーティングを行う、Load Balanced and Lifetime Maximization Routing (BLM) を提案している。BLM では、各ノードのポテンシャルは以下に示す 2 種類のポテンシャル、Electric Potential、Gravitational Potential の和として定義されている。

- Electric Potential: センサーネットワークにおいてデータがシンクノードに集まる様子を正電荷の作る静電場における負電荷の動きとみなすと、各センサーノードが持つべきポテンシャルは静電場ポテンシャルと考えることができる。具体的には、シンクノードを負荷に応じて値の変わる正の電荷と考えることで、各センサーノードの Electric Potential はこの電荷に比例し、電荷からの距離（ホップ数）に反比例する式で与えられる。
- Gravitation Potential: 残余電力の多いセンサーノードほど中継先としては望ましく、中継先の望ましさを重力とみなしたのが Gravitation Potential である。具体的には、各センサーノードの Gravitation Potential は、自身の残余電力が少ないほど値が大きくなる式で与えられる。

また、観測したデータをシンクノードに届ける目的以外で、例えば、乗り物などの移動体の移動経路を決定するためにポテンシャル場を用いる研究もなされてきた。文献 [19] では、モバイルセンサーノードを想定したセンサーネットワークにおいて、観測領域内の各点でモバイルセンサーノードが他のモバイルセンサーノードを検出する可能性を示す指標として exposure を導入している。Exposure の値が最小となる経路を算出し、モバイルセンサーノードがその経路を移動することで互いの衝突を防ぐ手法を提案しており、経路の導出にポテンシャル場の考え方を用いている。

このように、ポテンシャル場を用いた情報収集方法に関する研究は様々に行われており、そのポテンシャルの算出方法は使用するメトリックやモデルに応じて異なっている。文献 [20] では、シンクノードのポテンシャルが無線センサネットワークに広がっていく様子を、熱源から熱量が伝わっていく様子に見立て、拡散方程式をポテンシャル場の構築に用いる Controlled Potential-Based Routing (CPBR) を提案している。本報告では、固定のセンサーノードから CPBR を用いて情報を収集するアプリケーションを想定し、CPBR において構築されるポテンシャル場を利用したモバイルシンクの移動制御手法を提案する。ただし、提案手法は CPBR に依存するものではなく、既存の様々なポテンシャルルーティング手法に対して適用することが可能である。CPBR の詳細については 3.1 節で述べる。

### 3 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、本報告で実装、評価を行うモバイルシンクの移動制御手法、及びポテンシャル場の構築手法について詳細を述べる。提案手法では、ネットワークを構成するセンサーノード同士が自己組織的にポテンシャル場を構築し、構築したポテンシャル場を用いてデータの収集を行うことを前提としている。ポテンシャル場の構築に関しては、文献 [20] で提案されている controlled potential-based routing (CPBR) を用いるが、CPBR は固定のシンクノードの存在を前提とした手法であるため、CPBR に対して自律的なプロキシノードの選出アルゴリズムを導入する。あらかじめ残余電力が最も多いセンサーノードをプロキシノードとして選出し、プロキシノードがネットワーク内で最小のポテンシャルの持つようにすることで、各センサーノードが観測した情報をプロキシノードに集める。モバイルシンクが通信範囲にまで近づいた際に、プロキシノードは集めたデータをモバイルシンクに送る。

提案手法においては、モバイルシンクのプロキシノード近隣までの移動を制御する。ポテンシャル場を用いた経路制御手法では、各センサーノードは定期的に隣接ノードに対してポテンシャル構築に必要な情報をブロードキャストする。1 章で説明したように、モバイルシンクは基本的にランダムあるいはパターンに従った移動を行なっていることとし、経路制御に用いられるポテンシャル場に近づきポテンシャルを受信した際には、より低いポテンシャルを持つノードを探し、そのノードの方向に向かう。ノードの方向を知るために、定期的にブロードキャストされる情報と受信信号強度 (RSSI) を利用し、その履歴から移動方向を決定する。特に指向性アンテナを利用することで移動の精度向上が図れるが、この点については 5 章での実機への実装において検討する。

#### 3.1 ポテンシャル場を用いた経路制御

本報告で提案する移動制御手法はポテンシャル場を用いた経路制御手法による観測情報の収集を行うセンサーネットワークを前提とする。ポテンシャル場を用いた経路制御手法として、文献 [20] で提案されている CPBR を用いるため、以下では CPBR について説明を行う。

##### 3.1.1 ポテンシャル場の構築

CPBR では、熱源から熱が拡散する様子を表現した偏微分方程式である拡散方程式を用いて、各センサーノードが自身のポテンシャルを計算する。センサーノード  $n$  に隣接するノード集合を  $Z(n)$  とするとき、時刻  $t$  でのノード  $n$  のポテンシャル  $\phi(n, t)$  は式 (1) で表される。

$$\phi(n, t+1) = \phi(n, t) + D(n) \sum_{k \in Z(n)} \{ \phi(k, t) - \phi(n, t) \} \quad (1)$$

表 2: 経路制御メッセージが含む情報

経路制御情報	概要
node_id	経路制御メッセージを送信したノードの ID
potential	経路制御メッセージを送信したノードの最新のポテンシャル
hop_number	プロキシノードまでのホップ数
net_id	経路制御メッセージを送信したノードが所属するネットワークの ID

このとき各ノードのポテンシャルは、自身の直前のポテンシャルと隣接するノードの最新のポテンシャルから計算される。 $D(n)$  は近隣のポテンシャルによる自身のポテンシャルの変動の大きさを変化させる拡散定数である。 $D(n)$  の値によってはポテンシャルが定まらない、あるいは振動する問題があるため、時間の経過とともにポテンシャルが収束するように、 $D(n)$  を  $\frac{\alpha}{|Z(n)|}$  に設定し  $0 < \alpha < 1$  と設定している。

また、任意の  $n, t$  に対して、 $\phi_{min} \leq \phi(n, t) \leq \phi_{max}$  であり、プロキシノードは自身のポテンシャルを  $\phi_{min}$  に固定することで、プロキシノードの位置が最小値をとるポテンシャル場が構築される。また CPBR では、ネットワーク全体のポテンシャルがプロキシノードのポテンシャルと同じ値に収束することを防ぐため、ネットワークの末端に存在するノードのポテンシャルを  $\phi_{max}$  とする境界条件 (2) を定義している。

$$\phi(n, t) = \phi_{max} \quad (n \in N_{edge}) \quad (2)$$

$N_{edge}$  はネットワークの境界ノード集合であり、その要素であるノード  $n$  は以下の条件を満たすものとして定義している。

$$H(n) \geq H(k) \quad (\forall k \in Z(n)) \quad (3)$$

$H(n)$  はノード  $n$  から最小ホップで到達可能なプロキシノードまでのホップ数である。上記の方法で構築したポテンシャル場を用いて、観測データのプロキシノードへの転送、及びモバイルシンクの移動制御のためのルーティングを行う。

