

センサネットワーク

— 総論 —

Sensor Networks : General Remarks

小川 明



センサネットワークは、多くのセンサデバイスを情報通信ネットワークで結ぶことでセンシングの高度化を図る目的を持つが、それだけでなく、今後の情報技術分野に新しい概念を与え、基盤技術ともなる可能性を秘めている。センサネットワークは、多方面の学術分野を融合して成り立つものであり、様々な学術的側面を持つと同時に様々な厳しい制約があり、その条件のもとでシステムの最適化を図る必要がある。本文では、以上の点を背景として、センサネットワーク技術を概観する。

キーワード：センサノード，ネットワーク，協調，融合，データセントリック性

1. はじめに

最近センサネットワークやネットワークセンシングという言葉をよく耳にするようになったが、世界を見てもこれに関する研究の広がり著しいものがある^{(1)~(4)}。元々センサとは、温度、圧力、音、光などの物理量を計測する装置のことで、人間生活にとって欠くことのできないものである。また、センサから得られた情報は、通信ネットワークによって遠く離れた場所に送られ、遠隔監視・制御などに使われてきた。これは、テレメータと呼ばれ、センサネットワークの一種といえる。しかし、新しいセンサネットワークは、センシング機能だけでなく、情報処理機能と通信機能を備えた多くのセンサノードからなり、それらが互いに通信網によって接続されて、協調動作を行う。そしてそれは、単にセンシングの高度化をもたらすばかりでなく、今後の情報通信分野に新しい概念を与え、将来の基盤技術ともなる可能性を秘めている。それと同時に、商品管理、物流、運輸、製造支援、環境測定、セキュリティ、救助活動など、多様な応用分

野が広がっている。

センサネットワークは、センシング、情報理論、情報伝送・検出、ネットワーク、人工知能、制御理論、システム理論など多方面の学術分野を融合して成り立つものであるが、センサネットワークが従来のネットワークと異なる点は、その構成要素である情報源、センサノード出力、ネットワークなどが不安定、不確実、低電力容量、低計算容量、低通信資源量など、厳しい制約条件のもとにあることで、これを前提としてシステムの最適化を図る必要がある。そのためには、センサネットワークを実現するための理論・技術を確立すべく、後述するような研究課題に挑戦することになるが、特に重要なことは、センサネットワークが、協調と融合の概念の上に成り立っていることであり、このことがセンサネットワークの特徴となっている⁽¹⁾。

2. センサネットワークの概念

ここでまずセンサネットワークについて、その概要に触れてみることにする。

センサネットワークでは、基本的に数多くの小型センサノードと比較的少数のフュージョンセンターから成る。センサノードの位置は、あらかじめ決められたもの

小川 明 正員：フェロー 名城大学理工学部情報工学科
Akira OGAWA, Fellow (School of Science and Technology, Meijo University,
Nagoya-shi, 468-8502 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.89 No.5 pp.362-366 2006年5月

