

センサーネットワーク

(株)NTTデータ 技術開発本部
副本部長 山本 修一郎

はじめに

ユビキタス・ネットワーク社会では、超小型チップがいたるところにあるモノに浸透していく一方で、モノの属性や状態に関する情報をユビキタス・ネットワークで活用できるようになっていく。センサーネットワークは、自ら電源を持つアクティブ型の超小型チップから構成されるユビキタス・ネットワークである。ユビキタスネットワークフォーラム^[1]には、様々なモノに超小型チップを付与することを前提にした、ユビキタス・ネットワークを実現するために必要となる、技術課題を検討する超小型チップネットワー

キング専門委員会がある。この超小型チップネットワークキング専門委員会ではこれまで図1に示すように、超小型チップを付与されたモノが通信機能を持ち、柔軟なネットワークを構成する世界を想定して、チップ、プロトコル、IDについて技術課題を整理してきたが、昨年度はセンサーネットワークについても調査を実施した。総務省も「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」を平成16年3月に発足させるなど、センサーネットワークに関する研究が急速に盛んになっている。

米国では、IEEEによるWireless

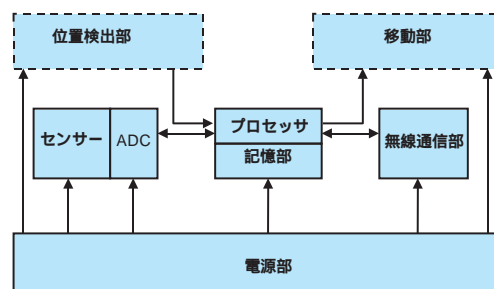


図2 センサーノードの構成

Personal Networkに関する標準化や、インテルによるMEMS技術を用いたセンサーノードMoteのシングルチップ化など、センサーネットワークの研究が従来から進んでいる。MITのTechnology Review誌では、将来社会に最も大きな影響を与える技術の一つとしてセンサーネットワークを挙げている^[2]。最近もCACMの6月号が、ワイヤレスセンサーネットワークを特集した^[3]。IEEEのSpectrum誌の7月号でも、センサーがいたるところに配置される社会を「センサー国家」として、技術面だけでなく社会的な影響についても解説している^[4]。

このようにセンサーネットワーク技術は今後も大きく発展する可能性があり、ポストRFIDとして将来性が注目される。本稿ではこのようなセンサーネットワークについて紹介しよう。

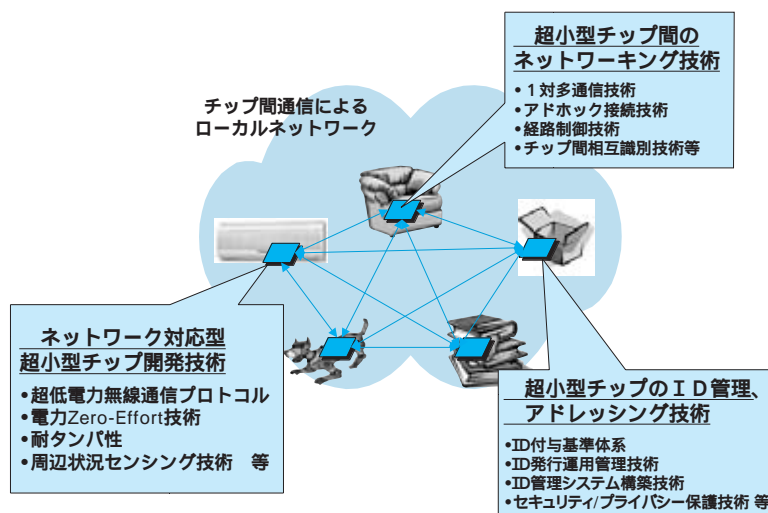


図1 超小型チップネットワークキング専門委員会の検討課題

センサーネットワークとは

無線センサーネットワークは、複数のセンサーノードから構成される無線ネットワークである。センサーノードには、図2に示すように周囲の環境を検知するセンサー機能、近距離無線通信機能、AD変換機能、演算機能（プロセッサ）、データ管理機能、電源がある。またセンサーの位置を検出したり、移動させるための機能も必要になることがある。

センサーには人間の五感で知覚できる情報だけでなく、人間が直接知覚できない紫外線、赤外線、超音波、化学物質などの情報を検知できるものもある。このようなセンサーから構成されるセンサーネットワークの属性を整理すると表1のようになる。

