

## 移動中継ノード群による高接続センサネットワーク構築手法

東京電機大学大学院 理工学研究科 情報システム工学専攻  
砂川 敦志 桧垣 博章  
E-mail: {sunagawa, hig}@higlab.net

無線通信機能を備えたセンサノードの取得するセンサデータをシンクノードへ無線マルチホップ配送するセンサネットワークの構築を行なう手法として散布によるものがある。本論文では、散布されたセンサノードとシンクノードの接続を低コストで行なう方法として、移動中継ノードを導入する手法を提案する。散布された移動中継ノードの初期配置位置と既設センサネットワークの余剰移動中継ノードの位置とを管理サーバに集約することで、短距離の接続を少ない移動で実現する。

## Sensor Network Configuration with Mobile Forwarding Nodes for High Connectivity

Atsushi Sunagawa and Hiroaki Higaki  
Department of Computers and Systems Engineering  
Tokyo Denki University  
E-mail: {sunagawa, hig}@higlab.net

Diffusion of sensor nodes are widely available for configuration of wireless sensor networks for forwarding sensor data achieved by sensor nodes to a sink node. This paper proposed a method for connection between a newly diffused set of sensor nodes and the sink node by using mobile forwarding nodes diffused with the sensor nodes. Location information of diffused mobile forwarding nodes and available ones whose location have not been fixed for connection of set of sensor nodes is stored in a management server and mobility strategy is induced for shorter connection with fewer nodes and less mobility for keeping battery consumption lower.

## 1 はじめに

環境測定のためのセンサと無線通信デバイスとを備えた無線センサノードを無線マルチホップ通信によりセンサデータ配送を可能としたセンサネットワークの研究開発が広く行なわれている。広域の環境モニタリング等に活用されるセンサネットワークを構築するためには、そのコスト削減の観点から散布によるセンサノードの配置が行なわれる。この場合、個々のセンサノードの位置は、配置された可能性のある領域として把握できるものの、位置を知ることが困難である。センサノードで生成されたセンサデータは、固定設置されたシンクノードへと配送される。そのため、散布されたセンサノードとシンクノードがマルチホップ通信可能とならなければならない。本論文では、移動能力と通信能力を備えた移動中継ノードをセンサノードとともに散布し、移動中継ノードがセンサノードとシンクノードを接続する位置へ移動することで、センサネットワークを構築する手法を提案する。

## 2 センサノード配置問題

センサネットワークを構築するためには、測定対象領域を複数のセンサノードの測定可能領域が被覆するようにセンサノードを配置し、各センサノードが取得するセンサデータをシンクノードへ無線マルチホップ配送可能としないといけない。論文 [1] で指摘されているように、各々のセンサノードの位置を決定し、それにしたがって配置するコストは大きいので、十分な数のセンサノードを散布等の方法で配置することが検討されている。各センサノードが取得したセンサデータは、シンクノードへと配送されるため、センサノードからシンクノードまで無線マルチホップ配送可能でなければならない。一般に、センサノードの測定可能領域は、図 1 に示すように自身の無線信号到達領域に包含されるため、測定対象領域を測定可能領域が被覆するように配置されたセンサノード群は、互いに無線マルチホップ通信可能となる。したがって、測定対象領域にシンクノードが含まれる場合には、配置されたセンサノードからシンクノードへ無線マルチホップ通信が可能となる。

ところが、複数の測定対象領域が図 2 のように離散的に分布する場合、センサノードの配置を散布によって行なうならば、測定対象領域を被覆することに加えて、この領域を被覆するセンサノード群がシンクノードと無線マルチホップ配送可能となるように、センサノードを散布配置しなければならない。散布による配置は、センサノード位置に不確定要素を含めることから、無線マル

