

センサデータ解析情報の放送型配信を用いた センシングシステム

藤田 直生^{†1} 田中 聡^{†1} 柳沢 豊^{†2} 義久 智樹^{†3} 塚本 昌彦^{†1}

近年、無線センサネットワークを用いて、構造物に取り付けた振動センサのデータを解析し、構造物の健全性を診断する構造ヘルスマonitoringが注目されている。診断のため設置する振動センサは、周波数の高い情報をもつため、大量のセンサデータを収集しなければならない。これらのデータを無線により収集するには、通信電力と無線帯域幅が制約となる。本研究では、筆者らが提案している Broadcast and Collect 方式にセンサ解析プログラムの放送配信を拡張することで、状況に合わせて解析プログラムのみを変更し、大量のセンサ情報から必要な情報のみを効率良く収集方式を提案する。無線センサノードに本システムを実装し、センサデータの解析方法の変更を、小さなプログラムの配信で実現できることを確認した。

A Broadcast Sensing System with Sensor Data Analysis Information

Naotaka Fujita^{†1} Satoshi Tanaka^{†1} Yutaka Yanagisawa^{†2}
Tomoki Yoshihisa^{†3} Masahiko Tsukamoto^{†1}

We propose the energy-efficient method for sensor information collection with broadcast a program to analyze sensor information. In recent years, structural health monitoring (SHM) with a wireless sensor network attracts attention. We analyze the vibration sensor data, which we set up to the structure, and diagnose the soundness of the structure with the SHM. The vibration sensor output a high frequency data. Therefore, communication power and wireless band width become the limitation when its sensor data collect by the wireless sensor network. We change only an analyzing program in conformity to situation and collect efficiently only the necessary information from its sensor data. We implemented a proposed system in a sensor node and confirmed that we delivered a program to change the analysis of the sensor data in little communications traffic.

1 はじめに

近年、重要な社会基盤である橋梁や高層建築物などの構造物の安全性、健全性を診断する構造ヘルスマonitoring (SHM: Structural Health Monitoring) が注目されており、中でも診断に用いるセンサを無線化することで設置費用、管理費用の削減が見込める無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) の活用が注目が高まっている^{1, 2)}。

SHM では、構造物に加速度センサや歪みセンサ、圧力センサの振動センサを用い、地震や台風による損傷や経年劣化などの構造物に異常が無いかの診断をする。従来の SHM では、センサを有線で構造物内に張り巡らすことで診断していたが、センサのケーブル敷設などの設置費用が高い問題や、新たにセンサとケーブルを敷設しなければならないことか

ら既存構造物への取り付けが難しい問題があった。例えば、SHM の導入にかかる時間の約 75% が対象構造物にセンサのケーブル敷設を行なう作業にかかり、全モニタリングシステム費用の 25% がケーブル敷設費用という報告がある。カリフォルニア州交通局の報告では、60 の加速度センサで構成される計測システムを 1 つの橋梁に導入する費用に約 \$300,000 かかり、そのうち橋梁の過酷な環境からワイヤを守るために 1 フィートあたり \$10 の費用がかかったと報告している³⁾。そのため、SHM において無線接続のセンサを構造物への設置を実現することで、設置費用や管理維持費用を削減できることや、既存構造物への取り付けが容易になることが期待されている。また、定期的な診断において構造物に問題がある可能性を診断し、問題がある可能性がある場合のみ詳細な診断を行うことで、すべての診断を詳細に行わずに診断にかかる費用を削減することが望まれている。問題がある可能性を診断するために、す

^{†1} 神戸大学大学院 工学研究科

^{†2} NTT コミュニケーション科学基礎研究所

^{†3} 大阪大学サイバーメディアセンター

すべてのセンサデータを収集する必要は無く、センサデータの解析結果の特徴点のみを収集することで、構造物に問題がある可能性の判断材料となる場合がある。そのため、無線センサネットワークを用いて、すべての振動センサデータを収集する方式と、解析結果の特徴点のみを収集する2つの方式で効率良く収集する方式が求められる。

