

# 多用途向け有線センサネットワーク： S-wire

## Multipurpose Practical Sensor Network: S-wire

あらまし

センサネットワークとは、至る所にセンサが配置され、そこから様々な情報を収集するためのネットワークである。その適用分野は、畑や水田から河川やがけなどの危険区域、またオフィス、病院、家庭など様々であり、土中、水中や構造物への埋込みなどの要望もある。しかし、これまでのセンサネットワークでは、無線を利用しているためこれらの要望に応えることができない。そのため、富士通は、有線式のセンサネットワークであるS-wireの研究・開発を行っている。S-wireとは、各ノードは有線で複数のノードに接続されており、有線によりデータ通信および電源の供給を行う方式である。有線のため土中、水中や構造物などの埋込みも可能である。また、切断などの検出や経路の自動生成も可能である。本稿では、実用的なセンサネットワークの要件を議論し、S-wireの詳細、実装およびアプリケーションについて述べる。

Abstract

Sensor networks collect data from sensors that are deployed everywhere, ranging from fields, rivers, and dangerous places to offices, hospitals, and homes. For such locations, sensor networks may be embedded in soil, water, and buildings. Conversely, current sensor network systems that utilize radio communications cannot be used in soil, water, and buildings. In order to use a sensor network in such places, a sensor network method that enables use under said conditions is urgently needed. Therefore, we developed a new sensor network method called the S-wire method that employs wired communication among nodes. In S-wire, each node is connected to the other nodes with wire. Moreover, power is supplied and communication performed through the wire. S-wire thus enables sensor networks to be embedded underground, underwater, and in physical structures. Moreover, wire breakage can easily be detected and paths generated automatically. This paper describes the details and applications of S-wire.



岩尾忠重  
(いわお ただしげ)

ユビキタスソリューション部 所属  
現在、センサネットワーク開発に従事。



山田健二  
(やまだ けんじ)

富士通九州ネットワークテクノロジーズ(株) 第四開発部 所属  
現在、センサネットワーク開発に従事。



野村浩司  
(のむら こうじ)

ユビキタスソリューション部 所属  
現在、センサネットワーク開発に従事。



細川武司  
(ほそかわ たけし)

ユビキタスソリューション部 所属  
現在、センサネットワーク開発に従事。

## まえがき

ユビキタスコンピューティングを実現する上で、様々な状況を検出するために、センサネットワーク<sup>(1)</sup>と呼ばれる分野がある。センサネットワークとは、至る所にセンサが配置され、そこから様々な情報を収集するためのネットワークである。センサネットワークは、様々な物理現象を検知するため、部屋や建物、工場や農場、ダムや橋、河川などあらゆる所に張り巡らされ、様々な状況を把握することを可能とする。それにより、危険を早期に察知し、状況に応じた行動を起こすことができるなど、様々な分野でその応用が期待されている。

現在、研究されているZigBee<sup>(2)</sup>やMOTE<sup>(3)</sup>などのセンサネットワークの多くは、伝送メディアに無線を用いる。これらのシステムは、複数のセンサと無線モジュールおよび電池を内蔵したノードと呼ばれる複数のモジュールから構成される。各ノードが検知した情報（以下、センサ情報）を特定のサーバに転送する。このとき、ノード間でデータの中継を行い、電波が直接届かない場所にあるノードの情報も途中の複数のノードが中継することによりセンサ情報を取得することが可能となる。ただし、無線を利用したセンサネットワークは通信上の問題や電池寿命の問題があり、実用化には課題が多い。富士通では、この問題を解決する新たなセンサネットワークとして、有線を利用したセンサネットワークS-wireの研究・開発を行っている。

本稿では、まずセンサネットワークの要件、富士通のセンサネットワークの概要について述べ、有線式センサネットワークのモデルとプロトタイプ、そして応用例を紹介する。

## センサネットワークの要件

### 実用化のための問題点

実用化を目指したセンサネットワークを実現するためには、以下の問題について考える必要がある。

- (1) 通信品質はセンサの密度に非依存であること  
センサの配置される場所によっては、土中、水中や構造物に埋め込まれる場合がある。センサの破壊なども考えられる。このため通信メディアは、いかなる環境でも利用できるものが必要である。また、ノードの破壊などによる通信経路の遮断が発生して