### 3.1.2 経路制御メッセージの交換

3.1 節で説明したポテンシャル場の構築及び更新を行うため、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んだ経路制御メッセージを定期的に交換する。また、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。表 2 に経路制御メッセージに含まれる経路制御情報の一覧とその概要を示す。

### 3.2 モバイルシンクの移動制御手法の提案

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。一度モバイルシンクがプロキシノードの付近に到達し、プロキシノードから収集したデータを受け取った後は、モバイルシンクは観測したデータを基地局に届けるか、他のプロキシノードの場所に向かうため、現在のポテンシャル場から抜け出す必要がある。このような、ポテンシャル場を構成するセンサーノードが定期的にブロードキャストする経路制御情報を用いた、モバイルシンクの移動制御手法を本章では提案する。表 2 に示した経路制御メッセージに含まれる各情報の、移動制御における用途を以下に示す。

- node\_id

式 (1) によるポテンシャルの計算を行う際に必要となる、各隣接ノードのポテンシャルを記憶する際に用いている。移動制御においては、モバイルシンクが受信した経路制御メッセージの送信元であるノードを一時的に識別するために用いる。モバイルシンクは現在記憶しているポテンシャルよりも小さいポテンシャルを受信するごとに、そのポテンシャルの送信元の node\_id を記憶し、そのノードへの接近を試みる。

- potential

式 (1) によるポテンシャルの計算を行う際に必要となる、ポテンシャルの値である。移動制御においては、より小さいポテンシャルを持つノードに近づくように移動を行うため、この値を参照し、これまでに受信したポテンシャルよりも小さい値であれば記憶する。

- hop\_number

3.1 節のポテンシャル場の構築における境界条件に用いられる。移動制御においては用いていない。

- net\_id

センサーノードが所属するネットワークを識別する値であり、一般には複数のネットワークの混在時に用いられることが考えられる。移動制御においては、プロキシノードが収集したデータをモバイルシンクが受信し終えた後に、モバイルシンクをポテンシャル場から解放するために用いる。同じポテンシャル場を構成するセンサーノードは、共通する net\_id を保持しており、モバイルシンクが net\_id を見て、経路制御メッセージを無視するかどうかを判断する。

上記の経路制御メッセージを用いて、モバイルシンクの移動を制御する。しかしながら、ポテンシャル場を用いてモバイルシンクの移動制御を行う場合、モバイルシンクはポテンシャル場を構築するセンサーノードから受け取った経路制御メッセージに含まれる情報を参照するが、表 2 に含まれる情報のみでは、接近すべきセンサーノードが配置されている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) を複数回検



出し、それらの比較によって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。提案手法はアンテナに指向性が存在しない場合に有効となるが、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も可能である。移動制御アルゴリズムを以下に示す。

**Step. 1** センサーノードの通信可能範囲に到達した際、センサーノードから経路制御メッセージを受信すると、Step. 2 以降の制御を行う。

**Step. 2** 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、経路制御メッセージ内の potential を参照する。これまでに受信した potential の最小値 (potential\_min) と今回受信した potential を比較し、比較結果に応じて処理を行う。

1. potential\_min > potential の場合：potential と potential の送信元ノードの node\_id を記憶する。また、その時の経路制御メッセージの受信信号強度 (RSSI) を記憶する。その後、Step. 3 の処理を行う。
2. potential\_min < potential の場合：直進を続ける。
3. potential\_min = potential の場合：potential\_min の送信元 node\_id (node\_id\_min) と今回受信した node\_id とを比較し、比較結果に応じて処理を行う。
  - (a) node\_id\_min = node\_id の場合：今回受信したメッセージの RSSI が potential\_min 受信時の RSSI よりも大きければ直進を続ける。そうでない場合、Step 3. の処理を行う。
  - (b) node\_id\_min ≠ node\_id の場合：直進を続ける。

**Step. 3** 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。

**Step. 4** プロキシ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、モバイルシンクはプロキシノードからデータを受け取り、通常の移動アルゴリズムに戻る

上記アルゴリズムでは、以下の仮定をおいている。

- アンテナに指向性はなく、どの方向から信号が送られてきた場合でも RSSI が一定である
- 受信信号強度は信号の発信元から単調に減少する
- センサーノードとモバイルシンクの通信可能距離は同一である
- 全てのセンサーノードはプロキシノードへのデータの到達性が保証されている

これらの仮定により、提案手法によってモバイルシンクがメッセージを定期的に送信するセンサーノードに近づくことが可能となる。また、あるセンサーノードに近づいた際には、そのノードがプロキシノードではない場合には、通信範囲内にポテンシャルのより小さいノードが存在し、これを繰り返すことで、モバイルシンクはプロキシノードに近づくことが可能である。次章では、提案手法によってモバイルシンクがプロキシノードに近づくように移動を制御できていることを、計算機シミュレーションを用いて検証する。

## 4 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。ネットワークモデルとして  $120\text{ m} \times 80\text{ m}$  の観測領域にセンサーノードを 7 個、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 個はプロキシノードとして動作する。完全にランダムなトポロジーではノードの分布に偏りが生じ、接続性が保証されないため、以下に示す方法で準ランダムなトポロジーを生成し、シミュレーションに使用した。7 個のセンサーノードをそれぞれ  $node_i$  ( $0 \leq i \leq 6$ ) と識別しており、通信可能範囲を  $r$  とする。

1. 観測領域内のランダムな位置に  $node_0$  を配置する。
2.  $node_i$  ( $1 \leq i \leq 6$ ) を以下の方法で順次配置する。
  - (a)  $node_{i-1}$  の位置を中心とする、半径  $\frac{3r}{4}$  の円と半径  $r$  の円の二つの円に囲まれる領域内のランダムな位置に  $node_i$  を配置する。
  - (b)  $node_i$  の位置が観測領域の外側となる場合は、観測領域内になるまで上記の方法で配置をやり直す。
3. すべてのセンサーノードを配置したあとに、7 個のセンサーノードの中からプロキシノードをランダムに 1 個選択する。
4. 観測領域内のランダムな位置にモバイルシンクを配置する。

