

## 論文の内容の要旨

# Sensor Data Management and Transportation over Unreliable Networks (センサシステム構成法と非信頼性ネットワークにおけるデータ配送法)

落合 秀也

通信ネットワークは、センサやアクチュエータとの連携によって、環境モニタリングや遠隔制御を可能にしてきた。最近 10 年間の発展は目覚ましく、ビルの設備管理や、工場の生産ライン制御、ホーム・オートメーションなどの用途に、この技術は応用され、その有効性は実証されてきた。近年高まりを見せている世界的な省エネ志向は、スマートビルディングの開発を加速するが、今後もこの技術は根幹をなすと考えられている。

スマートビルディングでは、様々な制御を自動化する。例えば、人の状態（存在だけでなく、部屋にいる人数や動きなど）を把握し、快適性を保ちながら、空調の制御をすることができる。照明の ON/OFF 制御と連携させることで、消し忘れによる電力消費の無駄をなくせる。電力消費量を絶えずモニタリングし、消費量が著しく増える夏場などには、ビル全体を省エネモードで稼働させ、ピーク電力を抑制することもできる。

一方で、このようなスマートビルディング・システムの実現は、一大プロジェクトになってしまう、という現実がある。誰でも気軽に実現できるものではなく、そこには多くの時間と労力が必要となる。これは、実装時に少なくとも次の 2 点が必要になることに原因がある。

- (1) プロプライエタリな設計および開発が必要になってくる点。オペレータ向けのユーザインタフェース設計、裏で行われる通信のプロトコル選定、データベース設計、それらの選定や設計に基づいたソフトウェア実装。複数の言語を用いて、異なるプラットフォームを統合しなければならないケースもあれば、データ交換のためのプロトコルやデータフォーマットをその現場にあわせて規定し実装するケースもある。
- (2) 無線ネットワークの信頼性がないため、ビル全体に隅々に渡りケーブルを張り巡らす必要がある点。無線ネットワーク上で、中継を複数回行って、センサ・ノードやアクチュエータ・ノードまで通信性を提供することは、実は、技術的に難しい。そのため、中継を行わない程度の無線化に留まっているのが現在の技術水準である。無線で届く範囲は限られているため、現実的には、ビル全体にケーブルを張り巡らさなくては、思うような観測ができない状況にある。

本論文では、これらの課題を解決し、センサシステムの実装作業を軽量化するために、下記のように、2つの主要研究課題を設けた。

- (1) センサシステム構成法：部品を組み合わせ、連結設定を行うだけで、システム全体を構成できるモデルの研究。ただし、従来のビルディング・オートメーションの枠を越えて、データ中心型センサ・アクチュエータ・ネットワークを構成できるモデルにする。データ中心型センサ・アクチュエータ・ネットワークとは、データの蓄積やストリーム処理なども取り込み、システム・オペレータとも相互作用を起こすことのできるネットワークである。基本的な処理や機構を部品化できるようにインターフェースやデータモデルを設計することで、これらの部品化を促進し、再利用できるようにする。実際のシステム実装時には、必要な部品を組み合わせ、簡単な連結設定を行うだけで、現場の要求に合わせたシステムを構築できるようにする。さらに、この作業をプログラミング的に集約して行えるようにし、自律的に実行時に最適な配置構成を持たせることも可能にする。
- (2) 不安定ネットワーク上のデータ配送法：頻繁に切断されてしまう無線ネットワークでも、データ配送に信頼性を持たすことの可能な通信方式を研究。ノードが移動するケースは、もちろんのこと、ノードが固定されている場合でも、ノード間の無線通信リンクは頻繁に切断される。遅延耐性ネットワークの通信方式を使えば、断続的接続ネットワークの上でも原理的にはデータ配送を実現できることはわかっているが、データのルーティングをどのように行うかは、オープンな研究課題となっている。固定ネットワークにも適用でき、移動ネットワークにも適用できるような自律的なルーティング方式の研究を行い、50台の無線端末を使った実験をする。また、良く知られている遅延耐性ネットワークは、インターネットと独立したネットワークとして設計されているが、我々は、インターネットと親和性を持った遅延耐性ネットワークを設計する。

本論文では、これら研究の具体的な成果の中から、次の主要な貢献内容を掲載している。前半では、センサシステム構成法として、コンポーネント・フロー・プログラミング・モデルの思想を提起し、設備情報アクセスプロトコル(FIAP)、中央コントローラによるデバイス管理機構(CCDM)を掲載する。後半では、不安定ネットワーク上のデータ配送法として、エントロピー適応性ポテンシャルルーティング(PEAR)、遅延耐性IPネットワーク(DTIPN)を掲載する。

FIAP の研究では、コンポーネント・フロー・プログラミング・モデルを提案するとともに、ポイントの概念の明確化、時系列データ構造の定義を行い、コンポーネント間データ交換の通信手順まで規定した。通信手順の設計においては、大量データの転送や、ストリーム配信も考慮に入れ、データ中心型のセンサ・アクチュエータ・ネットワークを実現する上で必要な通信特性を備えるようにしてある。また、いくつかのユースケースを想定したシステムの実装構成例を提示し、オープンな開発を助長するモデルになっていることを示す。

CCDM の研究では、コンポーネント・フロー・プログラミング・モデルに従った、スクリプト言語を用いてシステムを記述しておくこと、センサ・アクチュエータ・ネットワーク内で最適な形に分散的にプログラムを配置し実行できることを示している。一般に、プログラムのコンポーネントを配置する際には、通信トラフィックの最小化、遅延の最小化、負荷の分散化、可用性向上などの最適化を行うことが期待されるが、これらの配置アルゴリズムは単純でなく、分散環境では実現が不可能に近い。CCDM では集中型アーキテクチャを採用することで、これを実現できることを示す。

PEAR は、断続的接続ネットワーク上で、メッセージを配送するために考案したメッセージの配送方式である。ネットワーク環境に応じてメッセージ配送パターンを変化させる特性を持っている。比較的接続パターンの偏ったネットワークでは、最短経路でメッセージを配送し、メッセージの複製を極力生成しない。一方、接続パターンの予測不可能なネットワークでは、配送中に複製が生成され、メッセージを並行して配送するようになる。これにより、移動ノードがあるネットワーク環境も含め、幅広いネットワーク環境で、安定的にメッセージ配送を実現することができる。シミュレーションによる特性評価の他、実機による動作検証も行った。これにより、センサ・アクチュエータ・ネットワークの無線化に必要な、中継数にスケール性を持たせられることを証明した。

DTIPN の研究では、インターネットと親和性の高い遅延耐性ネットワークを提案している。IP パケット自身は、原理的には、数時間や数日間遅れて配達されても問題がない。この事実に着目し、DTIPN では、リンク層に信頼性の高いパケット転送特性を持たせ、トランスポート層で、アプリケーション・メッセージの非同期転送を管理させた。トランスポート層で、既存インターネットでの弱い信頼性を解消するために前方誤り訂正を行えば、遅延耐性のあるインターネットを構成することができることを示した。