筆者らはこれまでに、放送を用いて予測情報を配信することで、大規模なセンサネットワークにおいて効率良く収集する Broadcast and Collect (B&C) 方式を提案している⁴⁾。これは、予測情報放送を用いてすべてのセンサノードへ配信し、センサノードは、予測情報と実際のセンサ情報を比較し、実際の情報が大きく異なる場合のみサーバへ情報を送信することで、効率良くセンサ情報を収集することができる。SHMのように計測対象物が同じであることから、各センサノードのデータに類似性がある環境では、B&C方式を用いることで効率良くセンサデータを収集することができる。またこれまでに、B&C方式の通信プロトコルを拡張することで、センサノードへ動作プログラムを配信する方式を提案している⁵⁾。B&C方式の通信プロトコルに準ずることで、センサノードの動作プログラムの配信と共に、他のセンサノードからセンサ情報を収集することができる。しかし、環境が大きく変わった場合などにプログラムを配信することを想定しているため、解析のための簡単なフィルタ処理や、係数を変更するためにすべてのプログラムを書き換える必要があり、コストが高い問題がある。

本研究では、センサノードのプログラムを、センサデータの解析などを行なう5つのプログラムに分類し、必要に応じて放送型配信を用いて一部のプログラムを書き換える方式を提案する。これにより、解析処理やフィルタ処理の一部のプログラムを変更や、計算処理の順番や係数の変更が容易に行なえる。また、センサノード上でセンサデータを解析処理やフィルタ処理を行なうことで、必要な情報のみ計算し収集する。さらに、一部のプログラムを無線通信により書き換える方式であるため、書き換えのために必要となる通信量が少ないコストでセンサノードの動作変更を実現する。しかし、従来のセンサノードは、SHMで用いられる周波数解析などの解析処理やフィルタ処理を行なうためには計算能力が不足している。そのためセンサノード上でこれらの処理を行なうことは難しいとされていた。そこで本研究では、筆者らが提案している再構成可能なハードウェアアーキテクチャ⁶⁾を用いることで計算量の多いフィルタ処理や解析処理をハードウェア

処理することで、高速で低消費電力に計算する。再構成可能なハードウェアを用いて、短時間フーリエ変換を行ない、ランニングスペクトルを求める。求めたランニングスペクトルは情報量が多いため、センサノード上でフィルタ処理を行ない、配信されるセンサ解析情報と比較することで、必要な情報のみを収集する。提案システムを実装し、必要な情報を取り出し、放送配信されるセンサデータ解析情報との比較を行なうプログラムを書き換え正しく動作することを確認した。また、書き換えるプログラムサイズが通信量と比例することから従来の方式とプログラムサイズを比較し、検討した。提案システムを用いることで、小さなプログラムで動作を変更することから、少ない通信量で柔軟な無線センサノードの動作を実現できる。

以下2章で関連研究について述べ、3章で提案するB&C方式でのセンサデータ解析情報の放送型配信を説明する。4章でシステムの実装を行い、5章で検証実験を行ない、最後に6章で本稿をまとめる。

2 関連研究

これまでにセンサネットワークにおけるデータ収集の手法がさまざま提案されてきている。予測型の収集方式として、BBQ(Barbie-Q)⁷⁾は、センサネットワークを1つの確率モデルとしてとらえ、センサネットワークの挙動を推測する手法である。また、予測型の収集方式に放送型通信を組み合わせたWangらが1ホップ通信内において予測値と違うセンサノードからのみ情報を収集する方式を提案している⁸⁾。これらの予測型の収集方式は、サーバ側ですべてのセンサデータの予測値を計算し、センサノードで比較することで収集する方式である。本研究のように、サーバとセンサノードの両方でセンサ情報を解析するプログラムをもたないため、瞬時値のセンサデータをにしか対応できない。

無線センサノードのプログラムを変更する研究として、Impala⁹⁾やMICA MOTEのOTAP(Over-the-Air-Programming)などがある。これらのプログラム変更方式は、個別のセンサノードのプログラムの更新や、伝搬的な更新を目的としており、本研究のように一斉のプログラムを書き換え、書き換えに失敗した場合も次回のプログラムを受信することで復帰できない問題がある。

3 提案手法

本研究では、無線センサノードのプログラムを、センサデータの解析などを行なう、5つのプログラムに分類し必要に応じて放送型配信を用いて一部のプログラムを書き換える方式を提案する。これによ