このようにセンサーノードを配置する領域を制限することによって、接続性を保ったランダムトポロジーを生成することができる。

シミュレーションは、OMNeT++ 4.1 [22] シミュレータを使用し、提案手法を記述したシミュレーションプログラムによって行った。評価指標としてモバイルシンクがプロキシノードと通信を終えるまでの到達時間を用いている。モバイルシンクは、初めにセンサーノードからパケットを受信するまではランダムウェイポイントモデル [23] に従って移動し、センサーノードから経路制御メッセージを受信した場合には 3 章に示した方法で移動制御を行う。モバイルシンクが直進している際に観測領域の境界線に衝突した場合には、反射するように移動方向を変更して直進し、回転している際に観測領域の境界線に衝突した場合にはそのときの回転方向とは逆方向に回転する。シミュレーションの設定値は表 3 の通りである。

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プロキシ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、5 通りのトポロジーに対して、それぞれモバイルシンクの初期位置は同一にして 10 回ずつ行った。信頼区間を 95% とした場合のシミュレーション結果を表 4 にまとめる。

表 3: シミュレーションの設定値

パラメータ名	値
経路制御メッセージ送信周期	1 s
通信可能範囲	50 m
データパケットサイズ	128 byte
無線速度	250 kbps
モバイルシンクの直進運動時の移動速度	1 m/s
モバイルシンクの円運動時の角速度	$\frac{\pi}{6}$ rad/s

表 4: 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

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いため、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移動制御を用いる場合よりも大きく、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すると考えることができる。一方移動制御手法を用いる場合では、信頼区間は小さいものの、平均到達時間に対する信頼区間の比は大きい。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が行われる回数が、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。

## 5 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、本報告で提案する、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。以降では、システムの概要、機器構成、開発環境、実装方法を説明する。

### 5.1 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プロキシノードとして振る舞うセンサーノードに集め、モバイルシンクがプロキシノードの通信範囲にまで移動を行うことで、プロキシノードに集まったデータを収集する。

システムとしては、観測データの収集とモバイルシンクの移動制御は独立しており、観測データの収集システムには、文献 [20] で提案されている CPBR を用いて、室内の温度情報を集める。また、モバイルシンクの移動制御においては、モバイルシンクとして巡回移動型のロボットを利用する。巡回型ロボットは本来与えられた仕事を行うために一定の広さの領域内の巡回を行うもので、本報告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、実装においては、掃除中の巡回型ロボットを一時的にプロキシノードに誘導し、データの受信後は本来の巡回動作に戻す。

### 5.2 システムの機器構成

#### 巡回型ロボット

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 (図 4)。ルンバは身近に使用されている巡回型掃除ロボットであり、そ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、本報告で用いている [24]。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ことができる。

ルンバはセンサーによって収集した付近の障害物情報をもとに、数十種類の移動パターンから最適なものを選び出す。ロボットのこのような移動方法はパターン型と呼ばれる。巡回型ロボットの移動方法としては、パターン型の他に、東芝社のスマーボや LG 電子社のホームボットのように、天井や地面や障害物を高速撮影することで部屋の広さや構造を把握して効率的な経路を導出するマッピング型も存在する。パターン型のロボットはマッピング型のロボットに比べると、巡回効率の面では劣ると考えられるが、巡回領域内の環境変化、例えば障害物の位置の変化に対する適応性は高い。特に、設備の位置が頻繁に変わる環境や、マッピングの難しい見通しの悪い環境、広大な観測領域では、マッピングによって効率的な経路を導出することが困難な場合が考えられ、パターン型が適している。



図 4: Roomba 790

#### 無線センサーノード

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 (図 5)。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。また、C# や Java などのプログラミング言語によるコーディングが可能である。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 (以下情報観測用 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 (以下基地局用 IRIS) の 2 種類の機能を持つ IRIS の実装を行う。情報観測用 IRIS には、周囲の環境情報を収集するセンサーとして Crossbow Technology 社の MTS310 を備え付ける。MTS310 には 2 軸加速度センサー、2 軸磁気センサー、光・温度・音センサー、などのセンサーが付いている。

#### 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



図 5: IRIS Mote XM2110

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(図 6)。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。

### 5.3 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

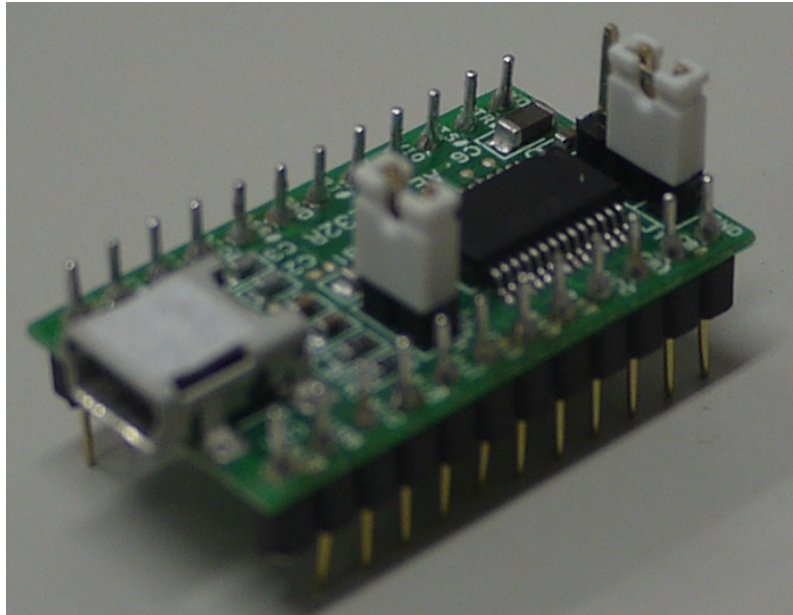


図 6: FT232RL

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。

#### 5.4 環境情報収集のための経路制御手法の実装方法

まず初めに、文献 [20] で提案されている CPBR の実装について述べる。温度情報については、前述の MTS310 を用いて取得することが可能であるが、ここでは、2 バイトのダミーデータを発生させて、情報の収集が正しく行えていることを確認する。

##### 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。本報告においては、すべてのセンサーノードは 2.5 秒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関して、表 5 に示す。