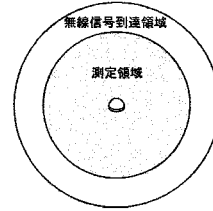


図 1: センサノードの測定領域と無線信号到達領域

チホップ配送経路を確実に構成するためには、高密度に散布することが必要となり、総散布数は必要数を大きく上回ることが考えられ、センサネットワークの構築コストを上昇させることになる (図 3)。

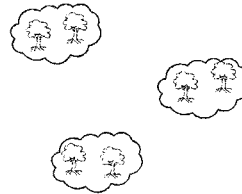


図 2: 離散的に分布する測定対象領域

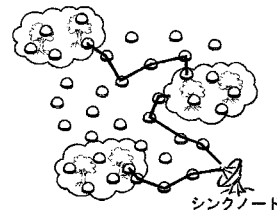


図 3: 離散分布する測定対象領域とシンクノードとの接続の散布による実現

論文 [2] では、すべてのセンサノードが自律移動可能であることを前提に、これらをランダムウォークさせることによって、センサデータをマルチホップ配送する手法を提案している。しかし、本手法では、センサデータがシンクノードに到達することを保証しておらず、すべてのセンサノードが自律移動可能であることが前提であるため、構築コストが大きい。また、ランダムウォークを用いているため、測定対象領域をセンサノードの測定領域が被覆することを保証することもできない。一方、論文 [3] では、図 4 のように複数の移動コンピュータ群からなるアドホックネットワークが離散的に分布するとき、異なる群に属する移動コンピュータ間の通信 (情報共有) を移動ロボットによって実現する方法が提案され

ている。この方法を、各測定対象領域で取得されたセンサデータをシンクノードへ配送することに適用することを考えると、各測定対象領域を無線マルチホップ配送でシンクノードと通信可能とすることだけを目的として測定対象領域ではない領域に接続性を確保するための高密度なセンサノード散布を行なうことのコストを回避することができる点で優れているといえる。しかし、センサデータの配送をロボットの移動で実現する手法には、ロボットの移動に必要な電力を継続的に供給しなければならないという欠点がある。

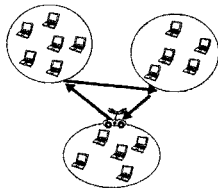


図 4: 移動ロボットを用いた通信

### 3 提案手法

#### 3.1 前提条件

本論文では、センサネットワークは、センサノード、移動中継ノード、シンクノードからなるとする(図 5)。センサノードは、周辺環境等の測定を行なうセンサ機能と取得したセンサデータを無線信号到達範囲内にある隣接ノードと交換する無線通信機能を備える。ただし、GPS 等の位置取得機能を備えず、位置を自律的に変更することもできない。移動中継ノードは、GPS 等の位置取得機能を備え、位置データ等に基づいて自律的に移動することが可能である。センサノードと同様に無線通信機能により隣接ノードと無線通信によるセンサデータを交換する。シンクノードは、センサネットワークとユーザネットワークとの間のゲートウェイである。センサノードから無線通信によってセンサデータを受信し、ユーザネットワークへの配送を有線ネットワーク等を用いて配送する。シンクノードには、移動中継ノードの位置を管理するサーバが接続している。この管理サーバには、センサネットワークに接続する移動中継ノードのうち移動可能であるもの、すなわち、センサノードの散布によって構築されたサブセンサネットワークと既設センサネットワークの無線マルチホップ接続に寄与していない移動中継ノードの位置を管理している。

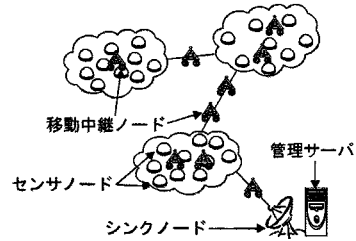


図 5: センサネットワーク

#### 3.2 移動中継ノードの配置による接続性保障

本論文では、2章で述べた問題点、すなわち測定対象領域が離散的に分布するセンサネットワークをセンサノードの散布によって構築する場合のマルチホップ配送経路の実現に要するコスト削減の問題を、移動中継ノードの導入によって解決することを提案する。移動中継ノードとは、無線通信機能を備えた移動ノードであり、自身の現在位置を取得するための GPS デバイスを備えていることを仮定する。