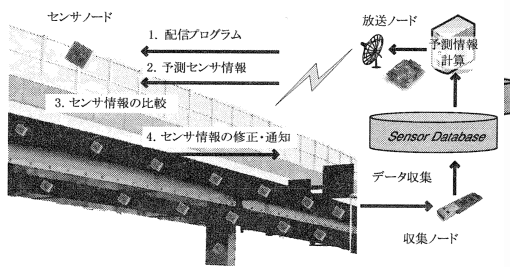


Fig. 1: An assumed environment and actions

り、センサ解析情報と解析プログラムを放送を用いて配信することで、センサ情報から必要な情報のみを効率良く収集する。また、センサノードの書き換えにより、柔軟なセンサノードの運用を実現する。

3.1 提案システム概要

提案するシステムが想定する無線センサネットワーク環境と、B&C方式を用いたセンサ解析情報によるセンシングシステムの動作概要を図1に示す。

提案システムでは、環境をセンシングする無線センサノードと、放送ノードと呼ぶセンサ情報を送信する無線ノード、収集ノードと呼ぶ無線センサノードから送信された情報を受信する無線ノード、センサ情報を格納するセンサデータベースとデータベースを元に予測情報を計算するサーバで構成される。

3.1.1 無線ノード

無線センサノードは、後に述べるB&C方式の動作プログラムと、放送ノードより配信されるセンサ情報解析プログラム、フィルタ処理プログラム、解析プログラムと定期実行プログラムにより制御される。放送ノードより配信される4つのプログラムを総称して、配信プログラムと呼ぶ。センサ情報解析プログラムは、センサデータのフィルタ処理や解析処理の手順と、放送ノードより送信される予測センサ情報との比較を行なうプログラムである。解析プログラムとフィルタ処理は、センサ情報解析プログラムより呼び出し利用するプログラムであり、無線センサノードに搭載されたMCU(Micro Controller Unit)のプログラム実行領域に書き込まれ、書き換え可能なプログラムである。本研究では解析処理の一部として、無線センサノードの外部に再構成可能なハードウェアによる解析処理を用いており、再構成可能なハードウェアとの通信に必要なプログラムは事前に無線センサノードにプログラムされている。また、再構成可能なハードウェアは事前に構成された解析処理を行い、構成の変更は行なわない。定期実行プログラムは、B&Cの動作とは関係なく、

一定期間ごとに自動的に実行されるプログラムである。定期実行プログラムにおいて、センサの連続サンプリングなどに使用する。

放送ノードと収集ノードは、サーバに接続されており、サーバから受け取った情報を放送を用いて配信し、無線センサノードから送信された情報を受信する。本研究では、放送ノードと収集ノードは同じ無線ノードで処理を行なう。

3.1.2 通信システム

無線センサノードと放送ノード、収集ノード間の通信は、B&C方式の通信プロトコルに従い、配信プログラムと予測センサ情報とその結果を送受信する。サーバは、センサノード上で解析を行なうために必要となる配信プログラムを放送ノードから配信する。次に予測したセンサ解析情報を放送ノードより送信する。センサノードは、配信されたセンサ解析情報を異なる時や、センサノードの故障の時にセンサ情報を収集ノードへ送信する。

提案システムでは、サーバから放送型配信により予測センサ情報を送信し、予測と異なるセンサ情報のみを収集する動作を繰り返すことでセンシングを行なう。また、配信プログラムを更新することで柔軟なセンサノードの運用を行なう。

これらの無線通信は、無線センサノードと放送ノード、収集ノード間を1ホップで直接通信できる環境であり、すでにWSNの通信環境が構築されていることを想定している。

3.1.3 センサデータ処理

SHMにおいて、管理者が構造物の診断のためにセンサノードより取得したい情報の1つとして、振動センサの周波数スペクトルがある。周波数スペクトルは、構造物ごとに特徴を持っており、周波数スペクトルが突然変わる場合は、構造物への損傷が考えられる。このことから、周波数スペクトルのピーク値を取得することは構造物の診断にとって有効であると考えられており、無線センサを用いた構造物の振動周波数解析の研究が行なわれている¹⁰⁾。本研究においても、センサノードに取り付けた加速度センサ等から周波数解析を行ない周波数スペクトルのピーク値をセンサ情報として収集する。