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、マルチホップでの情報収集の検証を行うために、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。送信電力と Power Register の値の関係については図 7 に示す通りである。本実験では Power Register の値を 15 に設定することで、非常に小さな電力消費で各ノードは通信を行なっている。



表 5: 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
hop_number	nx_uint8_t	1 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

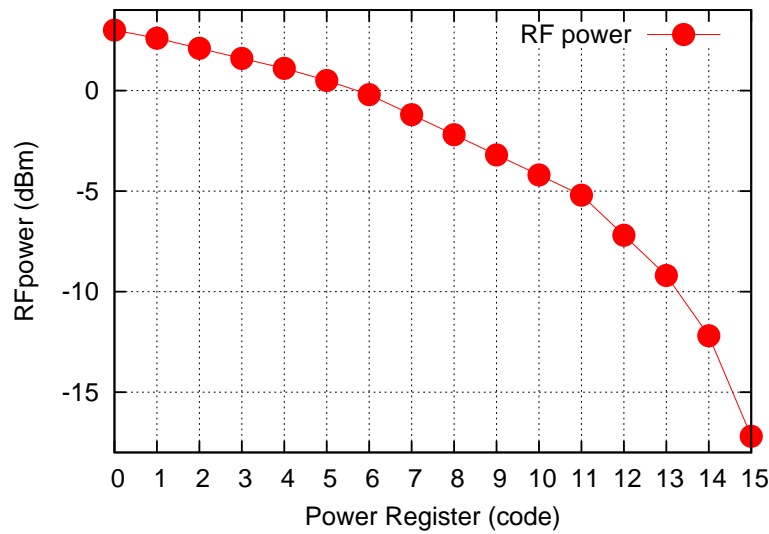


図 7: IRIS 上での送信電力設定

#### ポテンシャルの計算

ポテンシャルの計算は、経路制御メッセージを受信することに行う。本報告においては、802.15.4 ノンビーコンモードを用いているため、各ノードは常時メッセージの送受信が可能である。そのため、文献 [20] にあるような、定期的なポテンシャル情報の収集のための手続きや、一定時間ごとのポテンシャルの更新といった処理は行わないでよい。

ポテンシャルの計算を行うためには、自身の隣接ノードとそのノードのポテンシャルの対応を各センサーノードが知る必要がある。そのために、各センサーノードはテーブルを用いて隣接ノードのポテンシャル情報を管理する。このテーブルには、経路制御メッセージの受信の際に、その送信元ノードがテーブルに存在しない場合は、送信元ノードの node\_id とポテンシャルを追加する。一定時間経路制御メッセージが届かないノードの情報を記憶しておくことは、経路の変動への対応性を損なうことになるため、本報告においてはタイマーと初期値 0 のカウンターを用いることでこれを解決して

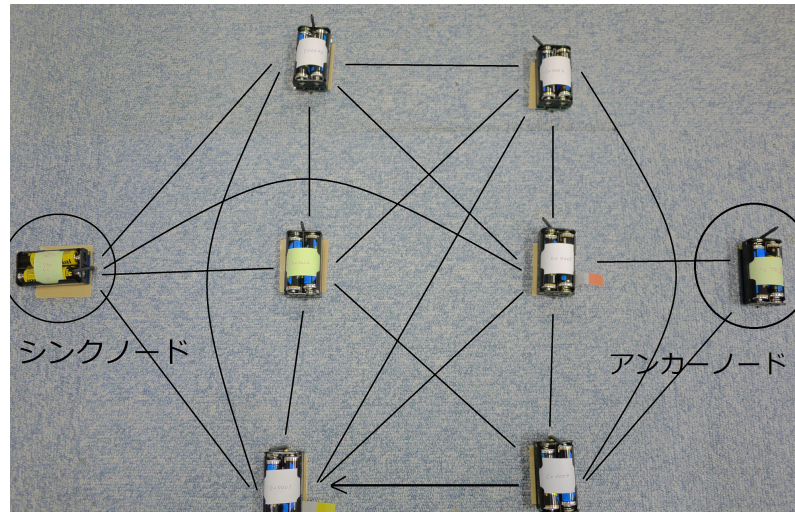


図 8: 実験環境におけるネットワークポロジ

いる。具体的には、経路制御メッセージが届くごとに、その送信元ノードに対応するカウンターをインクリメントすることとし、25 秒ごとにカウンターを調べ、カウンターが 0 のノードをテーブルから除外する。その後、カウンターを初期化する。

#### データの発生及び中継

データの発生に関しても、タイマーを用いた実装を行なっている。前回のデータ発生から、5 秒～15 秒の一樣ランダムな時間の経過後に、2 バイトのダミーデータを発生させ、ダミーデータを埋め込んだデータパケットを作成し、シンクノードに向けて送信する。

本実装においては、データの送信時には、前述したポテンシャル計算用のテーブルから、最もポテンシャルの高いノードを探し、そのノードを宛先として送信を行う。データを受信したセンサーノードは、自身がシンクノードであればそのままデータを保管し、そうでない場合には、自身のポテンシャルテーブルから、最もポテンシャルの高いノードを探し、即座にそのノードに対してデータを送る。シンクノードのポテンシャルを  $0xFFFF$  と設定し、上記のように中継を行うことで、各センサーノードはシンクノードにデータパケットを届ける。

#### 情報収集実験

センサーノード 8 台を図 8 のように配置し、情報収集の実験を行った。図における黒い線分は、2 ノード間が双方向に通信可能であることを意味しており、矢印に関しては片方向にのみ通信が可能であることを示している。図 8 において、アンカーノードとはネットワークの境界に設定したノードであり、ポテンシャルを  $0x0000$  に設定している。また、シンクノードのポテンシャルに関しては、

表 6: 情報収集実験の結果

実験結果	
総データパケット数	1427
シンクノードの受信パケット数	1414
到達率	99.1%

0xFFFF に設定しており、最大値をとるように本実験では実装した。そのため、各センサーノードは、最も大きいポテンシャルを持つ隣接ノードを探し、そのノードに対してデータを送っている。また、通信距離を抑えるために、RSSI に閾値を設定し、メッセージの RSSI が閾値以下の場合には、意図的にそのメッセージを破棄している。このようにすることで、擬似的にマルチホップの通信実験を行った。

実験時間は 2000 秒としており、各ノードからは平均的に 200 個のデータが発生する。本実験では 802.15.4 のノンビーコンモードを用いているため、観測データが発生した直後に、データの送信が可能である。そのため、データの到達遅延についてここでは評価を行わない。評価指標は、各センサーノードが送信したデータ個数の総和の内、シンクノードまで到達したデータ個数の割合である、データの到達率とする。