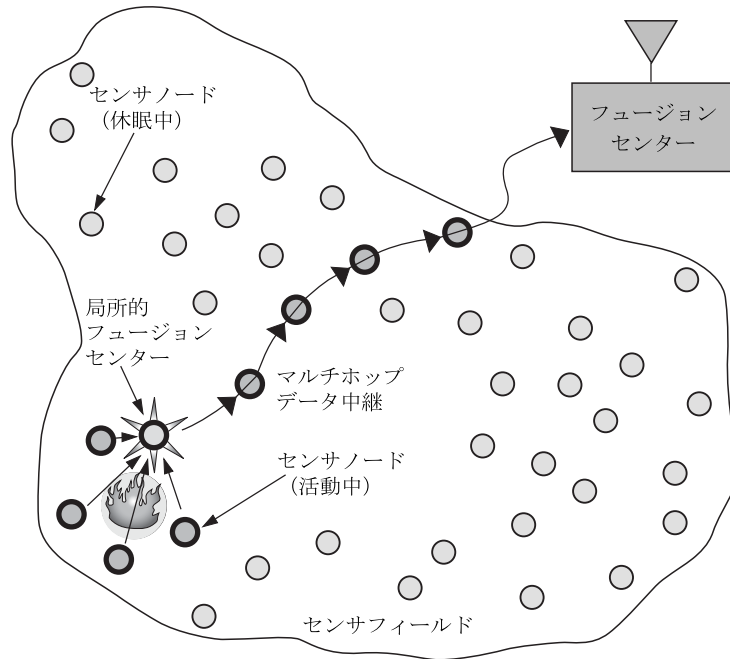


図1 センサフィールドの概念

ではなく、センシング対象地域（センサフィールドと呼ぶ）に散在し、それ自身が移動することもある。センサネットワークの地理的構成例を図1に示す^①。ここでは、幾つかのノードでセンシングが行われ、処理されたデータは、フュージョンセンターに送られる。その際、図に示されるようにデータは幾つかのノードで中継されてフュージョンセンターに到達する。すなわちマルチホップ伝送される。伝送経路は、図では単独となっているが、複数存在する場合もある。各ノードの位置について柔軟性を持たせるために、ノード間の通信は、アドホックネットワークのように自律的に構成される。観測、測定された情報は、最終目的端のフュージョンセンターで利用目的に合致した形に融合・加工されるが、図に示されるように、途中でローカルに情報が融合され、冗長性を取り除き、通信負荷を減らすことも考えられる。

センサノードは、図2に示すように、センシング機能とともに情報処理機能と無線通信機能、そして電源を有するのが通常である。このように複数の機能があるにもかかわらず、形状はできるだけ小型で、消費電力は低く、価格も安いことが望まれる。

センサノードを設計する上で考慮しなければならない要因は、拡張性、信頼性、柔軟性、電源の安定性などである。特に重要な要因は電源である。センサノードは、できるだけ小型であることが望ましく、そのためには電池を使わざるを得ない。将来的には、超小型で長寿命の電池や高能率の太陽電池の出現が期待されるところではあるが、その電源容量は厳しく制限されているのが現状である。したがって、ノード自身の寿命を長くすることは難しく、またその他の様々な要因（例えば、ノードの

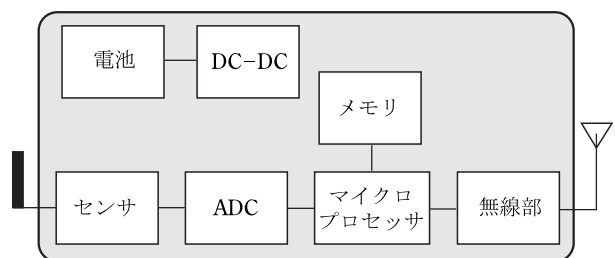


図2 センサノードの機能構成例

位置や姿勢についてほとんど制御できないこと、無線通信が多く雑音や干渉の影響を受けること、ノード自身の信頼性を高くできないこと、ノードが新たに投入されること）も重なって、その安定性を高く保つことは余り期待できない。それに加えて、情報処理能力や通信能力も制限される。

更にセンサノードで測定されるのは、温度、湿度、光、音響、磁界、圧力、振動、位置、速度、加速度などの物理量であるのが通常である。ところが、実際に必要になるのは、使用目的にかなった観測情報であることが多く、データベースの機能が必要となる。このような厳しい状況の中での確に目的を達成するためには、協調と融合、そして補完の概念をうまく使いこなすことが鍵となる。

3. センサネットワークにおける研究課題

厳しい制約条件のもとでシステムの最適化を図るためには、以下に示すような研究課題に挑戦する必要がある。

- ① ネットワークの存在下でのセンシング手法

- ② センサネットワークに関連する情報理論
- ③ 協調と融合の情報処理
- ④ ネットワーク構成とプロトコル
- ⑤ 位置検出手法
- ⑥ 低消費電力センサノードの実現

