

平成21年6月6日現在

研究種目：若手研究（B）  
研究期間：2007～2008  
課題番号：19710134  
研究課題名（和文） 先進的組合せ最適化手法を用いたセンサーネットワークの効率的運用法の研究  
研究課題名（英文） Design for Energy Efficient Sensor Networks by Advanced Combinatorial Optimization Technique  
研究代表者  
宮本 裕一郎（MIYAMOTO YUICHIRO）  
上智大学・理工学部・助教  
研究者番号：20323850

研究成果の概要：センサーネットワークを背景とする、アドホック無線通信ネットワークの効率的な構築法を研究した。ネットワークの構築法にはルールベースの構築法と何らかの最適化問題としてモデル化してそれを解く方法がある。最適化問題としてのモデル化およびそれに対するヒューリスティクスは既存研究として多く存在するが、モデル化した問題の難しさを明らかにした研究は少なかった。本研究では計算複雑度の観点からネットワーク構築問題を分類し、問題を簡単に解ける場合とそうでない場合を明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1000000	0	1000000
2008年度	1000000	300000	1300000
総計	2000000	300000	2300000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学，社会システム工学・安全システム

キーワード：組合せ最適化，センサーネットワーク，計算複雑度

## 1. 研究開始当初の背景

センサーネットワークは小型センサーにより構成されるアドホックネットワークである。計測機器・通信機器の小型化・安価化に伴い、ここ数年のうちに実用化されるシステムとして急速に注目を浴びていた。計測・通信分野では当時もっともホットな話題として扱われており、多くの研究がなされていた。計測・通信分野での研究は機器の開発、高性能化がほとんどであるが、アドホックネットワークの構築を含めた、センサーネットワークの効率的運用を論じたものもあった。しかし、そこで用いられているアルゴリズムはオペレーションズ・リサーチの観点から見ると稚拙なものであり、単純なヒューリスティッ

クが多かった。組合せ最適化の分野で培われた先進的なアルゴリズムをセンサーネットワークの運用で生じる様々な問題に適用することは重要であるが、現状ではそれがあまり知られていないと思われた。これは、計測機器を作る側、アルゴリズムを専門とする側の双方に言えることではないかと思った。センサーネットワークにおいてクラスタヘッドを決める問題をオペレーションズ・リサーチの立場から扱った研究も近年みられたが、それは既存の研究で整数計画問題としてモデル化された問題の欠点を指摘し、目的関数に工夫を加えたものであった。研究の中で数値計算実験もしているが、これは整数計画ソルバーに入力しただけのものであり、計算方

法を工夫したものではなかった。センサーネットワークにおいてクラスタヘッドを決める問題はオペレーションズ・リサーチでいうところの施設配置問題であり、NP 困難である。よって高精度で高速な近似解法が必要とされていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的はセンサーネットワークの効率的運用方法をオペレーションズ・リサーチ、特に組合せ最適化の立場から明らかにすることである。具体的には、センサーネットワークにおいてクラスタヘッドを決める問題などを組合せ最適化問題としてとらえ、理論的側面および実用的側面の双方において効率的なアルゴリズムを示すことである。

## 3. 研究の方法

既存の研究がどのようにセンサーネットワーク設計問題をモデル化しているのかを調査し、分類する。その上で、既存のモデルを含む一般的な問題としてモデル化し、効率的な運用法を開発する、あるいは効率的な運用法がないことを示す。

特に、従来はセンサーが2ホップで基地局までデータを送信するという前提でアルゴリズムが提案されていた(図1参照)。しかし、

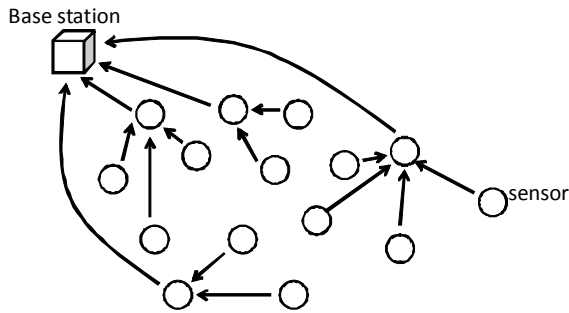


図1 2ホップネットワーク

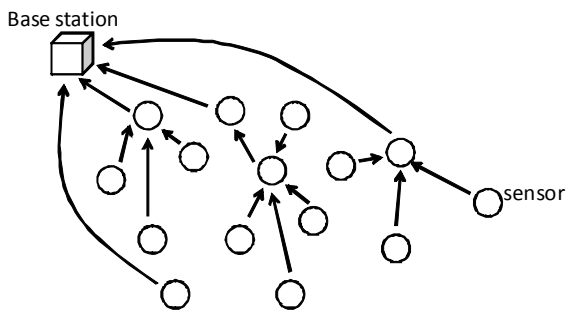


図2 マルチホップネットワーク

これはアルゴリズムを単純にするためのものであり、機器としての制約ではなかった。本研究では上限を設けないマルチホップ方式の通信ネットワークモデルを扱った(図2参照)。これにより得られる結果はより一般的なものとなった。