実験結果は、表 6 に示す通りであり、99.1% と高い収集率を示している。パケットロスの理由は、データ送信のタイミングで、RSSI が閾値以下となっていることであり、上位層での再送、信頼性の高い階層プロトコルなどの利用により改善は可能である。以降では情報収集は完了したものとして、モバイルシンクの移動制御について独立に実装、実験を行う。

## 5.5 モバイルシンク移動制御手法実装方法

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 7 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。

表 7: ルンバの移動制御のフェイズ一覧

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情報観測用 IRIS の発見
APPROACH_IRIS	記憶している ID を保持する情報観測用 IRIS への接近
REACH_PROXY	プロキシノードとして振る舞う情報観測用 IRIS への到達
CLEAN	移動制御を行わない

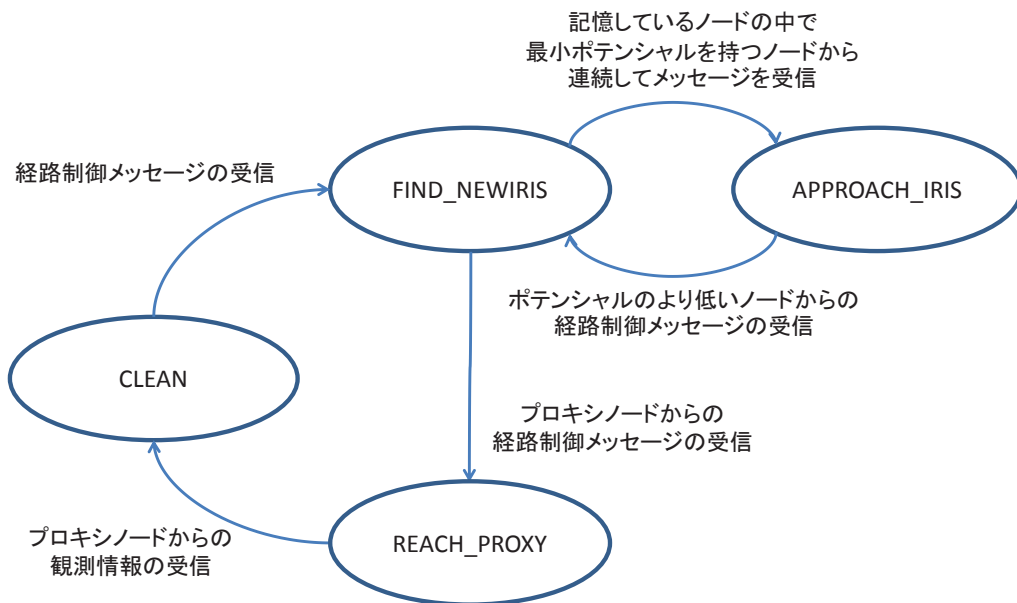


図 9: ルンバの移動制御フェイズの遷移図

### 5.5.1 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 9 に、処理の流れを表した状態遷移図を示す。

図 9 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

プロキシノードから経路制御メッセージを受信した場合は、プロキシ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 を伝えると共に、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

到達したプロキシ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。

## 5.5.2 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

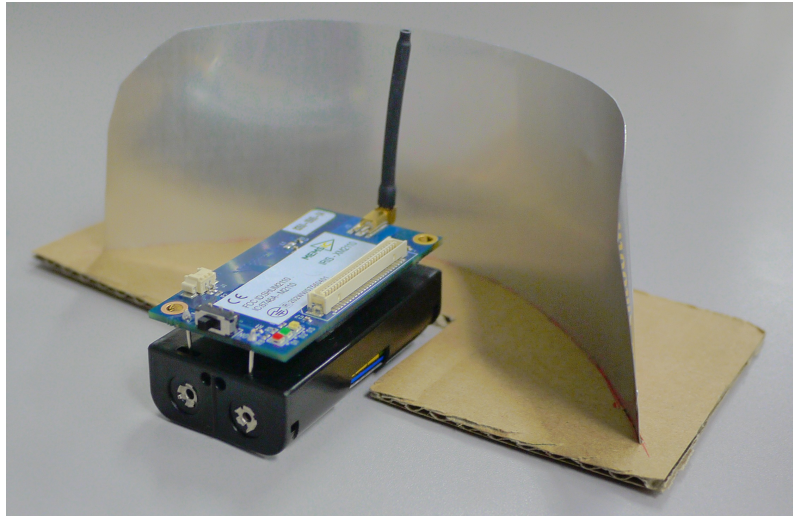


図 10: 擬似指向性アンテナ

後、RSSI が増加する限り直進を行う。3 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 10 に示すようにアンテナの背面にアルミ製の反射板を備え付けることで、アンテナに擬似的な指向性をもたせている。以下に、進行方向探索の手順を述べる。

1. 自転行動を行いながら、受信する RSSI の中で最大値を示す方向を記憶する（図 11）。最大値を示す方向が複数ある場合はそれらの方向を合成した方向を記憶する（図 12）。
2. ルンバが 360° 自転した場合、1 で記憶した方向と ルンバの移動方向を合わせる。
3. ルンバに直進のコマンドを入力する。直進の間、受信した RSSI が減少傾向にある場合、1 の処理に戻る。

これらの手順で必要な処理について以下で詳しく述べる。

#### RSSI が最大を示す方向の探索

実験に用いる情報収集用 IRIS は 1 秒毎にポテンシャルを送信するように設定し、ルンバは角速度 25.7 mm/s で自転を行う。このとき、ルンバは一周の時点の間に 14 方向の RSSI を取得する。また、ルンバが自転行動を開始した時点でのルンバの進行方向を 0 とした 14 方向を示すパラメータ `RoombaDirection` (0..13) を、基地局用 IRIS がポテンシャルを受信する度に 1 ずつインクリメントし、受信したメッセージの RSSI が最大であった `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 `TopRoombaDireciton` である、TRD 1、TRD

2 の中点を改めて TopRoombaDireciton とする。但し、TDR2 と TDR1 の差が 7 以上である場合は '(TDR1 + 15) mod 14' と TDR2 の中点を TopRoombaDirection とする。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 秒が経過した場合に処理を終了する。実環境では基地局用 IRIS が毎秒毎に必ずポテンシャルを受信するという保証はないため、14 回の RSSI のサンプリングの終了とルンバの 360° 自転のタイミングが同期するとは限らない。したがって、1 秒毎のタイマーを組み合わせることで、ポテンシャルを受信しなかった方向の RSSI の値は 0 と設定し、処理終了の判定をポテンシャルの受信回数に依存しない方法で行っている。