3.1 ネットワークセンシング⁽⁵⁾

従来のセンシングでは、ある単独で明確な目的に対応して、限られた地理的範囲内で、できるだけ正確で信頼度の高い測定が望まれるのが一般であった。一方、ネットワークの存在を前提としたセンシングでは、地理的に広範囲に広がり、各センサの測定精度は低くても、知的な自律的動作とともに協調動作のできることが望まれる。

3.2 センサネットワークに関連する情報理論

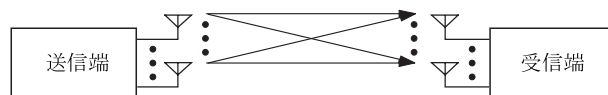
センサネットワークでは、ある情報源に対して行われるセンシングの結果が必ずしも正しくない場合があり、また複数のセンサによってセンシングが行われる場合がある。このような場合の情報検出すなわち分散検出とそれにかかわる状態推定問題について研究が行われている⁽⁶⁾。また、複数のセンサから得られた結果を融合した場合に対する情報量を最大化する条件が求められている。またセンサネットワークが多端子情報理論の立場からどのように理論的に定式化されるのかについて本特集でも取り上げられている⁽⁷⁾。

3.3 協調と融合の情報処理

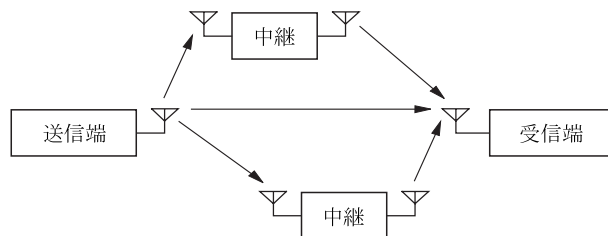
センサネットワークでの最も重要な概念が協調と融合である。様々な厳しい制限のもとでセンサネットワークがその目的を達成するためには、協調 (Collaboration) と融合 (Fusion) が欠かせない。

(1) 協調

協調とは、能力的に制限されたセンサノードを複数個協調させることで、例えば複数のセンサノードによって観測されたデータの相関性を考慮して情報処理を行うことによって、データの信頼性を高めようとするものである⁽⁸⁾。この際、どのノードと協調を行うべきかが問題となる。これに関して確定的なものや統計的のものがある。前者は、あるノードが他からの情報を受信できる機能を持つ場合、そのノードで他のノードからの事前情報を受信し、ノードを選択して協調処理を行う。他のノードの観測状況が分かるので、協調処理を確実に実行できるが、このための通信回線が必要になる。これに対して、後者のように、通信を行うことなく、統計的処理によって協調ノードの選択を行う方法がある。また、ノードの配置が密であれば、観測対象の近くに位置するノードを選択する方法も考えられる。



(a) スペースダイバーシチ



(b) 協調ダイバーシチ

図3 スペースダイバーシチと協調ダイバーシチの概念

複数のノードで観測されたデータの相関が高ければ、あえて協調を行わなくてもよいであろう。しかし、情報を伝送する通信回線で誤りを生じる可能性がある。このような場合に、協調は一種のダイバーシチとして機能し、観測精度の劣化を抑制できる効果がある⁽⁹⁾。

ダイバーシチは、図3 (a) に示すように、一般に送信機あるいは受信機に複数のアンテナを設けて複数経路で信号を伝送し、受信点で合成して信頼度を高める方法で、特にフェージング環境下で高い効果が期待できる。しかし、センサノードが小型で複数のアンテナを設置することは通常不可能である。そこで図3 (b) に示すように、分散配置されているセンサノードを中継点として、複数の経路を設定して信号を伝送する。このようなやり方を協調ダイバーシチ (Cooperative Diversity) と呼び^{(10), (11)}、各ノードの送信電力を低減できる効果が期待できる。

