センサネットワーク概観

正 員 井家上哲史*

An Overview of the Sensor Networks

Tetsushi Ikegami*, Member

Recently, the sensor network technology attracts a great deal of attention achieving a safe and comfortable ubiquitous society. The sensor networks are already used in environment and disaster monitoring, medical care, logistics and transportation.

This paper aimed to understand the outline of the sensor network technology centering on the wireless sensor network technology.

キーワード：センサネットワーク，ユビキタス，ZigBee，UWB

Keywords：sensor network, ubiquitous, ZigBee, UWB

1. はじめに

近年，安心・安全・快適なユビキタス社会の実現に向けセンサネットワーク技術が注目を集めている。センサネットワークは，様々な構造物・環境・生体などで発生する膨大な情報を大量のネットワーク化されたセンサ端末を分散配置することで収集する。すでに，環境計測，医療・福祉，防災，商品流通，交通など様々な分野で利用されている。今後，さらに研究開発，標準化の進展により急速な普及が期待されている。そうした中，各年代での技術の総括と方向性の明確化が重要である⁽¹⁾⁽²⁾。電気学会においては，2005 年から 2 年間にわたり，センサネットワーク調査専門委員会において，センサネットワークに関する多様な要素技術の現状と，適用が期待される産業分野についての調査及び，各方面への適応想定並びにその効果，解決すべき技術的課題などを検討し，この技術の将来像を予測し，また研究開発の指針を明らかにすることを目的とした調査活動を行い，技術報告「センサネットワークの技術動向と最新事例」⁽³⁾にまとめた。

本稿は，文献(3)を中心に，センサネットワーク技術の概要を理解していただくことを目的とした。

2. センサネットワークの適用領域

現在，様々な分野にセンサネットワークを導入することが試みられている。図 1 に計測領域と移動量を軸としてセンサネットワークの適用領域の分類を試みた。

〈2・1〉 狭域・固定 省エネ・省力化を目的としてオ

* 明治大学理工学部
〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
School of Science and Technology, Meiji University
1-1-1 Higashi-mita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 214-8571

図 1 センサネットワークの適用領域

フィス，店舗における室内環境計測へ適用されている。多数のセンサにより室内環境を計測することで，冷房機器や冷蔵機器をきめ細かく制御しようとするものである。また，計測と制御を連携させることで省力化を図ることができる。オフィスや住宅での侵入センサや煙探知機からの情報を収集する防犯・セキュリティシステムも普及している。オフィス，店舗，住宅については既設設備に対する設置の容易性の点で無線センサネットワークが適用されることが多い。

〈2・2〉 狭域・移動量小 センサノードの移動を伴う例として，在宅もしくは施設内での健康管理を目的として，リアルタイムに脈拍，血圧などの生体情報を収集するバイタルセンシングシステムや原子力施設での安全な作業を支援する放射線可視化システム，家庭用サービスロボットの例がある。移動を伴うシステムでは移動に支障が無いように無線センサネットワークが用いられる。図 2 は放射線可視化システムの例であり，固定式検出器モジュール，移動式検出器モジュールで計測した放射線量をセンサネットワーク端末で収集する。無線の到達距離を補うためには中継器

図2 放射線可視化システム構成概念図

図3 ネットワーク活用型ロボットシステムの概要
(出典：関西電力 R&D NEWS Kansai, 434 号, pp.16(2006))

が用いられることもある。このシステムではセンサノードの位置検出には超音波による計測システムを併用している⁽³⁾。

図3はネットワーク活用型ロボットの例であり、単体のロボットでは電源、計算処理能力に限られているため、知覚機能をロボットに設置されるセンサと外部サーバに分離することで高機能化を可能にするものである。

〈2・3〉 中域・固定 2005年の愛知万博における万博アメダスでの実証実験、圃場（ほじょう）・森林観測のためのセンサネットワーク実験などが行われている。圃場（ほじょう）・森林観測とは水田、畑、森林などの日射量、気温、湿度、土壌水分、CO₂濃度、物の生育状況をモニタするものである⁽⁴⁾。