#### ルンバの移動方向の調整

‘RSSI が最大を示す方向の探索’の終了時に TopRoombaDirection と現在の RoombaDirection の差分だけルンバの移動方向を調整する。具体的には、TopRoombaDireciton が 7 以上である場合は (14 - TopRoombaDireciton) 秒間時計回りに自転を行い、6 以下の場合は TopRoombaDireciton 秒間反時計回りに自転を行う。

#### RSSI の増減傾向の算出

受信したメッセージの RSSI の増減傾向は 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 と比較して判断する。式 (4) に EMA の導出方法を示す。ただし、 $E_n$  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係数とする。

$$E_n = (1 - \alpha) \cdot E_{n-1} + \alpha \cdot R_n \quad (4)$$

本実験では  $\alpha = 0.2$  とし、RSSI のサンプリングを 5 回行うたびに、 $E_n$  と  $E_{n-5}$  の値を比較し、 $E_n$  の方が大きい場合は減少傾向、 $E_{n-5}$  の方が大きい場合は増加傾向と判断する。また、 $E_0 = R_1$  とする。図 13 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 フェイズ

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

#### CLEAN フェイズ

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。

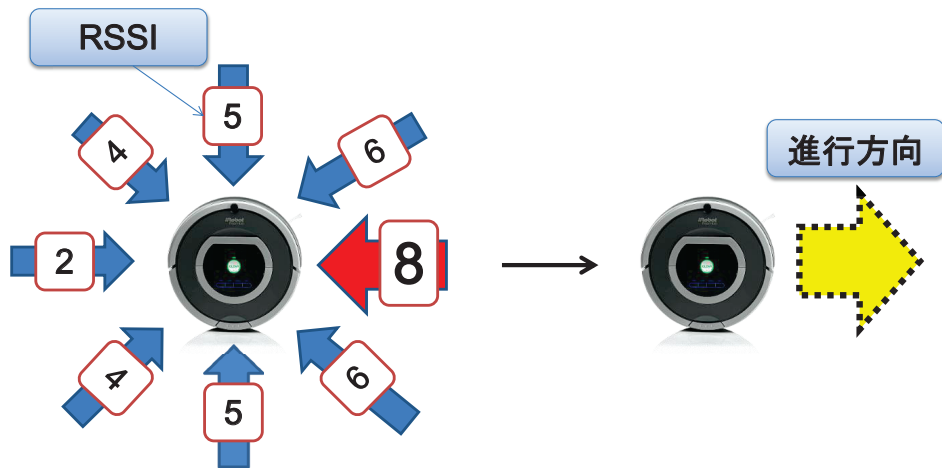


図 11: ルンバの自転時における各方向での RSSI のサンプリング

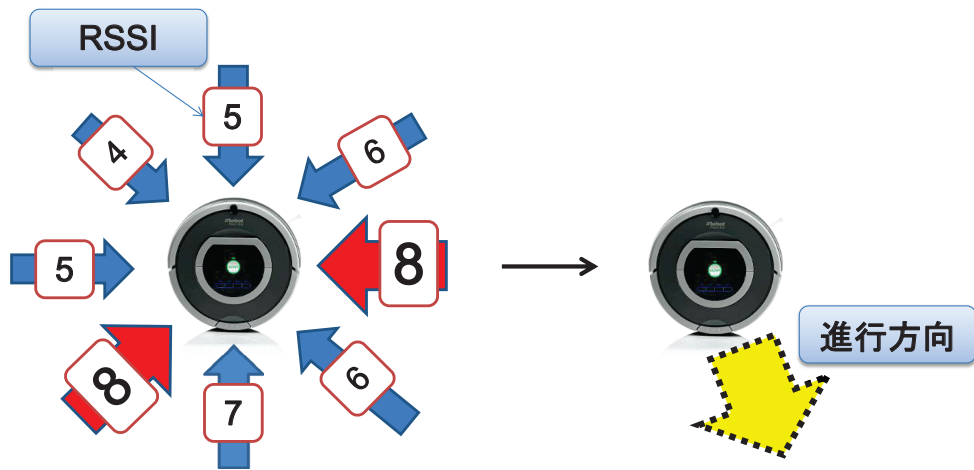


図 12: RSSI が最大値を示す方向が複数ある場合の方向の合成



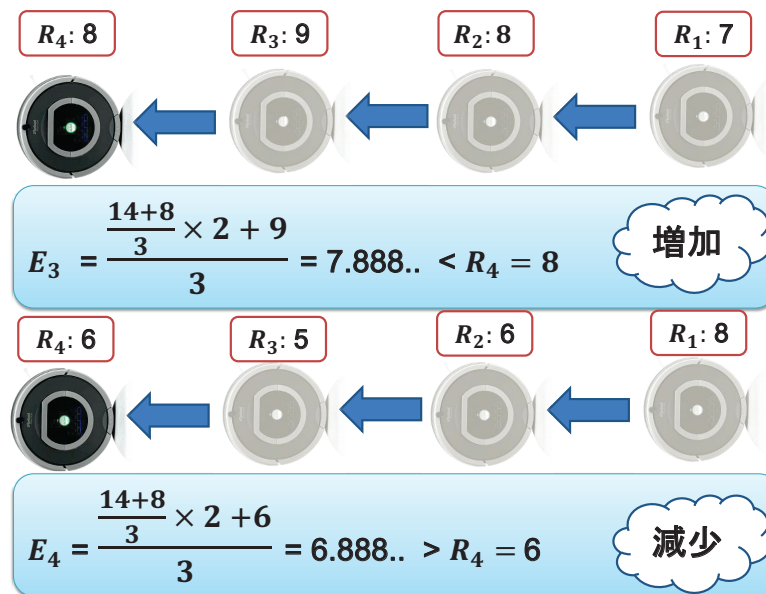


図 13: ルンバの直進時における増加傾向を示す場合と減少傾向を示す場合の RSSI のサンプリング例

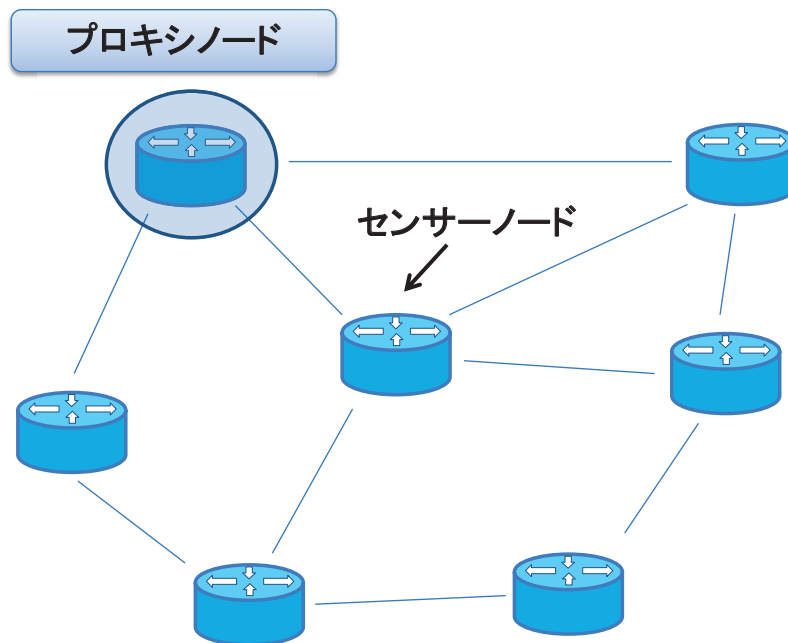


図 14: プロキシノードが観測領域の境界付近にある場合

## 6 実機を用いた評価実験

本章では 5 章で実装方法を示したポテンシャル場を用いたモバイルシンクの移動制御が正しく行っていることを示すため、モバイルシンクが移動を開始してからプロキシ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、非同期の常時通信が可能としている。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。

### 6.1 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、プロキシノードに選ばれるノードは固定とする。図 14 に示すように、観測領域の周辺上の点にプロキシノードが位置するように配置する。ルンバを特定の位置から起動し、モバイルシンクがプロキシ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。



図 15: 実験の様子

## 6.2 実験環境

大阪大学情報科学研究科 A607A 棟 6 階オープンラボに 3 台の IRIS を室内に配置し実験を行う。部屋の広さは  $12\text{ m} \times 8\text{ m}$  であり、図 15 に示すように、ルンバの移動を阻害しない程度に障害物を撤去する。センサーノードが利用する無線ネットワークのチャンネルは、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ンネル 26 (2480MHz) を用いることとした。