また、本論文では、各測定対象領域に順次センサノードと移動中継ノードを配置することによってセンサネットワークを構築するインクリメンタルな手法を用いることとする。ある測定対象領域にセンサノードを配置して、センサデータをシンクノードへ無線マルチホップ配送すること可能とするために、センサノード群と移動中継ノード群をいずれも散布によって配置することとする。センサノードは、従来手法と同様、測定対象領域をセンサノードの測定可能領域を被覆できるだけ十分に高い密度で散布する。また、複数の測定対象領域のためのセンサノード群が同時並行に構築されることも可とする。

散布されたセンサノードのからなる無線マルチホップネットワーク(以下、サブセンサネットワークと呼ぶ)と既設のセンサネットワークとは、中継移動コンピュータによるマルチホップ配送経路で接続する。移動中継ノードは、センサノードと同様に測定対象領域に散布される(図 6)。自身の備える GPS によって取得する現在位置とあらかじめ与えられたシンクノードの位置とを用いて移動戦略を決定し、このマルチホップ配送経路を構築する。

サブセンサネットワークおよびセンサネットワークの位置は、これらに接続する移動中継ノードの位置として把握される。これは、移動中継ノードにのみ GPS 等の位置取得デバイスが搭載されていること、センサノード

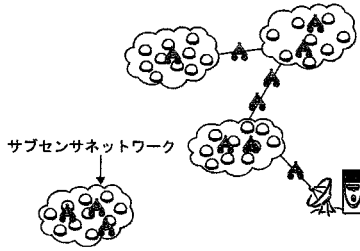


図 6: サブセンサネットワークの追加

の位置は移動中継ノードの位置から推測することも可能であるが、推測誤差が発生すること、センサネットワークの故障や電池の消耗によって機能を失うことがあることから、センサノードの位置としてセンサネットワークの位置を把握することはしない。散布されるセンサノードからなるサブセンサネットワークの構築は、複数箇所で同時進行することが考えられる。また、散布によって初期配置された移動中継ノードは、サブセンサネットワークと既設ネットワークとの接続のために移動する。このため、把握されるセンサネットワークの位置は時間経過とともに変化する。したがって、散布される移動中継ノードに既設センサノードに含まれる移動中継ノードの位置を与えても、サブセンサネットワーク構築時にはその位置が変化していることが考えられる。ただし、シンクノードの位置は変化しない。そこで、移動中継ノードにはシンクノードの位置を与えることとする。

サブセンサネットワークと既設センサネットワークの接続には、より少ない移動中継ノードを用いることが望ましい。また、この接続を構成するための移動中継ノードの移動距離は小さくなることが望ましい。

### 3.3 移動戦略の決定

移動戦略の決定においては、移動距離が小さくなることを目標とする。移動中継ノードは、サブセンサネットワークとセンサネットワークを接続するマルチホップ配送経路に配置されるとそれ以上移動することはせず、センサデータの無線マルチホップ配送のみを行なう。この配置が決定されるまでは、移動中継ノードは移動可能状態として管理され、移動指示を受けるまで位置を変更せずに待機する。

移動中継ノードはセンサノードと同様に散布によって初期配置される。そのため、各移動中継ノードの初期配置は、必ずしも測定対象領域の内部とは限らない。測定対象領域の外部に初期配置された移動中継ノードは、GPSを用いて測定対象領域の方向に移動する。移動中

継ノードは、測定対象領域に散布されたいずれかのセンサノードと直接無線通信可能な位置に移動したところで停止する。この時点で、サブセンサネットワークを通して散布された移動中継ノードは互いに通信可能となる。そこで、各移動中継ノードは、位置情報をサブセンサネットワークへフラッディングすることによって、互いに位置情報を共有する。