中域・固定の領域では、設置の容易性から無線センサネットワークが用いられることが多い。万博アメダスではおよそ1km四方の会場内20箇所に設置した無線センサ端末が設置され、多数の無線センサ自身が情報をバケツリレーするマルチホップネットワーク技術によってエリア全体をカバーする構成がとられた。

中域・固定の領域については、光ファイバセンシング技術を用いたシステムも実用化されている。図5はNTTが開発・実用化したBOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) を用いた光ファイバ歪み計測装置の適用例で

図4 万博アメダスのセンサネットワーク構成
(出典：http://www.nec.co.jp/effort/ubiquitous/2005_0819/)

図5 光ファイバセンサの例

ある⁽⁵⁾。BOTDRは光ファイバに光パルスを入射した時に発生する後方散乱光を利用して、敷設した光ファイバに沿って連続的に歪みを測定することができる。多点の計測を1本の光ファイバで実現できる、計測地点に電源が不要、落雷・迷走電流の影響がない、耐腐食・耐湿度性が高い、という特長を持ち、橋梁、河川、道路などの監視システムとして使用されている。

〈2・4〉 中域・移動 自律移動支援システム（歩行者ITS (Intelligent Transport Systems)）が歩行者、車いす使用者、自転車利用者の安全・安心・円滑な移動環境を提供する目的で開発が進められている。電柱などの障害物の回避情報などを提供するためには10cm以内という高精度の測位が必要であるため、GPSを使用するカーナビゲーションとは別のシステムが必要とされている。歩行者ITSを実現する手段として案内板・標識・視覚障害者誘導用ブロックなどに

図6 児童見守りシステムの例

(出典：www.soumu.go.jp/s-news/2007/pdf/01_sankou/kodomo/05_mimamorisys/r523.pdf)

IC タグを設置する方式や電柱に基地局を設置する方法などが検討されている。

また、社会情勢の変化に呼応して子どもの安全な通学の確保に対するニーズの高まりから、総務省の主導により「児童見守りシステム」が導入され始めている。図6は児童見守りシステムの例であり、子どもに装着したICタグを利用して通過地点の履歴や通過時の画像を確認することができる。

〈2・5〉 広域・固定 日本全国の気象データを収集するシステムとしてアメダスが広く認知されている。アメダスは全国約1,300ヶ所の観測所からの気象データを収集している。

その他にもより高い密度でセンサを配置することで、地域に密接した気象情報や災害情報を収集することを目的とした倉敷市の「かわせみネット」⁽⁶⁾や横浜市立みなと赤十字病院アレルギーセンターの粉塵・花粉・気象ネットワーク⁽⁷⁾などがある。交通 ITS としてはカーナビゲーションなどに渋滞情報、事故・工事情報などを提供する VICS (Vehicle Information and Communication System) が広く知られている。

広域におけるセンサネットワークの多くはエリアカバー率の観点から有線ネットワークで構築されているが、PHS通信を利用した位置検索、運行管理システムもある⁽⁸⁾。

3. 研究・開発における技術課題

〈3・1〉 小型・省電力化 バイタルセンシング、児童見守りシステムなどにおいて、センサノードは着用可能＝ウェアラブルであることが必須となる。また、小売店舗の商品陳列棚などへのセンサノードの設置においても小型化が要求される。装置の小型化に伴いバッテリーの小型化も余儀なくされるため、省電力化も必須となる。また、バッテリー交換が容易でない場所へ設置した場合のメンテナンスの容易化のためにも省電力化が必要である。

省電力化の手法としては、(1) デバイスのオンオフ制御の高度化、(2) デバイスそのものの消費電力低減、がある。デバイスのオンオフ制御の高度化とは、センサネットワー