表1 センサーネットワークの属性

センサー	規模	小：MEMS / 大：レーダ、衛星
	個数	小/大
	型	受動：音響、震度、ビデオ、IR、磁気 能動：レーダ
	構成	同種：同種のセンサーだけから構成 異種：多種センサーから構成
	密度	密、疎
	配置	固定、計画的：工場NW アドホック：空中散布
	移動	固定：震度センサー 移動：移動体上のセンサー
監視対象	広がり	広域：環境監視 狭域：目標追跡
	移動性	静的、動的
	協調性	協調：航空制御 非協調：攻撃目標
運用環境	環境の厳しさ	良性：工場内 悪性：戦場
NW環境	網種別	無線、固定
	帯域	広帯域、狭帯域
アーキテクチャ	処理方式	集中：センターで情報処理 分散：センサーや中継サイトで情報処理 ハイブリッド：集中・分散の組合せ
電源	制約	あり：小型センサー なし：大型センサー

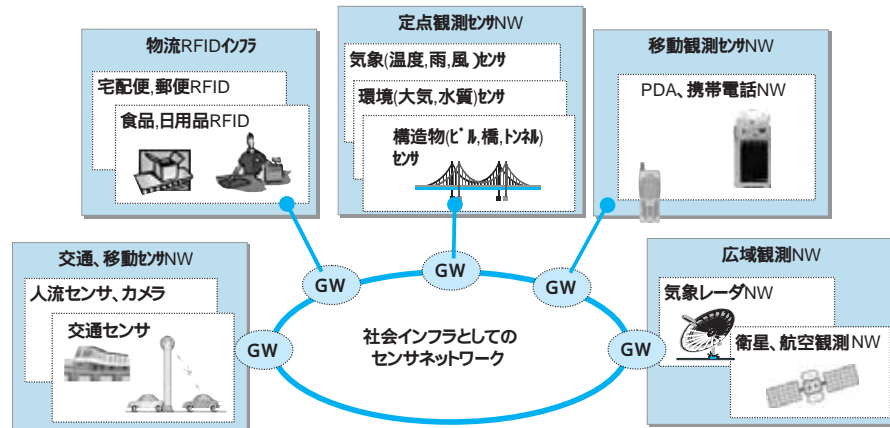


図3 センサーネットワークのイメージ

センサーネットワークを特徴付ける属性には、センサーノード、センサーが監視する対象、運用環境、ネットワーク環境、情報システムのアーキテクチャ、電源がある。センサーノードの属性としては規模、個数、型、構成、密度、配置、移動などがある。

センサーネットワークを用いたユ

ビキタス・サービスでは、センサーで、どのように実世界の置かれた状況の意味を理解できるかが重要になる。また、そのために多種多様なセンサーが開発されていこう。

このようなセンサーによってもたらされる様々な情報が、センサーネットワークで流通していくイメージを図3に示す。センサーネットワークは、環境モニタリング、防災、食品の安全性確保、安心安全を実現する公共分野から活用が始まっていくと思われる。

将来、大規模、低消費電力、低コストのセンサーネットワークの構築ができると、センサーがつけられた機器の状況に関する情報をM2Mで流通させることにより、ホームオートメーションやオフィスオートメーションだけでなく、サプライチェーンの効率化にも大きく貢献する。たとえば、SCMで重要となる正確かつ効率的な物流網の構築や、個人の状況に合わせた最適なサービスを提供するビジネスなどが始まり、社会を活性化する基盤的なユビキタス・

サービスとなるだろう。

センサーネットワークの発展段階^[5]

センサーネットワークの研究開発は図4に示すように1980年代から始まっており、必ずしも新しい技術ではない。第1世代(1980~1999年、過去)のセンサーネットワークでは、靴箱くらいの大きさで、重さも数キログラムのセンサーを用いて個別的に情報を検出していた。ネットワーク構成もポイントポイントで2点間を結ぶかスター型であった。また電源には大きなバッテリーが必要で、寿命も数時間が限界だった。第2世代(2000-2003年、現在)のセンサーネットワークでは、センサーの大きさもカード入れくらいになり、数グラムの重量になってきている。ネットワーク構成もクライアント/サーバ型やP2P型になった。電源も小型化されて寿命も数週間と長くなってきている。第3世代

	過去 1980-1990年代	現在 2000-2003	未来 2010
大きさ 重量	●靴箱 ●キログラム	●カード入れ ●グラム	●塵 ●無視できる
ノード構成 トポロジー	●個別センシング ●2点間、スター型	●統合センシング ●C/S、P2P	●統合センシング ●P2P
電源 配置	●大型バッテリー、 数時間 ●車載、投下	●小型バッテリー、 数日間~数週間 ●手作業	●太陽電池、 数ヶ月~数年間 ●組込み、散布

CHEE-YEE CHONG and KUMAR, S.P., " Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges, " Proc. Of IEEE, vol.91, no.8, pp.1247-1256, August 2003.