サブセンサネットワークと既設のセンサネットワーク(シンクノードと無線マルチホップ通信可能なセンサノードと移動中継ノードからなるセンサネットワーク)を無線マルチホップ配送経路で接続することによって、サブセンサネットワークが取得するセンサデータをシンクノードへ配送可能とする。このためには、センサネットワークに接続する移動中継ノードにサブセンサネットワークの位置を通知しなければならない。ただし、センサネットワークに接続する移動中継ノードの位置を取得していないことから、サブセンサネットワークに接続する移動中継ノードのうち、最もシンクノードに近い移動中継ノードがシンクノードの方向へ移動する(図7)。この移動によって、シンクノードまたは既設センサネットワークのいずれかのセンサノード、移動中継ノードと直接通信可能となったならば、その位置で停止する。以降、この移動中継ノードは既設センサノードに接続する任意のノードと無線マルチホップ通信可能である。そこで、管理サーバに対してサブセンサネットワークに接続する移動中継ノードの情報を提供し、これに基づいてサブセンサネットワークを既設センサネットワークに接続するための移動戦略を決定する(図8)。

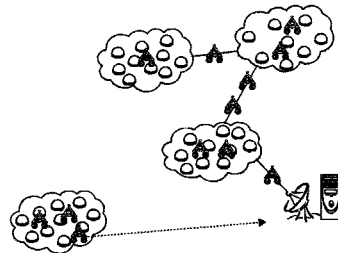


図 7: サブセンサネットワークの位置通知のための移動

サブセンサネットワークと既設センサネットワークの接続には、移動可能な移動中継ノードを用いる。散布によって初期位置に配置された移動中継ノードは、サブセンサネットワークを既設センサネットワークと接続するために用いられる。この接続を確実にこなうためには、推測される必要数に対して余裕のある数の散布を行

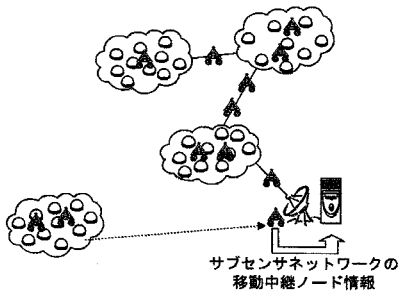


図 8: 移動中継ノードの情報通知と移動戦略の決定

なう。これは、センサノードが測定対象領域を高率で被覆するように散布することによって、測定対象領域より広い範囲に配置されたセンサノードが無線マルチホップ通信可能となるため、既設センサノードとの接続に要する移動中継ノード数が削減できることと、散布時に発生する移動中継ノードの故障を見込んで余裕を加えた数の中継移動ノードを散布することによるものである。

シンクノードには、管理サーバを接続しているが、この管理サーバは移動可能な移動中継ノードの位置を格納するデータベースを持っている。そこで、サブセンサネットワークをこのデータベースに登録するとともに、データベースに登録された移動中継ノードから、サブセンサネットワークを既設センサノードに接続するために移動するべき移動中継ノードを選択し、これに対して移動要求を通知する(図 9、図 10)。既設センサノードに接続する移動中継ノードに対しては、既設センサネットワークにおける無線マルチホップ配送を用いることで、移動要求を移動中継ノードに到達させることができる。一方、サブセンサネットワークに接続する移動中継ノードに対しては、移動要求を無線マルチホップ配送で到達させることはできない。そこで、移動対象となった既設センサネットワークに接続している移動中継ノードのうちの 1 台がサブセンサネットワークへ移動要求を保持して移動する。サブセンサネットワークの位置は、サブセンサネットワークに接続していた移動中継ノードのうちの 1 台が移動して既設センサネットワークに接続していることから、入手可能である。サブセンサネットワークに接続するまで移動した移動中継ノードが、移動要求をサブセンサネットワークに接続する移動中継ノードに通知することによって、すべての移動対象移動中継ノードに移動要求を通知することができる。

