

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19500027

研究課題名（和文） センサーネットワークにおける状況適応型構造化手法に関する研究

研究課題名（英文） A Research on situation oriented structuring techniques for sensor networks

研究代表者

片山 喜章 (KATAYAMA YOSHIAKI)

名古屋工業大学 工学研究科 准教授

研究者番号：10263435

研究成果の概要：

無線通信装置を有する大量のセンサー端末が互いに通信しあうネットワークがセンサーネットワークであり、これは一般の無線通信端末による“アドホックネットワーク”（無線通信ネットワーク）として捉えることが可能である。本研究では、アドホックネットワーク上で効率のよい通信を実現するための論理的構造の構築方法と経路制御手法、および端末が自律的に移動する場合にそのシステムがどのように制御可能かを明らかにした。これらの成果を、7編の論文、8件の国際会議、および学術誌解説記事と招待講演各1件で発表した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：アルゴリズム，分散アルゴリズム，自己安定

## 1. 研究開始当初の背景

センサーネットワークをはじめとする、無線通信デバイスによるアドホックネットワークにおいて、情報収集・情報散布といった基本的な通信手段を効率よく行うためには、各端末の通信制御が必須である。このとき、アドホックネットワークを構成する端末において、必要に応じて情報の送受信制御をおこなってやれば、無駄な通信を減らすことができる。

一般にセンサーネットワークを構成する

センサー端末は、電源容量や計算能力が限られている。さらに、センサー端末は低機能であるがゆえに、電源容量を使い果たしたり、故障をおこしたりすることによって電源断が頻発すると考えられる。またセンサー端末自身が自律的あるいは他動的に移動する場合も考えうる。

このように動的に変化するアドホックセンサー上での効率のよい通信（無駄な送受信が少ない）を実現するためのネットワーク上での論理的構造構築手法は、センサーネット

ワーク、あるいはアドホックネットワークを  
実用化する上で重要である。

## 2. 研究の目的

センサー端末など能力が限られた移動端  
末によって構成されるアドホックネットワ  
ーク (MANET) は、電源枯渇や故障による  
電源断や端末移動によるネットワーク形状  
(端末間の接続関係の変化) が頻発する。こ  
のような性質をもつ MANET 上で、情報収  
集・情報散布・一対一通信といった基本的な  
通信を効率よく行う方法の開発を研究目的  
とした。さらに、移動端末が自律的に移動可  
能な場合に、それらの移動を制御することで、  
積極的に通信、あるいはセンシングが可能な  
ネットワーク形状を実現するための基礎理  
論の確立を目指した。

## 3. 研究の方法

研究目標を達成するために、本課題研究で  
は、MANET について以下の 3 つの視点から  
研究に取り組んだ。

### (1) 情報収集・散布

MANET 上のあるひとつの端末が得た情  
報を MANET を構成する全端末に放送す  
ることを情報散布という。また逆に、あ  
るひとつの端末が MANET を構成する全  
端末からの情報を集めることを情報収集  
という。これらの基本的な作業を、送受  
信の無駄を生じさせずに行うことが可能  
なネットワークの論理的構造の構築を目  
指した。この際、MANET 上に特別な集  
中管理端末を想定するのではなく、各端  
末が自律的かつ分散的に協調動作し、全  
体として論理構造を構築することが必要  
であり、そのための分散アルゴリズムの  
開発を行った。

さらに、端末の移動や故障が生じること  
を想定し、そのような場合でも破たん  
なく構造を構築・維持するためには、故障  
耐性を有する分散アルゴリズムの構築が  
必須となる。そこで、故障耐性を有する  
分散アルゴリズムのパラダイムの一つで  
ある自己安定 (self-stabilization) に注  
目し、自己安定の性質を満たす分散アル  
ゴリズムの開発を行った。

### (2) 一対一通信

MANET 上で一対一通信を行う場合には、  
情報収集・散布とは違い、通信を行う二  
つの端末間の通信に利用される通信路の  
選択が重要になる。つまり MANET では、  
ネットワーク形状が動的に変化し、また  
端末が低能力であることから、一時的な  
通信の集中などによるスループットの低  
下が頻発する。そのため、常に変化する

ネットワーク状況に対応した通信経路の  
構築が必須となる。そこで、本課題研究  
では、ネットワーク状況が刻一刻と変化  
する状況でも、できるだけ良いスループ  
ットを得ることができる経路制御のため  
のアルゴリズムの開発を行った。

