無線センサネットワークを構造物計測に適用するための時刻同期手法の開発と実装

東京大学大学院　　学生会員　○本多　弘明
東京大学地震研究所　　正会員　　小国　健二

１．背景・目的

従来から市場に出回っていたPICやAVRなどのワンチップマイコンと呼ばれる省電力かつ安価なCPUが,近年飛躍的発展を遂げつつあるセンシング技術・無線通信技術と結びつくことにより，安価で高性能なセンサ・プラットフォームを多数用いたネットワークセンシングが現実味を帯びてきた。現在、研究開発用に販売されているネットワークセンシングの基本キットでさえ、個々のセンサ・プラットフォーム上で計測データにデジタルフィルタリングなどの処理を施し、無線通信を利用してマルチ・ホップでデータ転送を行うことが可能である。データ転送ルートをアドホックに決定するといった高度な通信制御も可能であり、すぐにも実用に供することが可能なように見える。

しかし、このような装置を工学的に意味のある計測に適用することを考えると、解決すべき課題は多く残されている。個々のセンサの位置を知ることと、個々のセンサでの計測データの時刻同期をとることは特に重要な課題である。たとえば、橋梁などの比較的大規模な構造物を多点で計測し、固有周期・固有振動のモード形を計測し、その変化を見るためには少なくとも100Hz程度のサンプリング・レートが必要であり、このときもとめられる時刻同期精度は少なくとも数ミリ秒のオーダーでなくてはならない。

以上の考察に基づき、本研究では、センサネットワークにおいてリアルタイムにデータ収集を行いつつ、計測ノード間で数ミリ秒の同期精度を実現するプロトタイプを作成することを目標とした。具体的には、タイムスタンプを利用した方法を元に時刻同期機能をセンサノードに実装し、精度検証を行った。

２．時刻同期方法

無線センサネットワークの時刻同期手法としては、RBS(Reference Broadcast Synchronization)やFTSP(Flooding Time Synchronization Protocol)が広く知られている。RBSでは、各ノードが参照パケットを送信し、受信した参照パケットに対応するローカルな時刻を交換することで、相対的な時刻同期を図る。送信側で発生する遅延が受信側のノード同士では相殺されることにより､精度の良い同期が得られる。この方法は、事前に個々のセンサのクロック信号を発信する水晶振動子の特性を計測せずに、リアルタイムで精度の良い時刻同期を実現できることが特徴である。FTSP では、特定の送信ノードがタイムスタンプ付きのパケットを送信し、受信ノードがタイムスタンプをもとに、受信ノードにおけるローカルな時刻と送信ノードにおける絶対時刻とのオフセットを計算し、同期を取る。この方法では、計測開始以前に、各ノードの水晶振動子の特性を計測し、遅延誤差を見積もった上で時刻あわせを行うため、計測中の通信量がRBSと比べて少ない一方、計測開始までのオーバーヘッドが大きくなる。

本研究の最終目標は、100～1000 個のセンサを用いた構造物の動的特性の計測であるため、各ノードの水晶振動子の特性を予め計測することは困難であり、RBS に基づく手法を用いるほうが有効である。これらを踏まえて、以下のような同期計測システムを構築した。

主な構成ノードは、定期的にタイムスタンプを発信するノード(時刻ノード)・計測を行うノード（計測ノード)・計測パケットを受信するノード(受信ノード)である(図１)。時刻ノードは、入力信号のトリガーをもとに定期的にタイムスタンプをブロードキャストする。計測ノードは、タイムスタンプを初めて受信したら計測(ADC サンプリング)を開始し、タイムスタンプ受信ごとに、前回タイムスタンプを受信した時刻以降の計測で得られたデータを順に載せたパケットを作成し、受信ノ