図7 小型低電力センサネットワークモジュール ZN1 の概観

クへのアプリケーションは通信頻度が少ないという性質を利用して、デバイスの動作時間を短くすることで省電力化を図る手法である。

センサネットワークでの普及が予想される ZigBee ではセンサノード間で同期を取り、送受信タイミングを合わせるにより、センサノードの動作時間を最小化するような動作が可能である。また、日立製作所が開発した小型低電力センサネットワークモジュール ZN1 (図7) に採用された「フローズンスタンバイ」という技術では、待機時の MCU のクロック停止と通信用 LSI の給電停止により低消費電力化を実現している⁽⁹⁾。さらに、ZN1 ではリアルタイムクロックモジュールに低消費電力のチップを採用することで、待機時電流 $1\mu\text{A}$ の超低消費電力化を達成している。モジュール基板への MCU の実装にも CSP (Chip Scale Package) 技術を適用して、 $15\text{mm} \times 15\text{mm} \times 4\text{mm}$ の小型化を達成している。

〈3・2〉 セキュリティ バイタルセンシング、見守りシステム、物流管理に用いられる電子タグについては、悪意のある第三者によって、漏洩、偽造／複製、改竄、同定／追跡、妨害といった脅威が想定され、今後の利用拡大のために十分なセキュリティの確保が課題である。

電子タグのプライバシー確保に関しては、国内では総務省、経済産業省「電子タグに関するプライバシー保護ガイドライン」(http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/pdf/040608_4_b.pdf) により、電子タグが装着されていることの表示など、電子タグの読み取りに関する消費者の最終的な選択権の留保、電子タグの社会的利益などに関する情報提供、電子計算機に保存された個人情報データベースなどと電子タグの情報を連係して用いる場合における取扱い、電子タグ内に個人情報を記録する場合における情報収集及び利用の制限、電子タグ内に個人情報を記録する場合における情報の正確性の確保、情報管理者の設置、消費者に対する説明及び情報提供、が義務付けられている。

その一方で、技術的には表1のような対策がとられている⁽³⁾。表1はUHF帯RFID (EPCglobal G2/ISO18000-6規格) 及び ZigBee での対応状況である。ZigBee については ACL (Access Control List) による想定外ノードに対するアクセス制限、AES-CCM (Advanced Encryption Standard Counter-mode with CBC-MAC) による暗号化通信によりセキュリティが確保されている。さらに、暗号化通信を保護するためのセキュ

表 1 UHF 帯 RFID/センサネットワークでの脅威と対策

脅威	採りうる対策	UHF 帯 RFID	センサネットワーク (ZigBee)
		EPC Global G2/ISO18000-6	
漏洩 同定・追跡	リード制限	×	○ (CCM)
	データ暗号化	—	○ (AES)
	永久に無効化	○	—
	一次的に無効化	×	—
偽造/複製	改ざんを検出	×	○ (CCM)
	複製を防止	×	×
改ざん	ワンタイム書込 (永久ロック)	○	—
	書込ロック (パスワードで制限)	○	—
妨害	通信妨害	×	×

ここで、○:サポート、×:未サポート、—:対象外

図 8 測位実験の様子

アな鍵配信技術の開発も行われている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

〈3・3〉 位置推定技術 センサネットワークを使用するシステムにおいて、個々のセンサノードの位置が重要である場合が多い。特に移動する人・物に装着されるセンサノードでは高い測位精度が要求される。

位置推定技術では、位置が既知の三つの物体からの距離を測定することによって、対象となる物体の位置を推定する。無線を使った位置検出方式としては、受信信号強度を利用する RSSI (Received Signal Strength Indicator) や電波の伝播時間を利用する TDOA (Time Difference of Arrival) がある。

超広帯域無線技術 (UWB:Ultra Wideband) の中でも ns オーダの短パルスを使用するインパルス方式では、電波の到達時間を高精度に求めることが可能であり、高精度な測位への適用が期待される。藤井らの実験 (図 8) では、12.6m × 5m の範囲内に 6 個の UWB ノードを設置し、その範囲内に 21 個のタグを置いて精度を測定した結果、17cm 程度の測位誤差 (根二乗平均誤差) で測位可能であったことが報告されている⁽¹²⁾。

〈3・4〉 時刻同期技術 多数のセンサノードを収集し

図 9 複数タイムマスタによる分散同期

たデータを関連付けて、意味を持った情報として取り扱うためには各センサノードの時刻を一致させる必要がある。また、時刻を高精度に同期させることで、各センサノードに動作タイムスロットを割り当てることで、通信帯域の削減、消費電力の削減を行うことが可能になる。