(2) 融合

センシングにおける融合とは、興味の対象となっている情報源に対して、複数個の観測結果から元の情報源の状態を推定することといえる。文献 (12) では、この融合について分かりやすくまとめられている。ここでは、幾つかの統計的推定手法について、センサネットワークでの環境条件に応じて、これらの手法がどのように適用されるかが示されている。ただ一般化された最適解を得ることは容易なことではなく、はん用性と性能のバランスのとれた処理アーキテクチャを模索することが重要と指摘している。

特定の応用を目指したセンサネットワークでは、基本的な融合理論に基づき、どのように融合を的確に果たしていくかが、最適なシステムを構築する鍵となる。

3.4 ネットワーク構成とプロトコル

センサネットワークには、前述したような様々な制限条件が存在する。ネットワークを構成するにあたっては、

そのことを前提とすると同時に、センサの状況と利用者側の要求を組み入れ、拡張性、信頼性、移動性、電力消費、寿命、データセントリック性などの設計要素を考慮しつつシステムの最適化を図る必要がある。ここでデータセントリック性とは、各ノードがあて名よりも観測の結果得られたデータによって接続されることをいい、センサネットワークの特徴の一つである。

ネットワーク構成については、階層性を持たせたノード配置⁽³⁾や、確率的に配置すること⁽¹³⁾などこれまでに多くの研究や提案がなされている。センサネットワークでは、ノード同士を中継して情報を伝送するマルチホップ構成が通常であるが、多くのノードを中継することは、電力的に不利となることが予想され、ホップの長さを長くすることが検討されている^{(14), (15)}。

センサネットワークのプロトコル階層構造は、従来のネットワークと同様なものであるが、各ノードの電力消費状況、位置の移動状況、タスク配分などの管理を前提にして各層のあり方を検討する必要がある。物理層、データリンク層、ネットワーク層では、以下に述べるようなセンサネットワーク特有の条件を考慮する必要がある。

(1) 物理層

小型、低消費電力のセンサノードに適し、距離の四乗に比例して減衰するといわれている厳しい伝搬条件に耐え得る変調方式の実現が望まれる。その例としてUWB⁽¹⁶⁾があるが、様々な条件に対応するには更なる研究が必要である。

(2) データリンク層

データリンク層では、MAC (Media Access Control) プロトコルと誤り制御を担う。センサネットワークにおけるMACとしては、多数のノードが通信資源を共用する中で、ネットワークの全エネルギー最小化を考慮して組み立てる必要がある。MACプロトコルとして、スケジューリング型、衝突回避型、競合型、ハイブリッド型などがあり、それぞれに対し多くの提案が行われているが⁽³⁾、種々の環境条件や要求条件に的確に対応するためには更なる研究開発が必要であろう。

フェージングと電力制限の厳しいセンサネットワークでは、誤り制御の採用が不可欠である。ここでは、エネルギー効率が良く、計算負荷の少ない誤り制御が望まれ、硬判定復号で訂正能力が高く、誤り検出能力を併せ持つ方式や、ノードに復号機能を持たせない方式が考えられる⁽¹⁾。

(3) ネットワーク層

センサネットワークでのネットワーク層におけるルーチングプロトコルは、従来のアドホックネットワークのルーチングプロトコルが参考になるものの、そのまま適

用することは困難とされている。それは、センサネットワークのノードの数が非常に多く、密に配置され、しかも絶えず変化するためである。その上で、高い電力効率、データセントリックで属性ベースのアドレス、ローカルフュージョン (局所的にデータを融合すること)、位置推定、リアルタイム性を考慮して設計する必要がある。

これまでに、種々のセンサネットワーク用ルーチングプロトコルが提案され^{(4), (17)}、それぞれに特徴を持っている。今後はアプリケーションとの対応付けを明確にし、適応的に動作させることと協調性を重視した検討が望まれる。