しかし、加速度センサ等のセンサから取得したセンサデータを、そのまま周波数解析を行なうと不要な情報が入っている場合がある。また、周波数解析の結果にも不要な情報が含まれている場合がある。そのため、周波数解析と共に簡単なフィルタ処理を行なうことで、構造物の診断に必要な情報のみを収集することができるようにする。

このことから、センサノードでは、センサデータ

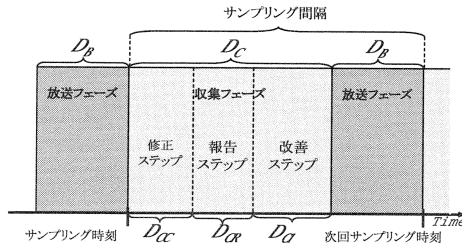


図 2: 放送フェーズと収集フェーズ
Fig. 2: Broadcast phase and collecting phase

を周波数解析すると同時に、指定した複数のフィルタ処理を行なう。

3.2 Broadcast and Collect

本研究で用いる B&C 方式の概要について説明する。B&C 方式は、1 つの環境に多くのセンサノードが取り付けられており、これらは互いに接続し WSN を構築している環境を想定している。従来の B&C 方式では、センサの瞬時値や分散値などをサーバ側で予測し放送型配信を用いて、指定した誤差範囲を超えるセンサノードからのみ情報を収集することで情報収集周期の向上、通信量の削減を実現する。

B&C 方式の予測値を用いたセンサ情報収集の基本動作は、後に詳しく述べるがプログラムの配信においても同じである。また、予測値として 1 つの情報を送信することを B&C では想定しているが、予測値を拡張し、複数のセンサ情報を同時に配信することで、配信されたセンサ情報に基づきセンサデータの解析結果と比較しセンサ情報を収集することができる。

3.2.1 放送フェーズと収集フェーズ

B&C 方式では、図 2 に示すようにデータ収集中の時間の経過とともに、放送フェーズと呼ぶ予測値を配信する期間と収集フェーズと呼ぶセンサ情報を収集する期間に分かれる。放送フェーズ D_B は、センサデータベースから予測した予測情報をセンサノードに対して配信する期間である。放送フェーズの期間は、センサノードはすべて受信状態となり、放送ノードから配信される予測情報を受信する。

収集フェーズ D_C は、センサノードからセンサ情報を収集する期間である。収集フェーズは、収集する情報に合わせて、修正ステップ、報告ステップ、改善ステップの 3 つのステップに分割される。修正ステップ D_{CC} は、配信された予測情報と実際に取得したセンサ情報が大きく異なっており、センサ情報を修正するときに送信する期間である。報告ステップ D_{CR} は、配信された予測情報を受信できなかった場合や、センサノードの故障などの問題が

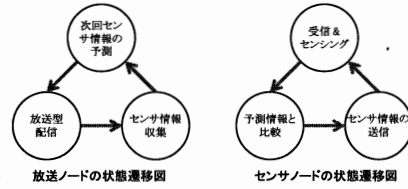


図 3: 状態遷移図
Fig. 3: State-transition graphs

あった時にセンサノード自体の状態を報告する期間である。改善ステップ D_{CI} は、予測情報と大きく異ならないが、センサ情報を予測精度を向上させるためにセンサ情報を収集する期間であり、サンプリング周期に余裕がある場合に設定することでさらに精度の良い予測情報を求めることができる。

放送フェーズと収集フェーズの 2 つの期間を合わせた時間が、センサノードのサンプリング周期となる。また、収集フェーズから放送フェーズへ移行する期間に空白を設定することで、状況に合わせてサンプリング周期を調整することができる。

3.2.2 無線ノードの状態遷移

放送フェーズと収集フェーズの 2 つの期間を用いてセンサ情報を収集することから、放送ノードとセンサノードの状態は図 2 に示すように遷移する。

放送ノードは、収集、予測、放送の 3 つの遷移状態からなる。放送ノードは最初にセンサ情報を収集し、センサデータベースへ格納する。格納したセンサ情報から、次回のセンサ情報を予測し、放送配信する動作を繰り返す。