時刻同期技術として一般的に、GPS (Global Positioning System) や NTP (Network Time Protocol) を使用したものが広く知られているが、無線センサネットワークへの適用については、前者はコストと消費電力の点で、後者は無線環境上での安定性の点で問題がある。

無線センサネットワークの時刻同期技術としては、同期信号の受信時刻を受信ノード間で交換する RBS (Reference Broadcast Synchronization)⁽¹³⁾、時刻管理ノードとセンサノード間で往復の通信時刻を交換する TPSN⁽¹⁴⁾、時刻と送信遅延を 1 フレームに合成した徳永らの手法⁽¹⁵⁾がある。RBS や TPSN では 1 回の時刻同期に数フレームを要するが、徳永らの手法では 1 フレームに抑制することでネットワークへの負荷を軽減している。また、多数のセンサノード間で時刻同期を行うには、時刻を管理するタイムマスタから各センサノードまでの中継数を低減する必要があり、複数のタイムマスタを用いた分散同期が行われる (図 9)。

〈3・5〉 通信の高信頼化 無線センサネットワークにおいては、安定した通信を確保する必要がある。このため ZigBee ではマルチホップによるエリアカバー率の拡大と信頼性向上のための各種ルーティング機能が実装されている。

また、実際にフィールドテストを行い、適用性を事前に検証することも重要である。図 10 に変電所構内における IEEE802.15.4 規格による無線センサネットワークを用いたノード位置と受信電力の関係の測定例を示す⁽¹⁶⁾。変電所構内は伝搬路上に金属構造物が多く存在する特殊な環境であり、送信ノードと受信ノード間の距離がわずか 10cm 程度変化しても受信電力が大きく低下し、通信が不安定になる場合があることが分かる。こうした場合には設置後の電波伝搬特性を測定し、ノード配置を細かく調整するといった作業もセンサネットワークの高信頼化に必要なになる。

図 10 IEEE802.15.4 のノード位置特性例

図 11 センサ情報処理の例

(出典：原子力発電所用機器の状態監視装置
<http://www.jma.or.jp/NDE/ja/details/uunb5796.html>)

〈3・6〉 情報処理技術 センサネットワークが大規模化するとセンサノードで収集したデータをフィルタリングし、データベース化する技術も必要である。データベース化によって、所望のデータパターンで検索する、時系列モデル化によって異常予測を行うなど様々な二次利用が可能になる。

他にも他の情報処理技術と組み合わせることで、収集したデータをより有効に活用することも試みられている。図 11 は 2 章で紹介した放射線可視化システムにおけるデータ処理の例であり、収集したセンサ情報を作業現場の CG 画像にカラーでオーバーレイ表示することで本来見えない放射線を「見える」かのようにしている。

4. 標準化動向

様々なセンサネットワークが高度に連携し、システムを高度化していくためには必要に応じてあらゆる場所に設置されたセンサからのデータを利用できるオープン性が必要であり、そのための相互接続性、標準化が必須である。

ここでは、センサネットワークに代表的な二つのネットワーク技術について概要と標準化動向について述べる。

図 12 ZigBee のネットワークモデル

〈4・1〉 ZigBee ZigBee は低消費電力、低コストを特長とする最大 250kbps の低転送レートの近距離無線ネットワーク技術である。単三乾電池 2 本で数ヶ月から 2 年程度動作する低消費電力性と LSI 単価で 2 ドル/チップを目標とした低コスト性を特徴とする。

PHY レイヤと MAC レイヤの標準化が IEEE802.15.4 で、ネットワークレイヤやセキュリティ機能、アプリケーション・インタフェースなどの規格化が ZigBee Alliance で進められている。

ZigBee Alliance (<http://www.zigbee.org/>) は ZigBee の普及を推進するための非営利業界団体であり各国から 100 社以上の企業が参加している。日本国内では ZigBee SIG ジャパン (<http://www.zbsig.org/>) が普及と仕様の発展を目的に活動を行っている。