### (3) 移動端末による構造化の可能性

MANET を構成する端末が自律的に移動  
可能な場合を考える。この場合、現在の  
端末の配置から、効率のよい通信を実現  
するためにはどのような配置が良いかを  
端末自身が判断し、その場所へ自律的に  
移動することができれば、MANET の利  
用範囲を飛躍的に拡大できる可能性がある。  
そこで、既存の自律移動型分散ロボ  
ット群制御の理論を研究することで、自  
律移動型端末による MANET での効率の  
よい通信実現のための基礎理論研究が  
可能であろうと考えた。特に、低機能な  
端末による分散システムの形状形成は興  
味深く、直接的に MANET の通信構造構  
築に関わらないかもしれないが、将来的  
に応用可能である共通の基礎理論を基盤  
として持つことから、この分野における  
研究・アルゴリズム開発を行った。

## 4. 研究成果

本課題研究における研究成果について「情  
報収集・情報散布のための構造構築」、  
「一対一通信のための通信経路制御」およ  
び「移動端末群の形状形成」のそれぞれに  
分けて報告する。

### (1) 情報収集・情報散布のための構造構築

本研究分野における研究成果は、4 編の  
論文および 2 件の国内・国際会議での発  
表としてまとめられている。

具体的な成果としては、まず MANET を完  
全ネットワーク (クリーク) に分割し、  
それらを接続したクラスタネットワーク  
を自己安定的に構築するアルゴリズムを  
提案した。クリークに分割することで、  
端末の出現・消滅が起きた時にも、効率  
よくクラスタネットワークの維持が可能  
である特徴を持つ。また、情報散布には  
クラスタ数に比例する時間程度しかかか  
らず、効率のよい通信が可能である。こ  
の構築アルゴリズムは、自己安定アルゴ  
リズムの持つ重ね合わせが可能な性質を  
利用し、単純な自己安定アルゴリズムを  
多段構成することで複雑なクラスタリン  
グを行っている。この多段構成技術は、  
一般的なアルゴリズム構築手法として捉  
えた場合に、可解である問題のクラスを  
明らかにするという新たな問題を提示し  
ている。

次に、MANET をスター型ネットワークに

分割し、それらを接続したクラスタネットワークを構築するアルゴリズムを提案した。この構造を利用することで、情報散布がクラスタ数程度の時間で可能となる。また、情報収集についても同様である。この提案アルゴリズムは、端末の出現・消滅時のクラスタネットワーク再構築が効率よく行える点で評価された。

我々はこのアルゴリズムをさらに改良し、端末の出現・消滅時のクラスタネットワーク再構築にかかる計算量を減らすことが可能なネットワーク構造及びその構築アルゴリズムを提案した。この構造でも、情報収集・散布にかかる時間は、今までのもので変わらないことが分かっている。これらの成果とは別に、自己安定アルゴリズムの適用範囲を更に広げることが可能にする成果も得られた。これは、自己安定アルゴリズムの持つ故障耐性をさらに高度化させる“故障封じ込め(fault containment)”を、多段構成の自己安定アルゴリズムに対しても適用可能にする技術である。今まで多段構成による自己安定アルゴリズムでは故障端末による影響を封じ込められずシステム全体に及ぶのを避けられなかったのだが、我々の提案した技術により故障端末から限定された距離に存在する端末のみに影響を抑えることが可能となった。この提案技術はまだ完成の域には至っていないものの、その概念を初めて提案した点において意味のある結果となった。

(2) 一対一通信のための通信経路制御

本研究分野の成果は、3編の論文と1本の国際会議での発表としてまとめられている。

MANETでの一対一通信を効率よく（高スループット、低通信遅延で）行うためには、刻一刻と変化するネットワーク形状および通信状況の下で、通信要求が生じた時点でのネットワーク状況によって最適な経路を選択する必要がある。しかし、分散システムにおいてリアルタイムでネットワーク状況を得ることは不可能であり、過去の履歴等を用いたり、通信要求が生じるごとに通信状況を確認するための作業を行うことが一般的である。さらに、ネットワーク状況を知るために通常のトラフィックとは別のトラフィックを生み出すことになりかねず、これはネットワーク帯域の消費につながる可能性がある。

我々はこの問題を解決するために、過去の通信時の状況を記録し、それらを使って現在のネットワーク状況を推測することで、最適な経路を求める手法を提案した。具体的には、通信状況（スループッ