図3に扱った問題の概念図を示す。この図で

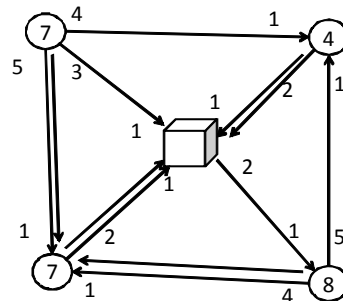


図3 問題の概念図

真ん中の四角は基地局を、周りの4つの丸はセンサーを表す。矢印は通信路の候補を表す。矢印の始まりと終わりに添えてある数字は、その矢印を通信路として使ったときに、データ送信で消費されるエネルギー量とデータ受信で消費されるエネルギー量を表す。センサーの上書いてある数字は、各センサーの初期エネルギー量である。扱った問題は、この入力に対して、すべてのセンサーから基地局へ通信できる通信路をなるべく多く見つけるものである。その際に、すべての通信路で消費されるエネルギーの合計が、各センサーでの初期エネルギー量を超えてはならない。図4に実行可能な通信路の例を示す。

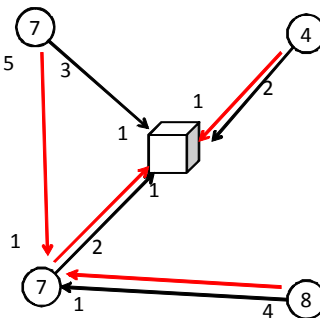


図4 通信路の一例

赤い通信路と黒い通信路の2つの通信路が確保されている。それぞれの通信路で消費されているエネルギーは各センサーの初期エネルギー量を超えていない。また、各通信路はスパニングツリーになっており、すべてのセンサーからのデータ送信が基地局まで届くことが保証されている。この例では説明のためセンサーや通信路の候補の数は少ない。しかし現実のデータでは少なくとも数百のセンサーを扱う。

#### 4. 研究成果

センサーネットワークを背景とする、アドホック無線通信ネットワークの効率的な構築法を研究した。ネットワークの構築法にはルールベースの構築法と何らかの最適化問題としてモデル化してそれを解く方法がある。最適化問題としてのモデル化およびそれに対するヒューリスティクスは既存研究として多く存在するが、モデル化した問題の難しさを明らかにした研究は少なかった。本研究では計算複雑度の観点からネットワーク構築問題を分類し、問題を簡単に解ける場合とそうでない場合を明らかにした。これにより既存のヒューリスティクスの動機がはっきりしたものとなったと同時に、ヒューリスティクスに頼らず効率的に最適解を見つけられる自明でない場合もあることを示した。具体的な例として、多くの数値計算実験で用いられているベンチマーク問題の設定では、センサーが（1次元）直線上に配置されていても、ネットワーク構築問題は強 NP 困難であることを示した。他にも、無線通信におけるエネルギー消費が、データ送信時に起こる場合、データ受信時に起こる場合のそれぞれとネットワークトポロジーの組合せで計算複雑度がどれだけ異なるか理論的に明らかにした。ネットワークトポロジーとしては特に巡回的ネットワークと非巡回的ネットワークを分けて扱った。それぞれを図5と図6に示す。

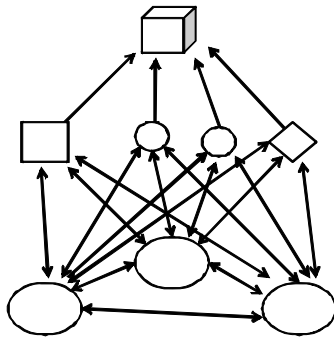


図5 巡回的ネットワーク

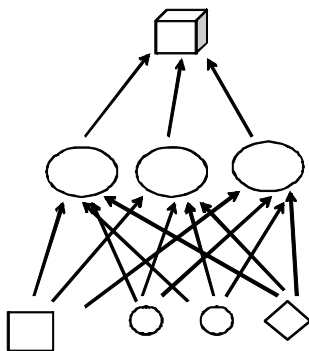


図6 非巡回的ネットワーク

明らかにしたことを箇条書きでまとめると、以下ようになる。

- データ収集1回あたりのエネルギー消費が最小となる通信路を設計する問題  
(これは何らかの目的関数の元で最適なスパニングツリーを見つける問題ともいえる)
  - 発信時のみにエネルギーを消費する場合には効率的な設計法を示した。
  - 受信時にエネルギーを消費する場合には、通信路の候補が非巡回的であっても、NP 困難になることを示した。
  - 受信時にエネルギーを消費する場合には、あらゆるノード間の通信が可能でありながらエネルギー消費が距離に依存する場合であっても、NP 困難になることを示した。
- システム全体の稼働時間を最大化する問題  
(これはスパニングツリーをなるべくたくさん詰め込む問題ともいえる)
  - 発信時のみにエネルギーを消費し、通信路の候補が非巡回的である場合には効率的な設計法を示した。
  - 発信時のみにエネルギーを消費する場合には、あらゆるセンサー間の通信が可能でありながらもエネルギー消費が距離に依存する場合などはNP 困難になることを示した。
  - 受信時にもエネルギーを消費する場合にも NP 困難になることを示した。