も、別経路によりデータを転送できる必要がある。さらに、センサデータの大量発生が起こっても負荷分散に対応できる必要がある。

- (2) 大量にあるセンサの管理が容易であること

大量にあるセンサは人による管理が困難である。ここでの管理とは、センサの配置場所やセンサやネットワークの破壊、切断、異常の検知である。とくに土中や構造物の中に埋め込まれた場合は、人が直接見ることができない。センサ配置やネットワークの異常通知などを容易に行うことができる必要がある。

- (3) 検知した情報がどのセンサから発生したのかを特定できること

得られたセンサ情報がどのセンサから発生したものを特定できる必要がある。多くのセンサネットワークシステムはノードに固有IDを持ち、発信する情報にノードIDを付加することで情報元を特定する。しかし、この方式では、どのIDを持つノードをどこに配置したかを一つ一つ管理する必要がある。数が多くない場合は人力で管理可能であるが、広範囲・高密度で設置を行う場合一つ一つのノードについてIDを記録することはコストが高い。センサネットワークとして敷設が容易で、ノードにIDなどの区別はなく、均一のノードを自由に接続しネットワークを作成しても情報発生位置が分かる仕組みが必要である。

### 実用化のための要件

前節で述べた問題点を解消し、実用的なセンサネットワークを実現するには、以下の要件を満たす必要がある。

- (1) 通信メディアは土中、水中、構造物であっても利用できること。
- (2) 密度に独立して通信帯域が確保できること。
- (3) ノードの破壊や通信路の切断が起こっても別経路により情報伝達できること。
- (4) 切断、破壊など異常が発生した時に即座に通知できること。
- (5) 大量のセンサ情報が発生しても負荷分散できること。
- (6) センサおよびノードの位置の特定が容易であること。
- (7) 敷設が容易であること。

富士通のセンサネットワーク概要

富士通では、これまでアドホックネットワークの視点からセンサネットワーク<sup>(4)</sup>を研究してきた。アドホックネットワークとは、自律的にネットワークを構成する技術である。センサネットワークとして無線だけでなく有線を用いたネットワークの研究も行っている。有線式センサネットワークは他社にないユニークなシステムであり、実用性を重視したセンサネットワークであるS-wireの開発を進めている。有線式センサネットワークとは、各ノードは有線で複数のノードに接続されており、有線によりデータ通信および電源の供給を行う方式である。各ノードは、センサインタフェースを持ち様々なセンサを接続することができる。センサデータは、ノードが自律的に経路を作成し、サーバまで転送される。ノード間の接続が切れた場合、即座に経路を切り替え、切断したこと自体がサーバに通知される。ノードは自由に接続、切断することが可能であり、柔軟なネットワークを作ることができる。S-wireでは、ノードの密度が上がれば上がるほど経路が増え、見かけ上の伝送容量が増える。また有線であるので、ノイズの混入も少なく高信頼のデータ通信が可能であり、これまで設置が不可能であった水中、土中、構造物への埋込みにも対応できる。さらに、有線による電源供給であるため、各ノードがそれぞれ電源を持つ必要がない。そのためS-wire自体はコンパクトに実装することが可能であり、様々な場所で利用することができる。

有線式センサネットワークモデル

有線式のセンサネットワークモデルの概要を図-1に示す。ノードは複数のノードと有線接続されており、有線を通じて電源供給およびデータ通信を行う。ノードが持つほかのノードへの接続口をジョイントと呼ぶ。複数のノードから構成されるネットワークは、複数のゲートウェイを介して、より高速なネットワークへ接続される。ノードはセンサインタフェースを持ち、様々なセンサを接続することができる。ノードから発生されたセンサ情報は、どのゲートウェイから出力してもよいものとする。また、電源もネットワークに複数箇所から供給することが可能である。

このモデルは、前述の七つの要件を満たす。

- (1) 有線であるので、土中、水中での利用が可能である。
- (2) ノード密度が上がったとしても、それぞれ独立した有線による通信路を持つため帯域は確保される。
- (3) ノードの破壊などが起こっても動的に経路を変更する。
- (4) 破壊や異常が発生したとき自動通知する。
- (5) 負荷が高まったとき迂回路を使いデータをゲートウェイまで転送する。
- (6) IDがなくゲートウェイからの相対位置による論理的な位置の特定が容易である。
- (7) 応用に応じてシート状や線状にすることでノード一つ一つを設置する必要がない。