ZigBee 仕様は、2004 年 12 月に初版が規定され、2006 年 12 月に ZigBee-2006 に改版された。ZigBee ネットワークを構成する ZigBee 論理デバイスは、役割によって三つに分類される。ZigBee コーディネータは、ZigBee ネットワークに一つだけ存在し、ZigBee ネットワーク全体を管理する機能を持つ。また、ZigBee ルータは、ネットワーク内に複数台存在することが可能で、データをバケツリレーする機能を持つ。ZigBee エンドデバイスは、スイッチやセンサなどの末端デバイス機能を持つ。図 12 に ZigBee のネットワークモデルを示す。ZigBee ルータがデータを中継することで、直接電波が届かないデバイス間でも通信が可能である。また、途中経路のデバイスが一部停止しても迂回経路によって通信を継続することができる。

〈4・2〉 UWB(Ultra Wideband) UWB は非常に短い幅のパルスを用い、スペクトルを超広帯域に拡散して通信する無線方式である。通常の無線通信で広帯域を使用する W-CDMA では占有帯域幅とピーク周波数の比帯域が 1% 以下であるのに対し、UWB では 20% 以上と超広帯域を利用している。センサネットワークへの適用から見た UWB の特徴

は以下の通りである。

- ・高速な物理速度でのデータ伝送,
- ・既存の狭帯域無線との共存,
- ・マルチパス耐性,
- ・高性能測距・位置特定,
- ・回路の簡略化, 小型・低消費電力化。

特にセンサネットワークでセンサノードの位置を特定しながらセンシングデータを伝送する用途に適した無線通信方式と言える。

UWB の利用に対する規則整備は, 国際電気通信連合の無線通信セクター (ITU-R) がタスクグループ TG1/8 を設置し, その中の四つの WG で検討が行われた (2002 年 7 月から 2005 年 10 月)。2005 年 10 月に四つの勧告案, (1)UWB の特性 (定義関係), (2)UWB から他業務に与えるインパクト (他の無線システムへの干渉評価), (3)周波数管理フレームワーク (規則整備関係。米, 欧, 日本のスペクトルマスクを付録として記載), (4)UWB の測定法 (技術基準制定のため), がとりまとめられたが, UWB 利用のための具体的な法制化は各国に委ねられることになった。

日本においては, 2002 年 9 月に総務省情報通信審議会が情報通信技術分科会 UWB 無線システム委員会を設置し, 2006 年 3 月に技術基準を一部答申 (条件付き UWB の導入許可) した。この一部答申を受け, 2006 年 12 月 12 に電波産業会にて 100Mbps を超える超高速伝送を指向した ARIB STD T91「UWB (超広帯域) 無線システム標準規格」が制定された。測定・試験方法については, テレコムエンジニアリングセンターが「TELEC-T406 超広帯域無線システムの無線局に使用するための無線設備の特性試験方法」を制定した。ARIB STD T91 では, 変調方式は問わない, データレートは 50Mbps 以上, 屋内利用に限る, となっている。

一方, アメリカでは, 連邦通信委員会 FCC (Federal Communications Commission) が 2002 年 2 月に免許無しでの民生利用を許可している。規定は, 通信・測定用途 (3.1~10.6GHz), イメージング用途 (990MHz 以下, 1.99GHz, 3.1~10.6GHz), 衝突防止用車載レーダ用途 (22~29GHz) また屋内, 屋外, ハンドヘルドなどに分かれている。

IEEE802 委員会では, IEEE802.15.4 標準 (ZigBee の PHY, MAC) の位置特定精度の向上及び通信距離拡大をねらいとしたセンサネットワーク, RF タグなどへの応用を目的とした IEEE802.15.4a 標準を 2007 年 3 月に制定した。マイクロ波帯パルス方式 UWB を用い, 100kbps から 26.03Mbps のデータ伝送速度, 30m の通信距離, ALOHA 方式の MAC, TOA (Time of arrival) 方式による 10cm オーダ精度の測距 (測位精度 1m), 30mW 以下の通信時消費電力などを特徴としている。上述の ARIB STD T91 規格とは仕様が異なるため, 国内での免許なしでの運用はまだ許可されていないが, 今後のセンサネットワークへの導入が期待される。