### 機器構成

実験を行う際に、使用機器同士を接続する必要がある。図 16 に使用機器の構成を示す。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。移動制御用ノートパソコンが送信したコマンドは FT232RL によってシリアル変換され、ルンバに送られる。

### 実験の実施方法

実験は、6.2 節で述べたように機器同士を接続し、実験を行う室内に 3 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用プログラムを起動することで実験を開始する。図 17 に処理の流れを示す。

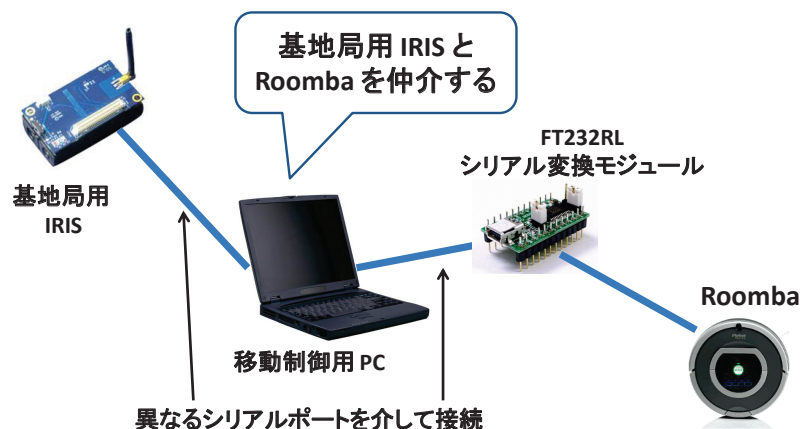


図 16: 使用機器の構成

### 評価指標

実験の開始位置から起動したルンバがプロキシ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、図 14 のようにシンクノードを境界付近に配置した場合のネットワーク数種類で実験を行い、ルンバのモビリティを制御することによってネットワークのトポロジーに依存せず、プロキシノードに到達できることを示す。到達とは、基地局用 IRIS がプロキシ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。

ここでルンバ独自の移動アルゴリズムは、図 18 に示すように、起動時に渦巻き状に移動を行い、センサーによって壁や障害物を検知し、壁沿いに移動を行い掃除を行う。壁沿いの移動後は、進行方向の障害物に接触した場合、ランダムな角度だけ回転し、直進を行うことを繰り返す。その後、壁の位置や障害物の位置を学習していき、より良い行動パターンを学習しながら選択する。行動パターンの例としては、ゴミが多いと判断した場所では重点的に掃除行動を行う、狭い場所を必要以上に走行しない、容易に抜け出せない場所と判断した場合後退して脱出する、などがあげられる。

### 6.3 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プロキシ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 8 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。移動制御を用いない場合は、そもそもプロキシノードに到達することなく、制御を用いることでプロキシノードへの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、プロキシ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、



図 17: 処理の流れ

表 8: 移動制御実験の結果

	到達時間
移動制御を用いる場合	371.12±93.3 s
移動制御を用いない場合	計測時間内に到達しない

到達の判定がなされるには、プロキシノードに非常に近い範囲で基地局用 IRIS がプロキシ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、ルンバは計測時間内にプロキシノードに到達することができなかった。

提案方式の実用を考える場合、プロキシ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できると考えられる。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り、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、プロキシ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