(4) トランスポート層及びアプリケーション層

もしインターネットやその他の外部ネットワークに接続することが要求される場合には、エンド間での信頼性を維持するためにトランスポート層のプロトコルの検討が必要となる。

アプリケーション層に対するプロトコルとしては、センサ管理、タスクの割当てとデータの通告、利用者からの問合せ、データの配布、セキュリティなどに関するものがあるが、これらに対する検討は進んでいない⁽⁴⁾。

3.5 位置検出手法

ネットワークセンシングに特徴的で不可欠な機能は、位置検出・推定機能である。数多くのノードそれぞれで観測されたデータは、その地理的位置が明示されていないと役に立たない場合が多い。よく知られた測位手法としてGPS (Global Positioning Satellite) を用いるものがあるが、屋内での測位には、無力である上に、小型で低消費電力が要求されるノードにとってGPS受信機は大きな負担となる。GPSに代る測位方法としては、超音波を用いるものがある⁽¹⁸⁾。そのほか測位装置を装備せずに位置を推定する手法が幾つか提案されている⁽⁵⁾。更に簡単な手順で確実な位置推定が可能となる手法の研究が行われている。

3.6 低消費電力センサノードの実現

センサネットワークでは、小型で低消費電力のセンサノードを開発する必要があり、Micro Electro Mechanical System (MEMS) 技術⁽¹⁹⁾の急速な進歩によって、それが現実のものとなってきているが、機能や特性の更なる向上を目指して、幾つかのプラットフォームやテストベッドが開発されてきている^{(20), (21)}。

4. 研究開発状況

センサネットワークは、世界的に注目を集めており、我が国においては、計測自動制御学会、電気学会、情報

処理学会, 電子情報通信学会などに関連研究グループが設置され, センサネットワークやネットワークセンシングについて研究討論の場を提供している. 総務省においては, 調査研究会が設けられて, 主としてセンサネットワークの応用面と社会的影響について検討が加えられた⁽²²⁾.

欧米においても, センサネットワークの研究は, 積極的かつ広範囲に進められている. 2005年1年間で13もの関連国際会議が世界各地で開催され⁽²³⁾, 盛んな研究開発とセンサネットワークに対する関心の高さを示している.

5. む す び

本稿では, センサネットワークの総論として, その基本的性質に言及し, ネットワークを構成することにかかわる設計要素とプロトコルの概要について述べた. それからセンサネットワークの最大の特徴といえる協調と融合の概念を示しつつ, それに関連した研究課題について言及した. またその一方で, センサネットワークとそれを構成するセンサノードにおける電源容量, 情報処理能力, 通信能力などの厳しい資源的制約条件を紹介した. これらの条件を克服するのに有効とされる協調と融合の概念に基づいた幾つかの理論, 技術を紹介した. ただ現在までにこの面での研究によって得られた成果はまだまだ十分とはいえず, 更なる研究の推進が望まれる.

それと同時に, 情報源の性質と使用目的を十分にわきまえて, 最適なセンサネットワークを構築するには, 様々な技術を的確に駆使できる手法やアルゴリズムを開発することも極めて重要と考えられる.

文 献

- (1) A. Ogawa, T. Yamazato, and T. Ohtsuki, "Information and signal processing for sensor network," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E87-A, no.10, pp.2599-2606, Oct. 2004.
- (2) C.Y. Chong and S.P. Kumar, "Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges," Proc. IEEE, vol.91, no.8, pp.1247-1256, Aug. 2003.
- (3) J.A. Stankovic, T.E. Abdelzaher, C. Lu, L. Sha, and L.C. Hou, "Real-time communication and coordination in embedded sensor networks," Proc. IEEE, vol.91, no.7, pp.1002-1022, July 2003.
- (4) I.F. Akyildis, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," IEEE Commun. Mag., vol.40, no.8, pp.102-114, Aug. 2002.
- (5) 安藤 繁, 田村陽介, 戸辺義人, 南 正輝, センサネットワーク技術, 東京電機大学出版局, 2005.
- (6) 山里敬也, "センサネットワークを支える情報理論," 信学技報, IT 2005-62, pp.17-26, Nov. 2005.