5. ま と め

本稿では, 紙面の関係で詳細な解説を省略した箇所が多々

ある。詳細な解説は末尾の参考文献に譲るので適宜参照していただきたい。末筆ながら本解説をまとめるに当たりご協力頂いたセンサネットワーク調査専門委員会の関係各位と NTT 未来ねっと研究所の松田和浩氏に感謝申し上げる。

(平成 20 年 7 月 17 日受付)

文 献

- (1) 平成 17 年度版「情報通信白書」(総務省)「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」最終報告 (2004)
- (2) 阪田史郎・田村陽介:「ユビキタスセンサーネットワーク技術調査報告書 2004」, インプレス R&D (2004)
- (3) センサネットワーク調査専門委員会編:「センサネットワークの技術動向と最新事例」, 電学技報, 第 1112 号 (2008)
- (4) 平藤雅之:「フィールドサーバによるユビキタス環境とセンサネットワークの構築」, 信学会, 第 18 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ論文集, pp.175-180 (2004)
- (5) NTT 技術ジャーナル 2003 年 10 月号, pp.38-41
- (6) <http://www.city.kurashiki.okayama.jp/jyoho/intra.html>
- (7) <http://www.yokohama-allergy.org/index.html>
- (8) <http://www.kato-denki.com/alliance/unkoukanri/index.html>
- (9) S. Yamashita, et al.: "A 15 × 15 mm, 1 μA, reliable sensor-net module: enabling application-specific nodes", ACM, Proceedings of the fifth international conference on Information processing in sensor networks, pp.383-390 (2006)
- (10) 八百健嗣ら:「センサネットワークにおける放送型暗号を用いた鍵更新方式」, 信学会技研報 ISEC2006-140, pp.65-70 (2007)
- (11) 八百健嗣・小沼良平・福永 茂・中井敏久:「センサネットワークにおけるノードの認証管理」, 信学会第 2 種研究会 CW 研究会 (2007)
- (12) 藤井 彰・関口英紀・浅井雅文・倉島茂美・落合秀樹・河野隆二:「IR-UWB 測位システムの開発」, 平 19 信学総大, A-5-9, p.164 (2007)
- (13) J. Elson, L. Grid, and D. Estrin: "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts", In Proc. of 5th OSDI (2000)
- (14) S. Granerwal, R. Kumar, and M. Srivastava: "Timing sync Protocol for Sensor Networks", ACM SenSys (2004)
- (15) 徳永雄一・三部 健・西山博仁:「大規模センサーネットワークシステムの時刻同期手法」, IPSJ Symposium Series Vol.2006, No.6, pp.793-796 (2006)
- (16) 尾造宏之:「電波伝搬特性に基づく無線センサネットワーク構築の基礎検討—変電所構内での微弱無線及び IEEE802.15.4 の電波伝搬特性—」, 電力中央研究所報告, R05007 (2006)

井 上 哲 史

(正員) 1957 年生。1980 年 3 月明治大学工学部電気工学科卒業。1982 年 3 月同大学院工学研究科博士前期課程修了。1985 年 3 月同博士後期課程単位取得。同年郵政省電波研究所入所。同省通信総合研究所 (名称変更) 鹿島宇宙通信センター宇宙通信技術研究室長を経て, 1997 年 4 月明治大学理工学部電子通信工学科助教授。2005 年 4 月同教授, 現在, 理工学部電気電子生命学科に勤務。この間, 1991 年 10 月から 1992 年 9 月米国イリノイ大学アーバナシャンペーン校客員研究員。衛星通信, スペクトル拡散通信, 移動通信, UWB 通信などの研究に従事。工博。電子情報通信学会スペクトル拡散研究専門委員会委員長, 同ワイドバンドシステム研究専門委員会委員長, 電気学会自営無線の活用技術調査専門委員会委員長, 同センサネットワーク調査専門委員会委員長などを歴任。IEEE IWUWBS&UWBST2004 Technical Program Chair ほか。IEEE Tokyo Section 理事。電子情報通信学会, 情報理論とその応用学会, IEEE 会員。