図4 センサーネットワークの発展段階

(2010年頃、未来)のセンサーネットワークでは、センサーの重量を無視できるまで大きさが大幅に小型化されるだろう。また電源は、太陽電池などを利用して数年間持つようになると思われる。

センサーネットワーク階層

無線センサーネットワークのセンサーノードを階層的に分類すると、図5に示すように問題向きセンサー、汎用センサー、広帯域センサー、インターネットGWノードとなる^[3]。問題向きセンサーは数mm³の大きさの超小型チップ化されたセンサーで、消費電力は20mW程度である。このような超小型チップセンサーはSmartDustなどとも呼ばれる。たとえばセキュアタグを携帯機器につけておいて、携帯機器が所属する設備から離れると警告したりできる。カリフォルニア大学バークレー校のSpecノードでは、2.5mm四方のシリコンチップにRAM、CPU、通信機能、

インターネットGWノード	Webインタフェース データベース	数個
広帯域センサー	カメラ、マイク	数10個
汎用センサー	ドア、窓 動作センサ	数100個
問題向きセンサー	センサータグ	数1000個

図5 無線センサーネットワークの階層

センサーインタフェース機能を持つ。

汎用センサーは、数cm³から高々数10cm³の大きさまでの小型センサーノードで、消費電力は30~50mW程度である。カリフォルニア大学バークレー校のMoteノードが代表的な汎用センサーノードで、現在Moteは100以上の研究機関で利用されている。Mica2は最新の商用化版である。Mica2は多数のI/Oピンを持ち、セキュリティシステムで必要となる動作検出装置や、ドアセンサー、窓センサーと、簡単に接続できるなどほぼ完全に近いセンサーノードであろう。また、Mica2は数百個のSpecノードとも無線通信できる。

広帯域センサーでは、大きさは汎用センサーとほぼ同じで、カメラやマイクなど要領の大きなデータ資源を扱うため、消費電力が約200mWと大きくなり、データ転送速度も500Kbps程度が必要になる。広帯域センサーにはインテルのImoteがある。インターネットGWノードは、数メガバイトのRAM、数ギガバイトの

固定記憶を持ち、汎用センサーや広帯域センサーと通信するとともに、インターネットを介して他のシステムに対してこれらのセンサー情報を提供する。このようなGWノードの例にインテル社のStargateがある。

センサーネットワークノードを、消費電力とデータ転送速度の観点から比較すると図6のようになる。

アプリケーションごとに必要になるセンサーノードの個数は、アプリケーションによっても異なるが、問題向きセンサーが数千個、それを収容する汎用センサーで数百個、広帯域センサーが数十個、GWノードが数個になると想定されている。

センサーネットワークの技術課題^{[3][4][5][6]}

多重アクセス方式

超小型チップには、自ら電源を持つアクティブタグと、リーダライタから電源を供給されつつ動作するパッシブタグがある。アクティブタグは自ら電波を送信する機能を持つた

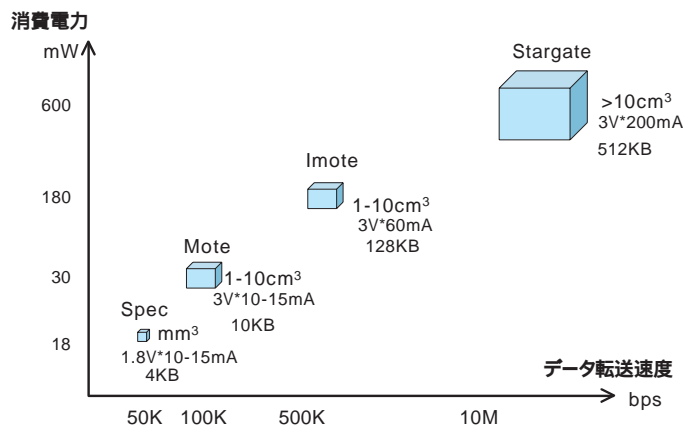


図6 センサーノードの比較

め、無線機の一つである。また、自らの電力で通信するため、通信距離が長く、リーダライタは複数のアクティブタグと多重アクセスするための技術が必要である。

多重アクセス方式として、時間を分割する方式、周波数を分割する方式、符号を分割する方式がある。アクティブタグではすべてのタグが定期的にデータ転送する必要はないため低電力化できる時間分割方式が採用されている。