トや通信遅延）の統計記録からニューラルネットワークによる推測を行い、現在最も適していると思われる通信経路を選択する。このアルゴリズムをMANETのシミュレータを用いて既存のものと比較し、提案アルゴリズムが既存のものよりも平均的なスループットや通信遅延の点で優れていることを明らかにした。

(3) 移動端末群の形状形成

本研究分野における研究成果は、5本の国際会議での発表と招待講演及び学術誌の解説記事各1本にまとめられている。

自律移動端末を非常に機能が限定された「ロボット」として扱い、これを制御して目的の形状を実現するアルゴリズムに関する研究を行った。特にロボットの持つセンサーに誤差がある場合に着目し、この時にどのような形状を生成可能かその可解性について、いくつかの新しい事実を明らかにした。

これらの結果のうち、特にロボットのセンサーの観測結果に含まれる誤差が時間変化とともに変化する「動的コンパス」のモデル化とその分類についての成果は、発表後約2年間で10件以上の論文で参考にされており、インパクトのある結果となっている。

それ以外にも、センサーの故障の程度と問題の可解性の関係について、いくつかの下界と最適アルゴリズムを提案、それぞれ著名な国際会議での発表を行い、同分野の研究者から良好な反応を得た。またこれをきっかけとして、2009年度に日本国内を会場として実施される並列・分散システム関係の国際会議(PDCAT)にて、自律分散ロボットをテーマとするワークショップの企画につながった。

これらの研究成果は、MANETでの通信効率の良い構造の実現に直接関係ないように思えるが、センサー端末が自律的に移動可能な場合には、将来的にどの程度のセンサー機能でどのような形状を形成できるのか、つまりセンサーネットワークとしての適用領域を明らかにする上で有用な知見を与えてくれるものであると考える。

以上、本課題研究によっていくつかの直接的な成果を得たが、さらに将来につながる新しい研究分野の開拓にも貢献できていると、有意義な研究であったと考える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1. F. Jing, R. S. Bhuvaneshwaran, Y. Katayama, N. Takahashi, "AODV-based multipath routing protocol with preferential path selection probabilities", *International Journal of Wireless and Mobile Computing (IJWMC)*:<http://www.inderscience.com/index.php>), (to appear), 査読有

2. F. Jing, R. S. Bhuvaneshwaran, Y. Katayama, N. Takahashi, "On-demand Multipath Routing Protocol with Golden Section Search and Neural Networks", *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems (IJCNDS, INDERSCIENCE publishers)*:<http://www.inderscience.com/index.php>), (to appear), 査読有

3. Y. Yamauchi, S. Kamei, F. Ooshita, Y. Katayama, H. Kakukawa, T. Masuzawa, "Hierarchical Composition of Self-stabilizing Protocols Preserving the Fault-containment Property", *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, Vol. E92-D, No. 3, pp. 451--459, 2009, 査読有

4. 宮永慎太郎, 片山喜章, 和田幸一, 高橋直久, 小林基成, 森田正範: "動的アドホックネットワークでの効率の良い統合・分離が可能なクラスタネットワーク構築アルゴリズム", *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. J91-D, No. 2, pp. 389--401, 2008, 査読有

5. F. Jing, R. S. Bhuvaneshwaran, Y. Katayama, N. Takahashi, "Adaptive Route Selectin Policy Based on Back Propagation Neural Networks", *Journal of Networks (Academy Publisher (JNW):<http://www.academypublisher.com/jnw/>)*), Vol. 3, No. 3, pp. 34--41, 2008, 査読有

6. J. Uchida, A. K. M. Muzahidul Islam, Y. Katayama, W. Chen, K. Wada, "Construction and maintenance of a novel cluster-based architecture for ad hoc sensor networks", *Journal of Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, (<http://www.oldecitypublishing.com/AHSWN/AHSWN.html>), Vol. 6, No. 1-2, pp. 1-31, 2008, 査読有

7. A. K. M. M. Islam, Y. Katayama, W. Chen, K. Wada, "A novel cluster-based architecture and a routing protocol for dynamic ad hoc radio networks", *Journal of the Institutions of Engineers*, Vol. EE 33, No. I&II (published by Electrical Engineering Division, The Institute of Engineers, Bangladesh, <http://www.eibbd.org/>), pp. 99--106, 2007, 査読有