以下に有線式センサネットワークモデルの基本機能について述べる。

経路検索

一つのノードから見たとき、ネットワークには複数のゲートウェイが存在する。また、一つのゲートウェイへの経路も複数存在する。ノードが $n$ 本のジョイントを持ち、 $m$ 個のノードがあるネットワークであるとき、一つのノードから一つのゲートウェイまでの経路数は $m^n$  オーダ数であり、これをすべてのノードについて行うと $m \times m^n (= m^{n+1})$  となり、一つ一つの経路の発見は指数オーダのコストがかかる。経路の発見には、効率良い発見手法が必要となる。

経路はノードからゲートウェイ方向とゲートウェイからノード方向が必ずしも対称であるわけではない。センサ情報の取得が目的であることから通信方

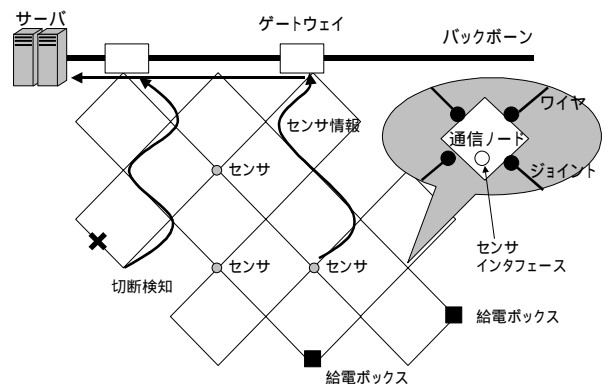


図-1 有線式センサネットワークモデル  
Fig.1-Overview of wired sensor network model.

向としてノードからゲートウェイ方向のセンサ情報の発生が頻繁であり、ゲートウェイからノード方向の情報の流れは設定情報などと想定できる。ノードからゲートウェイ方向の情報とゲートウェイからノード方向の情報の流れは対称でなく、ノードからゲートウェイ方向の経路を優先した非対称の経路を効率的に作成する必要がある。

経路作成概要を図-2に示す。各ノードはジョイントごとにゲートウェイまでの重みテーブルを持つ。ここでの重みとは、経由するノードの数（ホップ数）である。この重みテーブルをもとにノードが情報の転送を繰り返すことによりゲートウェイまで情報を転送する。この重みテーブルの作成がゲートウェイまでの経路検索となる。

経路は以下の手順で作成される。

- (1) ゲートウェイから経路作成メッセージが隣接するノードに分配される。経路作成メッセージは、ホップ数を含む。
- (2) 経路作成メッセージを受けたノードはアルゴリズム *update* に従い経路作成メッセージを隣接ノードに転送する。
- (3) メッセージが転送されなくなるまで(2)を繰り返す。

このアルゴリズムでは、ノードが持つジョイント数を  $n$ 、 $m$  個のノードと一つのゲートウェイがネットワークの存在する条件で、 $n \times m$  個のメッセージが発生することになり、ノード数に対し線形増加となる。複数のゲートウェイが存在する場合、それぞれのゲートウェイからの重みが等しくなるノードまで経路作成メッセージが分配される。また、新たにノードを追加したとき、追加されたノードは、接

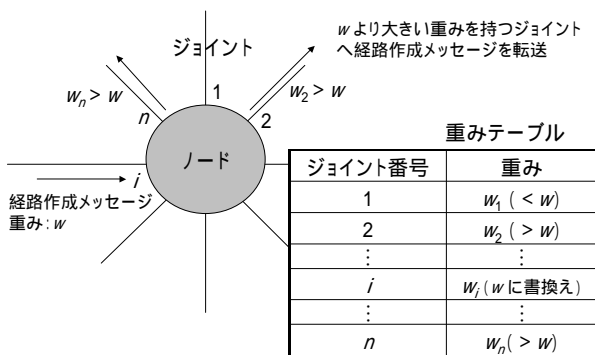


図-2 経路作成概要

Fig.2-Creation of multiple routing paths.