低消費電力化技術

センサーに用いられる電源はバッテリーであり、消費電力が大きいとバッテリー交換の頻度が増したり、使い捨ての場合はその寿命が短くなるという問題が発生する。このためセンサーでは、低電力化技術が重要である。低電力無線方式では、通信に必要なエネルギーが距離の2乗に比例することを利用して、2地点間で直接伝送（シングルホップ）するのではなく、複数の短距離ノードを

中継するマルチホップで伝送する方式が考案されている。消費電力の低減化ではこのような通信プロトコルだけではなく、デバイスや回路の低電力化を含めたシステム全体の設計を考慮する

必要がある。また太陽電池や振動など環境からエネルギー供給を受ける技術も研究されている。

ネットワーク制御

MAC層におけるアクセス制御方式には、TDMA、CSMA/CAなどがある。TDMAは低消費電力化できるが大規模ネットワークの構築には向かないという問題がある。CSMA/CAは大規模ネットワークを構築できるが、送信ノード側で未使用ノードかどうかを個別にキャリアセンスして、未使用であれば直ちに送信を開始する方式であり、電力消費の面では効率的ではない。このため隣接ノード間でクラスタを構成して休眠スケジュールを同期させるなどCSMA/CAの電力消費を改良する研究が進められている。

またネットワークレベルの標準ではこれまでIEEE802.11、Bluetoothが用いられてきたが、今後は低消費電力のIEEE802.15.4、ZigBeeの利用が進むものと思われる。

アドホックネットワーク

多数のセンサーネットワークノードが連携するためには、センサーノード間の自律的なルーティングや品質確保等のネゴシエーションが効率的に展開される必要がある。これを解決する技術の一つがアドホックネットワーク技術である。

アドホックネットワークのルーティング技術としては、プロアクティブ型（テーブル参照型）、リアクティブ型（オンデマンド型）及び

その両方を複合化したハイブリッド型（複合型）がある。

柔軟なサービス形態に対応できるルーティングプロトコルを設計するためには、アクティブタグによる中継を考慮して可能な限りプロトコルをシンプル化するだけでなく、サービス探索プロトコルも必要になる。

またアドホックネットワークでは、アドレスを管理する主体がいないことや、動的なアドレスも必要になる。したがって、動的に変化する相手先のセンサーノードを指定するためのアドレス解決手段を検討する必要がある。

位置特定技術

災害が発生した地点にセンサーを配置する場合、センサーノードの位置を自律的に決定する必要がある。センサーノードを用いた位置特定技術には、電波、超音波など2種類の波の信号到達時間の差を利用して特定する方法、信号到達角度と三角測量の原理を利用して特定する方法、信号強度を用いる方法が知られている。信号到達時間を用いる方法では、2種類のI/Fとセンサーノード間の正確な時間同期が必要である。次に、超音波の信号到達角度を用いる方法では、センサーノード毎に複数の超音波センサーが必要となる。また、信号強度を用いた方法では、正確な距離を測るのが難しいという課題がある。

センサーネットワークOS

センサーノードで、様々なネット

ワークアプリケーションを実装するためには、センサーネットワークOSが必要である。カリフォルニア大学バークレー校が開発したMote、マサチューセッツ工科大学が開発したAMPS、ライス大学が開発したGNOMES、東京大学青山森川研究室のU-CubeなどではTiny OSなどの、イベント駆動型のリアルタイムOSを搭載している。また、リアルタイムOSで実績のある μ ITRONを、センサーネットワークOSとして用いることもできるだろう。米国ではDust, Inc.^[7]から産業用の製品も販売され、商業化へ向けた動きが活発化してきている。

センサー情報検索

センサーネットワークでは、センサーが検出した情報を検索するためのデータベース言語が必要になる。マサチューセッツ工科大学のTinyDBや南カリフォルニア大学のDiffusionなどが開発されている^[3]。TinyDBでは、次のようなSQL風の検索言語により、(0,0,100,100)で示される範囲のセンサーについて、サンプル区間を10秒間として明るさが1000ルクス以上のセンサーの平均温度を計算することができる。

```
SELECT AVG(temp) FROM
sensors
WHERE loc in (0,0,100,100) and
light > 1000 lux
SAMPLE PERIOD 10 seconds
```

センサー情報検索では、このような検索式をまずPCに対して要求する。PCでは検索式を構文解析して、

検索のルートとなるセンサーに対して検索処理を要求する。ルートノードから隣接するセンサーノードにこの検索要求が転送され、逐次的に検索要求がすべてのセンサーノードに到達する。各センサーノードにはTinyDBが搭載されており、検索処理の結果を隣接するセンサーノードに返却する。すべての検索結果が、ルートノードからPCに集められるとPC上の格納域に蓄積される。