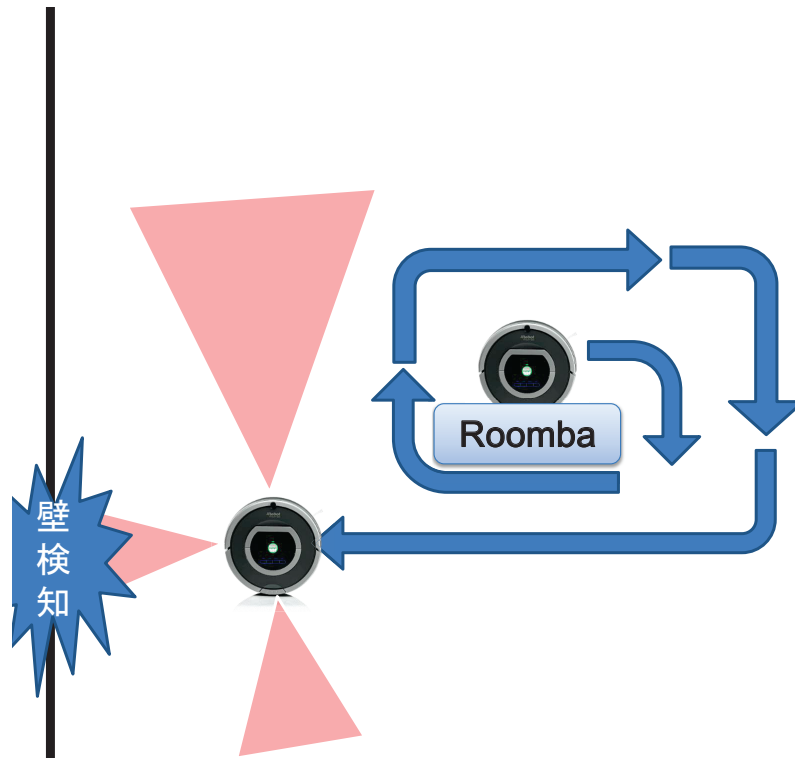


図 18: ルンバの移動アルゴリズム

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。

## 7 終わりに

本報告では、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プロキシ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。さらに、シミュレーションにより有効性を示した手法を実機に実装し、その動作を確認した。

第一に、ポテンシャル場を用いた経路制御手法をセンサーノードに実装し、情報の収集が正しく行えていることを示した。そして、経路制御のためのポテンシャル場を利用したモバイルシンクの移動制御手法を実機上で実現するために、実環境の無線品質の変動を考慮した移動制御アルゴリズムを提案し、実装した。実機実験の結果、ポテンシャル場を用いてモバイルシンクの移動制御を行えることが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プロキシノードを動的に変更することによる省電力化や、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。

## 謝辞

本報告を終えるにあたり、御指導、御教授をいただきました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に深く感謝いたします。また、平素から適切なお助言をいただいた大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一准教授、大下裕一助教に厚く御礼申し上げます。最後に、日頃から本報告の作成にあたり様々な質問に答えていただき、また実験に協力していただきました村田研究室の皆様方にも御礼申し上げます。



## 参考文献

- [1] H. Karl and A. Willing, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, Oct. 2007.
- [2] M. Di Francesco, S. Das, and G. Anastasi, “Data collection in wireless sensor networks with mobile elements: a survey,” *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 8, pp. 1–34, Sept. 2011.
- [3] J. Luo and J. Hubaux, “Joint sink mobility and routing to maximize the lifetime of wireless sensor networks: the case of constrained mobility,” *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 18, pp. 871–884, Feb. 2010.
- [4] I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, and S. Nikolettseas, “Sink mobility protocols for data collection in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access (MOBIWAC)*, pp. 52–59, Oct. 2006.
- [5] Z. Wang, S. Basagni, E. Melachrinoudis, and C. Petrioli, “Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime,” in *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp. 287–295, Jan. 2005.
- [6] A. Kansal, M. Rahimi, D. Estrin, W. Kaiser, G. Pottie, and M. Srivastava, “Controlled mobility for sustainable wireless sensor networks,” in *Proceedings of the First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pp. 1–6, Oct. 2004.
- [7] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura, “Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network,” in *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, pp. 1407–1418, Mar. 2005.
- [8] A. Somasundara, A. Kansal, D. Jea, D. Estrin, and M. Srivastava, “Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC)*, vol. 5, pp. 958–973, Aug. 2006.
- [9] Y. Tirta, B. Lau, N. Malhotra, S. Bagchi, Z. Li, and Y. Lu, “Controlled mobility for efficient data gathering in sensor networks with passively mobile nodes,” in *Sensor Network Operations*, pp. 92–113, Wiley-IEEE Press, Apr. 2006.

- [10] S. Basagni, A. Carosi, E. Melachrinoudis, C. Petrioli, and Z. Wang, “Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime,” *Wireless Networks*, vol. 14, pp. 831–858, Dec. 2008.
- [11] R. Sugihara and R. Gupta, “Improving the data delivery latency in sensor networks with controlled mobility,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pp. 386–399, June 2008.
- [12] R. Sugihara and R. Gupta, “Optimizing energy-latency trade-off in sensor networks with controlled mobility,” in *Proceedings of the 28th Annual Joint Conference on the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, pp. 2566–2570, Apr. 2009.
- [13] 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, pp. 1261–1273, Dec. 2012.
- [14] R. Falcon, H. Liu, A. Nayak, and I. Stojmenovic, “Controlled straight mobility and energy-aware routing in robotic wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2012 IEEE 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pp. 150–157, May 2012.
- [15] Y. Liu and W. Seah, “A scalable priority-based multi-path routing protocol for wireless sensor networks,” *International Journal of Wireless Information Networks (IJWIN)*, vol. 12, pp. 23–33, Jan. 2005.
- [16] C. Wu, R. Yuan, and H. Zhou, “A novel load balanced and lifetime maximization routing protocol in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 67th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, pp. 113–117, May 2008.
- [17] S. Jung, M. Kserawi, D. Lee, and J. Rhee, “Distributed potential field based routing and autonomous load balancing for wireless mesh networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 13, pp. 429–431, June 2009.
- [18] Y. Xu, F. Ren, T. He, C. Lin, and S. Das, “Building a potential field to provide real-time transmission in wireless sensor network,” in *Proceedings of the 13th ACM International Conference on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM)*, pp. 403–410, Oct. 2010.
- [19] S. Ferrari and G. Foderaro, “A potential field approach to finding minimum-exposure paths in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 335–341, May 2010.

- [20] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, and T. Hatauchi, “Controlled potential-based routing for large-scale wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 14th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pp. 187–196, Oct. 2011.
- [21] S. Tang, J. Yuan, X. Li, Y. Liu, G. Chen, M. Gu, J. Zhao, and G. Dai, “Dawn: energy efficient data aggregation in wsn with mobile sinks,” in *Proceedings of the 18th International Workshop on Quality of Service (IWQoS)*, pp. 1–9, June 2010.
- [22] A. Varga, “Omnet++,” in *Modeling and Tools for Network Simulation*, pp. 35–59, Springer, 2010.
- [23] 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, pp. 257–269, July 2003.
- [24] “iRobot Roomba<sup>®</sup> 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).