続したノードから経路作成メッセージを取得し、ゲートウェイへの経路を作成する。複数のノードが接続されたネットワークを接続した場合も同様のロジックにより、ゲートウェイへの経路が作成される。

センサ情報の転送

センサ情報は、各ノードが持つ重みテーブルに従い転送される。基本的には、欲張り法による最短経路で転送を行う。欲張り法とは、各ノードの最も軽い重みを持つジョイントを通過させていく方法である。

センサネットワークでは、経路途中でノードの破壊、ケーブルの切断など様々な障害が考えられ、必ずしも最小の重みを持つジョイントだけに送ってもゲートウェイに到達できるわけではない。そこで、本モデルでは、途中の経路が破壊、切断されたとしても別の経路を利用するアルゴリズムを採用する。

情報転送ロジックの概要を図-3に示す。概念的には、Tree検索をノードが分散協調して行う。各ノードはメッセージを受信すると次々と転送アルゴリズム *forward* を実行し、メッセージをゲートウェイまで転送する。

このアルゴリズムは、複雑にネットワークが破壊され袋小路状であっても、ネットワークとして1箇所でもつながっていれば、木構造の検索によりその経路を発見することができる。一度発見した経路は、各ノードが重みテーブルに学習し、以後その経路を利用する。また、このアルゴリズムは負荷分散にも対応する。ネットワーク負荷が高くなると、ノードがほかのノードからのメッセージを受信しにくくなる。とくに重みの軽いノードへはメッセージの集中

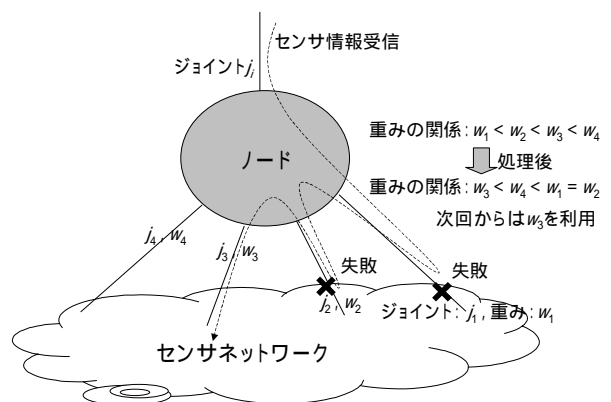


図-3 情報転送ロジック概要

Fig.3-Overview of logic for forwarding information.

が起りやすい。このアルゴリズムでは重みの軽い順にメッセージの送信を試みる。重みの軽いノードへのメッセージ送信が失敗すると、つぎに重みの軽いノードへの転送を開始する。これにより、ネットワーク負荷が高い場合、別の経路を使ってデータの転送を行う。負荷分散時の経路の迂回は、一時的であり、ノードの経路学習対象にならない。したがって、ネットワーク負荷が低い場合は、もとの経路を利用する。ただし、ゲートウェイノードの数が1の場合、そのゲートウェイノードにメッセージが集中することになりその効果は期待できない。負荷分散は、複数のゲートウェイが存在するとき有効である。

電源容量

ネットワークの消費電力  $W$  は、つぎの式で求めることができる。

$$W = mw_n + \sum_{i=1}^m w_{si}$$

ノードあたりの消費電力  $w_n$ 、ノード  $i$  に接続されているセンサの消費電力  $w_{si}$  である。ネットワークには  $m$  個のノードが存在する。

ネットワークの電源供給は、以下を満たさなければならない。

$$W < W_{\max} = \sum_{i=1}^n w_i \quad \dots (1)$$

$$W < nVI_{\max} \quad \dots (2)$$

各電源ユニットの最大電力容量  $w_i$  であり、供給電圧  $V$ 、ケーブルに流せる最大電流容量  $I_{\max}$  であり、電源ユニット数  $n$  である。(1) ではネットワーク消費電力より電源供給能力が高くなければならず、(2) では電源ユニットを接続するケーブルの電流

量が最大値を超えてはならないことを示す。ネットワークへの電源供給が一部に偏ることでケーブルの電流量が増加してしまうことを避けなければならない。ネットワークへの電源供給は、ネットワークに分散し、平均的に設置する必要がある。

ノードの管理

センサネットワークを利用したアプリケーションは、どのノードから情報が発生したかを明確に知る必要がある。

このモデルでは、ゲートウェイからの相対位置によりノードの位置の特定を行う。ノードはIDを持たず、ノード単体ではノードの区別はない。ノードをジョイントに接続することで相対的な位置関係が発生する。ゲートウェイを原点として、ノードの接続関係から相対位置をノードの論理的な位置とする。

S-wireの実装

有線センサネットワークモデルの実装として富士通はS-wireノードを開発している。S-wireのプロトタイプを図-4に示す。プロトタイプノードはジョイントを  $xy$  方向にそれぞれ  $+$  - 方向のジョイントを持ち、センサインタフェースとデバッグ用コネクタを持つ。大きさは  $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$  基板に一つのMPU (Micro Processing Unit) で構成する。