センサーネットワークの情報検索では、このように検索言語の処理と分散するセンサーノード間での、検索要求と結果のデータ転送という2種類の問題を同時に扱う必要がある。

センサーネットワークのセキュリティ^[4]

センサーネットワークでは、セキュリティ管理も必要である。たとえば、アドホックネットワークではネットワーク認証や、認証キーの管理方法と認証方式を検討する必要がある。

また、多種多様なセンサーによって獲得された実世界の情報が流通するため、プライバシーなど社会生活の中にセンサーノードが浸透した場合の影響を含めた、社会的な課題の解決が求められる。このようにセンサーネットワークにより社会の透明化が進むことで、テロや防犯対策が強化できる半面、プライバシー問題もまた拡大する懸念があるためプライバシーの保護技術の開発が必要になっていく。ユビキタス・ネットワ

ーク社会では、これまでも増して、技術面だけでなく社会面の課題も同時かつ双方向的な視点から具体的に捉えていくことが重要になっていくことであろう。

センサーネットワーク属性間のトレードオフ

センサーネットワークが普及する上では、コストはやはり大きな要因である。またセンサーノードの多重化数、データ転送速度、転送データ量、通信距離、消費電力には互いに制約関係があるため、用途に応じて最適な組み合わせを選択する必要性がある。たとえば、多重アクセス方式では消費電力を抑えるための検討が必要になる。

センサーネットワークの事例

今年オリンピックが開催されたギリシャでは、センサーネットワークで橋梁の状態を監視できる Rion - Antirion 橋の建設が進んでいる^[8]。約2.25キロの橋に300個の構造監視センサーを配備することで、構造疲労により状態が悪化する箇所をリアルタイムに検出できるようになっている。Rion - Antirion 橋のセンサーには、歪みセンサー、道路の繋ぎ目の転移センサー、栈橋の水検知センサー、交通量観測用重量センサー、交通量および地震を記録するビデオカメラ、アスファルトの温度センサーなどがある。

また、日本でも道路にRFIDを配備して周辺情報を利用者に提供する

だけでなく、公共物の管理や自然災害予知なども視野に入れた、自律移動支援プロジェクトの計画が進んでいる^[9]。

このような防災分野での利用では、構造物、山、川、海の状態を監視するセンサー群により、危険の予兆を早期に検出し、被害を最小限に食い止めることが期待される。交通センサーや構造物センサーの情報を連携して活用することにより、災害時に緊急車両を被災地に効率的に手配することもできるようになるだろう。

また、センサーネットワークを用いた環境モニタリングの事例にカリフォルニア大学バークレー校の研究グループによる、米国メイン州グレートダック島での海ツバメの生態系の観察がある^[3]。この研究では、アクリル樹脂でパッケージングした数10個のMoteを海ツバメの巣に設置して、マルチホップ方式のセンサーネットワークを構築している。

このような環境分野での利用では、実世界の状況を、定点観測システム、移動観測システム、広域観測システムなどから多角的に測定、情報を統合し、解析することにより、実世界の状況を正確に把握して、意思決定を支援することが期待できる。

まとめ

今回は、連載「ユビキタス社会を支えるIT技術」の最終回ということでセンサーネットワークの技術動

向と課題や事例について紹介した。センサーネットワークがユビキタス時代に向けて進化・発展していくためには、広範なセンサーアプリケーションの開発が必要であり、今後も新しいセンサー情報検索言語、ミドルウェア、プラットフォームが研究開発されていくことだろう。

参考文献

- [1] ユビキタスネットワーキングフォーラム, <http://www.ubiquitous-forum.jp/>
- [2] 10 Emerging Technologies That Will Change the World, <http://www.globalfuture.com/mit-trends2003.htm>
- [3] 特集Wireless Sensor Network, CACM, June 2004.
- [4] 特集SENSOR NATION, IEEE Spectrum, July 2004.
- [5] CHEE-YEE CHONG and KUMAR, S.P., "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges," Proc. Of IEEE, vol.91, no.8, pp.1247-1256, August 2003.
- [6] 弓場英明監修、三宅功、斉藤洋編著、ユビキタスサービスネットワーク技術、電気通信協会、2003 .
- [7] Dust, Inc., <http://www.dust-inc.com/flash-index.shtml>
- [8] New bridge in Greece is big and tough? and smart, too, IEEE Spectrum, pp.16-17, July 2004.
- [9] 自律移動支援プロジェクト推進委員会, <http://www.jiritsu-project.jp/>
- [10] 山本修一郎、ユビキタス社会を支えるIT技術 <http://www.bcm.co.jp/>

お問合せ先

㈱NTTデータ
技術開発本部

TEL : 03-3523-8003