

# 論文内容の要旨

論文題目 無線センサネットワークにおける

高精度サンプリング方式に関する研究

氏名 鈴木 誠

情報化の進展はとどまることを知らず、「情報」を取得することの重要性はますます高まっている。このような情報化の流れは実空間に存在する「実空間情報」に対しても及ぶ。実空間情報を取得するに向けては、省資源かつ小型という特徴を有する無線センサネットワーク技術が鍵となる。無線センサネットワークを利用することで、従来であれば膨大な金銭的および人的コストを必要とした情報を低コストで取得することが可能となろう。実空間データをこれまででは考えられないようなレベルで詳細に取得することが可能となれば、新たな産業の創発や科学技術の進歩を期待できる。

無線センサネットワークをデータ転送のためのネットワークとして見た場合、既にある程度成熟した技術と言える。無線センサネットワーク研究においては、インターネットにおいて必須であるネットワーク間の相互接続性を犠牲にするかわりに、アプリケーションに特化することで、省電力性、スループット、転送遅延、ネットワークの安定性など、さまざまな観点から改善が進められている。

しかしながら、無線センサネットワークを測定システムとして見た場合、サンプリングに関して課題がある。例えば、ビルなどの構造物に複数の加速度センサを設置することで、それらの揺れ方の時空間的な相関から構造物の健全性を判断する地震モニタリングでは、複数のセンサ間の時空間的な相関を精確に取得する必要がある。このようなアプリケーションにおいて、生態観測で行われているように、それぞれのノードが一定間隔でサンプリングを行うというサンプリング手法では、ネットワークを構成するノードがそれぞれ固有のシステムクロックを有するために、サンプリングタイミングが徐々に外れてしまう。このため、観測した信号の時空間的な相関を正しく得ることができない。センサの設置が容易であるという特徴から、地震モニタリングなど、高精度なセンシングを必要とするアプリケーションへの期待も高まっており、このようなアプリケーションの実現に向けて、サンプリング方式について注意深く検討する必要がある。

無線センサネットワークにおいて高精度なサンプリングを実現するためには、以下の2つを考えなくてはならない。1つ目は時刻同期である。時刻同期プロトコルを利用することで、時刻同期誤差を伴うもののノード間の時刻の対応関係を得ることができる。2つ目は、時刻同期情報に基づきサンプリングタイミングを決定するサンプリング機構である。時刻同期を行うだけでは、サンプリングタイミングは依然としてそれぞれのノードに固有のままである。また、センサノードは、複数のタスクを並列的に実行するため、タスクスケジューリングに不確定性が存在する。

つまり、無線センサネットワークで時空間的な相関を得るためには、時刻同期情報に基づいてサンプリングタイミングを決定し、その指定されたタイミング通りにサンプリングを行うためのサンプリング機構が必要となる。

時刻同期誤差はサンプリングの精度に影響を与えるため、サンプリング精度を確保するためには、時刻同期誤差がどの程度なのかを把握する必要がある。筆者は、高精度なサンプリング機構の実現に向けて、現在無線センサネットワークでもっとも広く利用されている時刻同期プロトコルである FTSP の実験評価を行った。評価によれば、FTSP には 2 つの問題があることが分かった。1 つ目は、時刻同期誤差がホップ数に対して指数関数的に増加するという問題である。この問題は、超高層ビルを対象とした構造物のモニタリングなど、大規模なネットワークが必要となる場合に測定精度が著しく損なわれるという問題を起こす。2 つ目は、同様のネットワーク構成で実験を行っても、時刻同期誤差が実験ごとに異なり再現性がないという問題である。再現性がないため、実際にどの程度の誤差が生じているのかを把握することができない。

これらの問題を解決するために、FTSP の誤差について理論的な解析を行った。この解析によれば、誤差がホップ数に対して指数関数的に増加することの原因は、FTSP が誤差補正手法として利用している複数点を利用した線形回帰、および時刻同期パケットの転送遅延によって誤差が増幅されているためであることが分かった。また、再現性の問題は、ネットワーク構成が同様であっても、電源をオンとするタイミングまで同様ではないことに起因していることが分かった。FTSP においては、コリジョン防止のために、時刻同期パケットの受信タイミングを考慮せず、センサノードの電源がオンとなったタイミングから定期的に時刻同期パケットを散布している。

この解析結果に基づいて、新たな時刻同期プロトコルの設計を行った。本プロトコルでは、直前の 2 つの時刻同期パケットを利用して線形回帰を行う。また、時刻同期パケットの受信後に、コリジョン防止のために短いランダムな遅延を挿入し、可能な限り早く時刻同期パケットを転送する。これによって、本プロトコルでは、ホップ数に対する時刻同期誤差の増大を線形に抑えることが可能になる。実験評価によれば、15 ホップのネットワークにおいて、FTSP では誤差の分散が  $190 \text{ us}^2$  であるのに対して、本プロトコルの場合には分散を  $6.32 \text{ us}^2$  に抑えることができた。

次に、本時刻同期プロトコルを利用して、分散同期サンプリング機構の設計と実装を行った。本機構では、これまでの無線センサネットワークでは、サンプリング間隔が一定であったのに対して、サンプリングタイミングまでも同期させるために、時刻同期情報に基づいてサンプリング間隔を動的に調整する。また、タスクスケジューリング遅延の問題を解決するために、サンプリングとサンプリングの間に無線通信を制限するメディアアクセス方式を導入する。実装評価によれば、シングルホップのネットワークにおいて、サンプリングジッタを最大でも  $3.4 \text{ us}$  に抑えることが可能であった。また、本サンプリング機構の有効性の評価のために地震モニタリングシステムの構築を行った。現在、運用評価を行っており、これまでに 20 個程度の地震観測に成功している。