



センサ・ネットワーク端末を 年単位で稼働させる省電力技術

メッシュ型トポロジと専用OSで消費電力を削減

John Suh, Michael Horton, 中村千代賢

ここでは、米国 University of California, Berkeley (UC Berkeley) が中心となって規格化を進めている無線センサ・ネットワーク「SmartDust MICA Mote」について説明する。本センサ・ネットワークはメッシュ型のトポロジと専用の通信プロトコルによって省電力を実現するように設計されている。

(編集部)

センサ・ネットワークは、多数のセンサを配置し、情報を収集する無線システムです。シリコン MEMS センサや低消費電力のマイクロコントローラ、LSI 化された無線デバイス、アドホック型の通信プロトコル、組み込みシステム向け専用 OS などの発展によって、実用化されつつあります。

センサ・ネットワーク技術を用いれば、屋内(家庭、オフィス、工場)や屋外など、わたしたちを取り巻く環境で発生するイベント(事象)の監視や認識、分析の能力を向上させることができます。

● センサ・ネットワークが抱える三つのコンセプト

無線センサ・ネットワークは、いくつかの重要な特徴を持つことから、ほかのタイプの無線ネットワークと区別さ

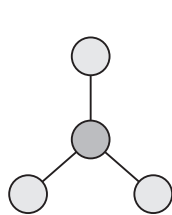
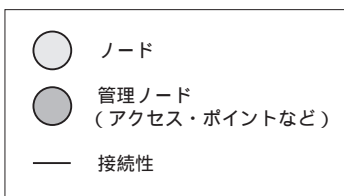
れています。

まず一つ目の特徴は、無線端末(以下、ノードと呼ぶ)の大きさです。センシング機能、制御機能、無線通信機能を兼ね備えたネットワーク・ノードが小型(mm 単位のシリコン・チップ・サイズから携帯端末サイズまで)であることが求められます。

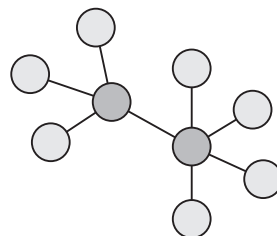
二つ目の特徴は、これらのノードに厳しい電力条件が求められるという点です。通常、これらのノードは電池駆動です。携帯電話や無線携帯機器の場合と異なり、センサ・ネットワークのノードを定期的に充電することは不可能です。したがって、これらのノードは保守が行われず、設置後、長期間にわたって稼働できるように、細部にわたって省電力化のくふうが施されています。

三つ目の重要な特徴は、各ノードに同一のピア・ツー・ピアの通信プロトコルが実装されていることです。この通信プロトコルは、独立した複数のノードをメッシュ・ネットワーク注1として機能させます(図1)。これにより、ネットワーク内のセンサ(ノード)は、インフラに依存しない、

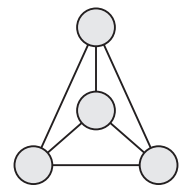
注1：各ノードがルータやアクセス・ポイントの機能を持つことで、ノードどうしが相互に接続し合うネットワーク。マルチホップ・ネットワークとも言う。



(a) スター型



(b) ハイブリッド・スター型



(c) メッシュ型(ピア・ツー・ピア)

図1 ネットワーク・トポロジ

表1 MICA Moteの導入事例

応用分野	設置場所	利用されるセンサ	イベント	メリット	状況
野生動物	生息する島	温度, 赤外線, 湿度, RSSI(無線強度)	動物の生態の監視	自然観察	2002年から稼働中
保守	工場	振動, 温度, 赤外線	機械の監視	障害発生前に機械を保守できる	2003年から稼働中
追跡	建物	速度計, RSSI	人間および資産の追跡	訪問者/資産の所在の追跡	2004年から実験中
山崩れ	農村地域	速度, 磁気, 温度, 湿度	災害制御	即座の警告	2003年から実験中
農業	農村	温度, 湿度, 光	環境の監視	精密農業と農産物改良	2001年から稼働中
災害	森林火災/被災地域	温度, 赤外線, 磁気, 超音波	地域の監視	消防/軍の効率化	2002年から実験中
交通	高速道路	磁気, 音声, 速度, 赤外線	車数のカウント, 交通の監視	低コストの設置	2004年から実験中