実際に複数のノードを接続し、経路作成、動的経路変更、ケーブル切断、ノード接続などの基本機能は動作検証を行い、モデルのとおり動作することを確認した。

アプリケーション

S-wireのアプリケーションは幅広い。これまで利用が難しかった場所でのセンサネットワークの利用

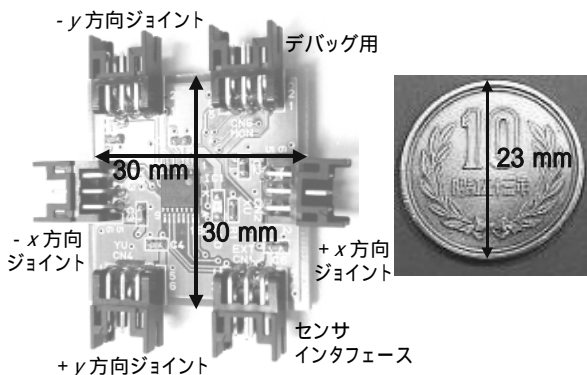


図-4 S-wireプロトタイプ  
Fig.4-Prototype of S-wire node.

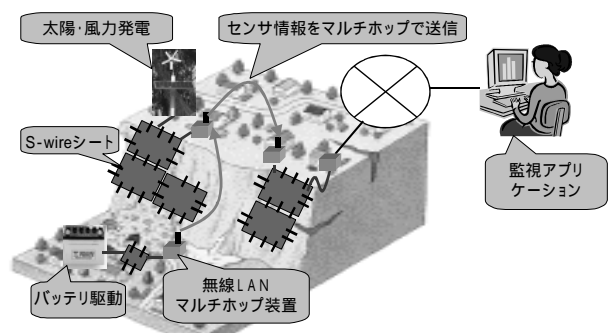


図-5 S-wireを使用したかけ崩れ監視システム  
Fig.5-Landslide watcher using S-wire sheets.

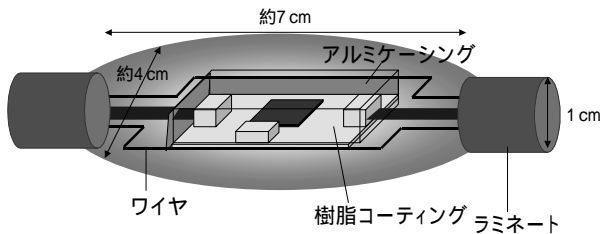


図-6 畑・水田用S-wire ノード  
Fig.6-S-wire node for (rice) fields.

が可能となる。例えば，S-wireをシート状に配置し，そのシートに含水量や加速度センサを配置し，検知対象エリアにシートをかぶせることで，きめ細かくセンシングすることができ（図-5），がけ崩れや災害時危険家屋などの危険予測を可能とする。図-6は畑や水田用のS-wire ノードである。温度，加速度，圧力，水分量センサを持つ。ケーブルに2～10 mごとに防水加工したノードがあり，このケーブルを水田に沈めたり，畑に埋めたりすることにより，侵入者の感知や水位，畑の水分量などを測定することができる。これらについて実際製作を進めている。

## む す び

本稿では，有線式センサネットワークS-wireについて述べた。S-wireは，土中，水中，構造物への埋込みといった，これまでセンサネットワークでは設置が困難であった領域にも適用可能である。また，経路を複数持つことにより堅ろうかつ高信頼のネットワークである。現在試作が終わり機能的な確認が完了した。今後実際の畑や水田，がけなどを対象にした実装のノードを製作し，実際の現場での検証を行う予定である。

## 参 考 文 献

- (1) J. Jong et al. : Incremental Network Programming for Wireless Sensors . IEEE SECON 2004 .
- (2) ZigBee Alliance .  
<http://www.zigbee.org/en/index.asp>
- (3) Crossbow TECHNOLOGY INC . : MoteWorks software platform .  
<http://www.xbow.com/Products/productsdetails.aspx?sid=64>
- (4) T. Iwao et al. : A Control Model of Multi-purpose Sensor Networks by Policies . The 2005 International Conference on Aceive Media Technology (AMT2005) , Kagawa , 2005 , p.429-434 .