移動対象の移動中継ノードの選択にはさまざまな記述を定めることができる。本論文では、移動先までの距

離が小さいものを選択している。これは、移動中継ノードもセンサノードと同様に電源供給することが一般に困難であるため、消費電力を削減することが必要とされるからである。ただし、本論文の選択アルゴリズムは、長期的にセンサネットワークを拡大していく場合、必ずしも移動距離が短くなる方法とはなっていない。これについては、5 章で簡単に考察する。

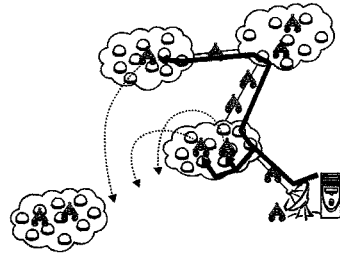


図 9: 経路構築のための移動指示

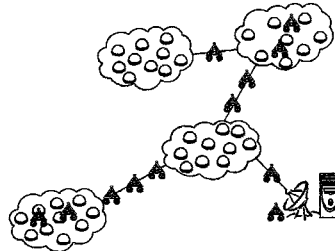


図 10: 既設センサネットワークへのサブセンサネットワークの接続

## 4 アルゴリズム

[サブセンサネットワーク接続アルゴリズム]

- 1) センサノード  $\{S_0, \dots, S_s\}$  が測定領域  $A_a$  を被覆するように配置して、サブセンサネットワーク  $SSN$  を構成する。
- 2) 移動中継ノード  $\{M_0, \dots, M_m\}$  を  $\{S_0, \dots, S_s\}$  のいずれかと直接無線通信可能な位置に配置する。いずれかの移動中継ノード  $M_i$  初期位置が通信不能な位置であるならば、 $M_i$  は領域  $A_a$  の方向に移動し、通信可能となった位置に停止する。
- 3) 移動中継ノード  $M_i$  は、自身の位置  $M_i.loc$  を含む位置通知メッセージ  $Loc.adv$  を領域  $A_a$  のサブセンサネットワーク  $SSN$  にフラッディングする。
- 4) 一定時間  $Loc.adv$  を受信した  $M_i$  は、受信したいずれの  $Loc.adv$  メッセージに含まれる位置よりも

自身の位置がシンクノード  $S$  に近いならば、 $M_i$  は  $S$  の位置への最短経路を移動する。

- 5)  $S$  の位置への移動途中でセンサネットワークに含まれるいずれかのセンサノード、移動中継ノード、シンクノードと直接無線通信可能となったならば、その位置で停止する。 $M_i$  は、管理サーバ  $MS$  に  $SSN$  に含まれるセンサノードと直接無線通信可能なすべての移動中継ノードの位置を含むサブセンサネットワーク接続要求メッセージ  $Creq$  を送信する。
- 6)  $Creq$  を受信した  $MS$  は、以下により移動中継ノードの移動計画を作成する。
- 6-1) センサネットワーク  $SN$  と直接無線通信可能な移動可能中継ノードリスト  $A\_MBL$  に  $M_i$  をその位置とともに追加する。
- 6-2)  $A\_MBL$  に含まれる移動コンピュータ  $M_p$  と受信した  $Creq$  に含まれる移動コンピュータ  $M_q$  のうち距離が最短となる組み合わせを選択する。
- 6-3)  $M_p$  と  $M_q$  が互いに無線マルチホップ通信可能とするために必要となる移動中継ノード数  $n$  を算出する。
- 6-4)  $SN$  に接続する移動中継ノードのうち、 $M_p$  と  $M_q$  の中点からの距離が小さいものから  $n$  台を選択する。もし、 $|A\_MBL| < n$  であり、 $SSN$  に接続する移動コンピュータ数が  $n - |A\_MBL|$  以上であるならば、 $SSN$  に接続する移動コンピュータを  $n - |A\_MBL|$  台追加選択する。
- 6-5) 6-4) で選択された  $n$  台の移動中継ノードに  $M_p M_q$  の  $n$  分点をそれぞれ移動先として割りあてる。ただし、 $M_p M_q$  の中点に最も近い  $SN$  に接続する移動中継ノードの移動先は  $M_q$  に最も近い  $n$  分点とする。
- 6-6)  $A\_MBL$  から 6-4) で選択された移動中継ノードを除去する。また、 $Creq$  に含まれる移動コンピュータのうち 6-4) で選択されなかった移動中継ノードをその位置とともに追加する。
- 7) 6-4) で選択した  $SSN$  に接続するすべての移動中継ノードの移動先位置を含む移動要求転送メッセージ  $FMreq$  を 6-4) で選択した  $SN$  に接続する  $M_p$  と  $M_q$  の中点に最も近い移動中継ノードに送信する。
- 8) 6-4) で選択した  $SN$  に接続するすべての移動中継ノードに移動先位置を含む移動要求メッセージ  $Mreq$  を送信する。
- 9)  $FMreq$  を受信した移動中継ノード  $M_i$  は、 $Mreq$