拡張性が高い, 通信のエネルギー効率が良い, という三つのメリットを得ることができます。また, メッシュ・ネットワークはトポロジに冗長性を持たせているので, 各センサ・ノードや無線リンクの障害に対するロバスト性(堅ろう性)を備えています。

● **メッシュ・ネットワークのエネルギー効率が良い理由**

同一距離の通信を想定した場合, メッシュ・ネットワークは同等機能のシングルホップ・ネットワーク注2よりもエネルギー効率が優れています。この点を以下に例を挙げて説明します。

ホップ(あるルータから次のルータに移動する経路)間の距離を均等とすると, 任意のノードから基地局までの伝送距離は $N \cdot r$ となります(N はホップ数, r は一つの無線リンクの距離)。一つのノードにおける特定のエラー・レートでの受信時最小電力を $P_{MinReceive}$, 最初のノードおよびそれに続く中継ノードの電力を $P_{Transmit}$ と定義すると, 地上付近のRF減衰モデルは以下のように表されます。

$$P_{MinReceive} \propto \frac{P_{Transmit}}{r^\alpha}$$

または,

$$P_{Transmit} \propto r^\alpha P_{MinReceive}$$

ここで, r は最小距離, α はRF減衰指数です。環境によるマルチパスや干渉の影響は変化するため, 通常 α の値の範囲は2~5となります。したがって, 同一距離のシングルホップと比較した場合, 任意のノードから基地局への N ホップ・パスの省電力の効果は以下のように算出できます。

$$\eta = \frac{P_{Transmit(N \cdot r)}}{N \cdot P_{Transmit(r)}} = \frac{(N \cdot r)^\alpha \cdot P_{MinReceive}}{N \cdot r^\alpha \cdot P_{MinReceive}} = N^{(\alpha-1)}$$

RF伝送のみを考えると, ホップ数 N が増加するにつれて, 省電力効果が大きくなります。ただし, この分析ではメッシュ・ネットワークのプロトコル・スタックが必要とする電力や帯域幅の問題を考慮していません。しかし, 実際にメッシュ・ネットワークを利用してみると, 省エネルギーやハードウェア・コスト, 堅ろう性, データ遅延などのバランスが取れていることを実感できます。

このようなメッシュ・ネットワークに対応した無線センサ・ネットワークの一つに「SmartDust MICA Mote注3」があります。このセンサ・ネットワークはまだ新しい技術ですが, すでに複数の分野で導入された実績があります(表1)。ただし, 今後, 広く普及するためには, 技術的課題や経済的課題, さらに公共政策にかかわる多くの課題を解決する必要があります。以下に本センサ・ネットワークのハードウェア/ソフトウェアの概要や機能ごとのノード要件などを説明します。なお, ここでは上記の各課題についての検証などは行いません。

1 センサ・ノードの分類

現在のセンサ・ネットワークでは, 一つのシステムに対して数百または数千のセンサを設置できます。初めにセンサ・ネットワークを導入したとき, こうしたシステムでは,

注2: アクセス・ポイント(基地局)を介してノード間の通信を行うネットワーク。スター型やハイブリッド・スター型などがこれにあたる。

注3: SmartDustは, UC Berkeleyが主体となり, 米国国防省の研究開発部門DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)が主導するユビキタス社会実現のためのセンサ・ネットワークに関する計画。コンピュータが究極的にはちり(dust)のように小さくなり, しかも無線通信機能を搭載するため, 物理空間とコンピュータ空間が人間の意識するところなくつながるという世界を実現することを目的としている。MICA Moteは米国Crossbow Technology社が開発した無線センサ・ネットワークの名称。