- (7) 大濱靖匡, センサネットワーク特集 "2-1 多端子情報理論とセンサネットワーク," 信学誌, vol.89, no.5, pp.367-373, May 2006.
- (8) F. Zhao, J. Liu, L. Guibas, and J. Reich, "Collaborative signal and information processing: An information-directed approach," Proc. IEEE, vol.91, no.8, pp.1199-1209, Aug. 2003.
- (9) 小林健太郎, 山里敬也, 岡田 啓, 片山正昭, "センサネットワークにおける観測データの相関を用いた伝送品質の改善," 信学論(A), vol.J88-A, no.12, pp.1442-1451, Dec. 2005.
- (10) J.N. Laneman, G.W. Wornell, and D.N.C. Tse, "Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," IEEE Trans. Inf. Theory, vol.49, no.10, pp.2415-2425, Oct. 2003.
- (11) A. Ribeiro, X. Cai, and G.B. Giannakis, "Symbol error probabilities for general cooperative links," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol.4, no.3, May 2005.
- (12) 鏡 慎吾, 石川正俊, "センサフュージョン—センサネットワークの情報処理構造—," 信学論(A), vol.J88-A, no.12, pp.1404-1412, Dec. 2005.
- (13) 石塚美加, 会田雅樹, "センサネットワークにおける耐故障性の高い確率的配置の実現," 信学論(B), vol.J88-B, no.11, pp.2181-2191, Nov. 2005.
- (14) M. Haenggi and D. Puccinelli, "Routing in ad hoc networks: A case for long hop," IEEE Commun. Mag., vol.43, no.10, pp.93-101, Oct. 2005.
- (15) 斎藤 洋, 梅比良正弘, 守倉正博, "広域ユビキタスネットワークインフラストラクチャに向けた考察," 信学論(B), vol.J88-B, no.11, pp.2128-2136, Nov. 2005.
- (16) 李 選翹, 前木 陽, センサネットワーク特集 "3-2 センサネットワーク向け UWB 無線規格 IEEE802.15.4a," 信学誌, vol.89, no.5, pp.384-389, May 2006.
- (17) J.N. Al-Karaki and A.E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: A survey," IEEE Wirel. Commun., vol.11, no.6, pp.6-28, Dec. 2004.
- (18) 南 正輝, 森川博之, 青山友紀, "超音波を用いた自律分散型位置検出システムの設計と実装," 信学論(A), vol.J88-A, no.12, pp.1432-1441, Dec. 2005.
- (19) 江刺正喜, センサネットワーク特集 "4-1 センサネットワークに関連する MEMS 技術," 信学誌, vol.89, no.5, pp.395-398, May 2006.
- (20) 森川博之, 南 正輝, "実空間指向ユビキタスネットワーク," 信学論(B), vol.J88-B, no.11, pp.2137-2146, Nov. 2005.
- (21) P. De, A. Raniwala, S. Sharma, and T. Chiueh, "Design consideration for a multihop wireless network testbed," IEEE Commun. Mag., vol.43, no.10, pp.102-109, Oct. 2005.
- (22) 総務省の「ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会」に関するウェブサイト, http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/chousa/yubikitasu_c/index.html
- (23) 電子情報通信学会センサネットワーク研究会ホームページ, <http://www.ieice.org/~sn>

(平成 18 年 1 月 11 日受付 平成 18 年 1 月 30 日最終受付)



おがわ あきら
小川 明 (正員: フェロー)

昭 35 名大・工・電気卒. 国際電信電話(株)を経て, 昭 63 名大・工・電気・教授. 平 12 名城大・理工・情報・教授. 工博. 無線通信方式, 衛星通信方式, スペクトル拡散通信方式, センサネットワークなどの研究に従事. 本会センサネットワーク時限研究専門委員会委員長