を受信した後、移動先へ移動する。 $M_q$  と直接無線通信可能となったならば、受信した  $FMreq$  に含まれる移動先位置を含む  $Mreq$  を 6-4) で選択した  $SSN$  に接続する移動中継ノードに送信する。

- 10)  $Mreq$  を受信した移動中継ノードは、移動先へ移動する。

## 5 まとめと今後の課題

本論文では、センサノードと移動中継ノードを散布により測定対象領域に初期配置し、これによって構成されたサブセンサネットワークを既設センサネットワークに接続するマルチホップ配送経路を余剰移動中継ノードの移動によって構成する手法を提案した。提案手法は、測定対象でない領域に多数のセンサノードを散布する必要がなく、継続的にノードの移動電力を消費する必要もない。提案手法は、初期値として散布する移動中継ノードにシンクノードの位置のみを与えることから、センサネットワークの構成が動的に変化する環境(同時並行に他のサブセンサネットワークが構築されるなど)においても、短距離の接続を構成することができる。移動中継ノードの移動距離は、余剰移動中継ノードの配置に依存する。提案手法では、接続対象のサブセンサネットワークの接続に必要な移動距離を削減する手法としているが、移動後の余剰移動中継ノードの配置は必ずしも以降のサブセンサネットワーク接続のために適切な配置となっている訳ではない。例えば、既設センサネットワークの規模が大きくなっていくと、シンクノード近辺に存在する移動中継ノードは、新規の接続に使われることがなくなるといふ問題がある。今後は、以降のセンサネットワークの拡大のために余剰移動中継ノードの配置を考慮した移動戦略について検討する。

## 参考文献

- [1] Szewczyk, R., Osterweil, E., Polastre, J., Hamilton, M., Mainwaring, A. and Estrin, D., "Habitat Monitoring with Sensor Networks," Communications of the ACM, Vol. 47, No. 6 pp. 34-40 (2004).
- [2] Zhao, W., Ammar, M. and Zegura, E., "Distributed Sensing and Data Collection via Broken Ad Hoc Wireless Connected Networks of Mobile Robots," Distributed Autonomous Robotic Systems, Vol. 4, pp. 273-282 (2000).
- [3] 谷口哲也, 神崎映光, 原隆浩, 西尾章治郎, "局所性のあるアドホックネットワークにおけるロボットを利用した複製伝播手法," 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, 情処研報, Vol. 2006, No. 15, pp. 151-156 (2006).
- [4] 村瀬正名, 西尾信彦, 徳田英幸 "引力・斥力モデルに基づいたセンサノードの動的再配置手法," 情報処理学会システムソフトウェアとオペレーティングシステム研究会, 情処研報, Vol. 2003, No. 19, pp. 31-38 (2003).