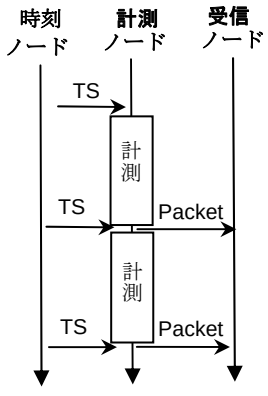

図１：構成ノード

ードに送信する。データパケットの内容は、図２に示す通りである。図中、マージンとは、タイムスタンプを受信してから最初の計測が行われるまでのクロック数と、最後の計測が行われてから最新のタイムスタンプを受信するまでのクロック数のことである。受信したデータパケットのヘッダー部分にある通し番号とマージンを参照し、計測間隔が一定と仮定した上で各データに対応する絶対時刻を計算することで、時系列データが得られる。

《TOS ヘッダ》	・宛先 ・メッセージ型 ・グループID ・メッセージ長
《計測 ヘッダ》	・送信元ID ・計測データ数 ・前／後タイムスタンプ ・前／後マージン
《計測データ》	

図２:データパケットの内容

本手法の利点として、頻繁にタイムスタンプが発信されるために、ローカルクロックの刻み幅のズレを修正する必要がないことと、計測データをリアルタイムで受信することが可能であること、時刻そのものではなく通し番号のみが送られるため、通信遅延が小さく抑えられること、が挙げられる。

３．精度検証

計測データの同期精度を検証する目的で、以下のような試験を行った。上記の通りに構築したシステムにおいて、各計測ノードのセンサー入力部に同一の機器から同時にパルス波を入力しつつ、サンプリングレート約 200Hz で計測を行った。得られた時系列データから、パルス波の立ち上がり時刻を、立ち上がり前後の時間を平均することで求め、２ノード間で差をとった。図３は約 450 回の立ち上がり回数に関してヒストグラムをとったものである。

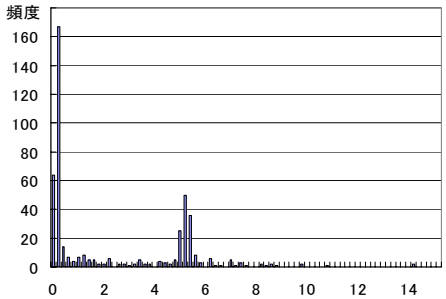

図３：立ち上がり時刻の差 [msec]

図３には 0.0[msec]付近と 5.0[msec]付近にピークが現れている。5.0[msec]付近にピークが現れるのは、図 4 に示すように、計測が同じタイミングで行われていないため、パルス波の立ち上がりを検出する区間が、ノード間で一区間ずれることがあるためである。また、立ち上がり検出区間のノード間でのずれが無い場合、立ち上がり時刻は、区間の中心値になるため、区間のずれの半分の値が時刻の差となってあらわれる。従って、0.0[msec]付近のピークは、同期誤差を現すのではなく、ノード間の計測区間のずれの大きさのピークに対応している。約 200Hz で計測しているため、約 5.0[msec]の精度以上を検証することはできない。

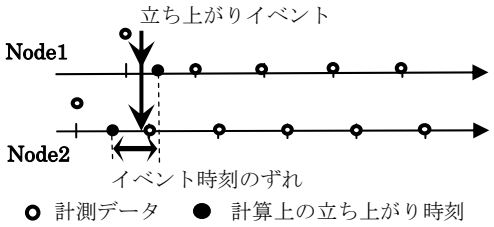

図４：大きな時刻差の原因

立ち上がり検出区間のノード間でのずれを除去することで、保証される同期精度を上げることと、サンプリングレートを上げ、保証される同期精度を向上させることが、技術的な課題となっている。

キーワード　多点計測，時刻同期，無線通信
連絡先　　〒113-0032　東京都文京区弥生 1-1-1　東京大学地震研究所
ＴＥＬ：03-5841-5756

参考文献

- Maroti,M.， Kusy,B.， Simon,G.， Ledeczi,A. “The Flooding Time Synchronization Protocol” Proc. Second ACM SenSys 2004
- Elson,J.， Girod,L.， Estrin,D. ”Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts” Proc. Fifth Symposium of OSDI,｝2002.
- 許国豪，井上純哉，本多弘明，小国健二 『センサーネットワークの位置決めのための音響測距の実装と分散型アルゴリズムの提案』応用力学論文集，Vol.8，2005