エネルギー消費が距離に依存する場合は、特に実用において、重要である。実際の電波の減衰は距離が大きくなるに従って、急激に大きくなる。よって小さな出力しか持てないセンサーは、事実上遠くへはデータを送信できない。そのような状況をネットワークで表したものとして円グラフなどがある。円グラフ上のネットワーク設計問題、特に本研究で扱ったシステム全体の稼働時間を最大化する問題が困難な問題なのか否かは明確にはされていない。しかし、本研究の結果は円グラフ上の問題がおそらく困難な問題であることを示唆している。未解決な問題に対する手がかりを与えた意味でも本研究の価値は大きい。

## 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3件)

- ① Y. MIYAMOTO and T. MATSUI, Perfectness and imperfectness of unit disk graphs on triangular lattice points, *Discrete Mathematics*, Vol. 309 (2009), pp. 2733--2744. (査読あり)
- ② S. IMAHORI, Y. MIYAMOTO, H. HASHIMOTO, Y. KOBAYASHI, M. SASAKI and M. YAGIURA, The complexity of the node capacitated in-tree packing problem, In *Proceedings of the International Network Optimization Conference 2009*, MB5-2. (査読あり)
- ③ 宮本裕一郎, 主双対近似解法, *Communications of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 52, No. 9 (特集 新・ORの図解), pp. 522--525, 2007. (査読なし)

[学会発表] (計11件)

- ① 宮本裕一郎. 最短路検索の高速化と応用. in *Proceedings of the 2009 Spring National Conference of Operations Research Society of Japan*, pp. 20--21, 2009.
- ② 玉木久夫, 宮本裕一郎. 無向グラフのk巡回的な向き付け. 日本応用数理学会研究部会連合発表会, 京都大学にて, 2009年3月8日.
- ③ 伊藤健洋, 上原隆平, 小野廣隆, 玉木久夫, 宮本裕一郎. なるべく遠回りしなくてすむように一方通行を決める問題の難しさ. 日本応用数理学会研究部会連合発表会, 京都大学にて, 2009年3月8日.
- ④ 宮本裕一郎, 宇野毅明, 久保幹雄. 最短路高速検索の新解法: 階層メッシュ疎化法. *スケジューリングシンポジウム 2008 予稿集*, pp. 127--132, 2008.
- ⑤ 今堀慎治, 宮本裕一郎, 橋本英樹, 佐々木美裕, 柳浦睦憲. 点容量付き内向木詰込問題の計算複雑度. *情報処理学会研究報告*, 2008-AL-119, pp. 57--62, 2008.
- ⑥ 宮本裕一郎, 宇野毅明, 久保幹雄. 最短路高速検索のための階層メッシュ疎化法. *情報処理学会研究報告*, 2008-AL-119, pp. 49--56, 2008.
- ⑦ 今堀慎治, 宮本裕一郎, 佐々木美裕, 柳浦睦憲. 点容量付き内向木詰込問題の計算量. in *Proceedings of the 2008 Fall National Conference of Operations Research Society of Japan*, pp.

316--317, 2008.

- ⑧ 安井雄一郎, 藤澤克樹, 笹島啓史, 後藤和茂, 宮本裕一郎. 大規模最短路問題に対するダイクストラ法の高速化. in *Proceedings of the 2008 Fall National Conference of Operations Research Society of Japan*, pp. 314--315, 2008.
- ⑨ 宮本裕一郎, 宇野毅明, 久保幹雄, 藤澤克樹, 最短路高速検索の研究最前線, 空間データ解析サミット 2008 (GODIVA2008), 筑波大学にて, 2008年3月3日.
- ⑩ 宇野毅明, 宮本裕一郎, 久保幹雄. 最短路高速検索のための階層メッシュ疎化法. in *Proceedings of the 2007 Fall National Conference of Operations Research Society of Japan*, pp. 214--215, 2007.
- ⑪ 宇野毅明, 宮本裕一郎, 久保幹雄. 最短路をものすごく速く答える方法. *SSOR2007 アブストラクト集 (2007)*, pp. P-7.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮本 裕一郎 (MIYAMOTO YUICHIRO)  
上智大学・理工学部・助教  
研究者番号: 20323850