[学会発表] (計 8 件)

1. K. Yamamoto, T. Izumi, Y. Katayama, N. Inuzuka, K. Wada, "Convergence of Mobile Robots with Uniformly-Inaccurate Sensors," *Proceedings of 15th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2009)*, 2009, 査読有

2. Y. Yamauchi, S. Kamei, F. Ooshita, Y. Katayama, H. Kakugawa, T. Masuzawa, "Timer-based Composition of Fault-containing Self-stabilizing Protocols," in *2nd International Symposium on Intelligent Distributed Computing (IDC' 2008)*, *Studies in Computational Intelligence, Intelligent Distributed Computing, Systems and Applications*, Vol. 162/2008 (ISBN 978-3-540-85256-8, Springer), pp. 217--226, 2008, 査読有

3. N. Inuzuka, Y. Tomida, T. Izumi, Y. Katayama, K. Wada, "Gathering problem of two asynchronous mobile robots with semi-dynamic compasses," *Proceedings of 15th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2008)*, LNCS5058, pp. 5--19, 2008, 査読有

4. H. Nishimura, T. Izumi, Y. Katayama, K. Wada, "On A Self-Stabilizing Algorithm for Minimal Clique Partition Problem," *Proc. of The First AAAC Annual Meeting (AAAC08)*, Asian Association for Algorithms and Computation (AAAC), p. 37, 2008, 査読有

5. K. Yamamoto, T. Izumi, Y. Katayama, K. Wada, "Convergence of Mobile Robots with Uniformly-Inaccurate Sensors," *Proc. of The First AAAC Annual Meeting (AAAC08)*, Asian Association for Algorithms and Computation (AAAC), p. 36, 2008, 査読有

6. T. Izumi, Y. Katayama, N. Inuzuka, K. Wada: "Gathering Autonomous Mobile Robots with Dynamic Compasses: An Optimal Result", Proceedings of 21st International Symposium on Distributed Computing (DISC2007), LNCS4731, pp. 298--312, 2007, 査読有

7. Y. Katayama, Y. Tomida, H. Imazu, N. Inuzuka, K. Wada, "Dynamic Compass models and Gathering Algorithms for Autonomous mobile Robots", 14th Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO2007), LNCS 4474, pp. 274--288, 2007, 査読有

8. J. Fang, R. S. Bhuvaneshwaran, Y. Katayama, N. Takahashi, "Dynamic Route Selection Policy Protocol in MANET", Workshop on Heterogeneous Wireless Networks (HWISE07), Proc. of The IEEE 21<sup>st</sup> International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2007), HWISE07-438, Vol. II, pp. 673--678, 2007, 査読有

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 移動端末による通信網の自己安定的構造化手法

出願番号: 特願 2007-052821

公開番号: 特開 2008-219362 (P2008-219362A)

出願日: 2007 年 (平成 19 年) 3 月 2 日

公開日: 2008 年 (平成 20 年) 9 月 18 日

発明者: 片山喜章 (名古屋工業大学), 和田幸一 (同左), 高橋直久 (同左), 滝田亘 (NTT ドコモ総合研究所), 森田正範 (同左), 小林基成 (同左)

名称: 移動端末装置、制御方法および移動通信システム

出願番号: 特願 2007-124464

公開番号: 特開 2008-283360 (P2008-283360A)

出願日: 2007 年 (平成 19 年) 5 月 9 日

公開日: 2008 年 (平成 20 年) 11 月 20 日

発明者: 小林基成 (NTT ドコモ総合研究所), 森田正範 (同左), 片山喜章 (名古屋工業大学), 和田幸一 (同左), 高橋直久 (同左)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

○学術解説記事

片山喜章, 山下雅史, "ハウ・ツー・ランデブー", 計測自動制御学会「計測と制御」, 第 46 巻, 第 11 号, ミニ特集「協調とフォーメーションの制御理論」, pp. 853--859, 2007, 査読有

○招待講演

片山喜章, 山下雅史, "ハウ・ツー・ランデブー", 計測自動制御学会北陸支部 チュートリアル講演会「フォーメーション制御の理論と応用 in KANAZAWA」, 2007

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片山 喜章 (KATAYAMA YOSHIAKI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 10263435

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

高橋 直久 (TAKAHASHI NAOHISA)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 80335083

和田 幸一 (WADA KOICHI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 90167198