センサノードは、受信、比較、送信の 3 つの遷移状態からなる。センサノードは、放送配信された予測情報を受信し、実際のセンサ情報と比較する。比較した結果が大きく異なっている場合やセンサノードが故障している場合は、収集フェーズの各ステップで情報を送信する。送信する情報がない場合は、次回の放送受信時刻を設定してセンサノードを休止状態にすることで消費電力を抑える。

3.3 配信プログラム

3.3.1 センサ情報解析プログラム

センサ情報解析プログラムは、B&C 方式の放送配信を受信したときに自動的に実行されるプログラムである。このプログラムは、センサ情報のフィルタ処理や解析手順をプログラムし、結果を比較するプログラムを組みこむことを想定している。具体的には、後に述べるフィルタ処理と解析プログラムを実行し、実行した結果から、放送ノードから配信される予測されたセンサデータ解析情報と比較を行なう。比較した結果により、収集フェーズにおいて

センサデータの送信の有無を決定し、送信するセンサ情報を決められたメモリ領域に保存する。保存したセンサ情報は、別に動作している B&C 方式のプログラムが自動的に送信を行なうため、センサ情報解析プログラムは、メモリ領域に保存するまで実行する。センサ情報に合わせて、本プログラムを書き換えることで、柔軟なセンサデータの解析とセンサノードの運用を実現する。

3.3.2 解析処理とフィルタ処理プログラム

解析処理とフィルタ処理プログラムは、センサ情報解析プログラムから呼び出されるプログラムである。事前にセンサノードのプログラム領域上に、プログラム開始アドレスを設定しておき、アドレスが小さい方から順にフィルタ番号を設定する。放送配信されたフィルタ処理と解析処理プログラムを、指定されたフィルタ番号のアドレスに格納する。センサ情報解析プログラムは、フィルタ番号に割り当てられたプログラムアドレスを呼び出すことで、プログラムを実行する。

3.3.3 プログラムの配信方式

プログラムの配信は、通常の B&C 方式で用いるセンサ情報収集の図 2 に示すプロトコルにおいて、放送フェーズをプログラムの配信に用い、収集フェーズをエラー訂正の再送要求に用いることで実現する。また、通信に IEEE802.15.4 を想定することから 1 フレームが最大 127 バイトと制限されるため、配信プログラムを 64 バイト単位で分割を行い配信する。

プログラム配信方式に放送通信を用いるため、プログラムの配信に対して応答を求めることは最小限にする必要がある。さらに、センサ情報収集時の方式と同じプロトコルを採用することで、センサノードにおける通信処理の負荷を削減することができ、実装プログラムサイズを小さくすることが可能である。さらに、通信プロトコルが同じであるため、一時的に通信が行えないセンサノードが復帰した場合も、予測配信及びセンサ情報収集の通信に対応することが可能となるため、誤動作を減らすことができる。

プログラム配信方式における、正常な通信方式を図 4 に示す。プログラム配信において、放送フェーズでプログラムを配信し、収集フェーズにおいて再送要求がセンサノードから送られてこない場合は正常に配信が行えていると考える。収集フェーズにおいて再送要求が送られた場合は、次の放送フェーズにおいて再送要求されたプログラムのフレームから配信する。

プログラム配信に用いる通信プロトコルは、図 5

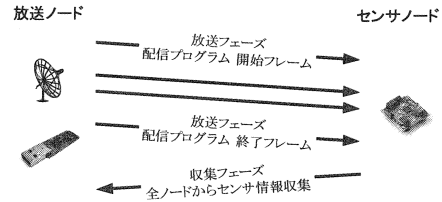


図 4: プログラム配信動作
Fig. 4: Program delivery action

放送ノード送信データ		
識別子 2 bit(0)	グループアドレス 6 bits	修正ステップ時間 8 bits
報告ステップ時間 8 bits (0)		改善ステップ時間 8 bits (0)
次回センシング時刻 16 bits		
配信プログラム種類 8 bits		フィルタ番号 8 bits
配信プログラムフレーム番号 16 bits		
配信プログラム 64 bytes		

センサノード送信データ		
識別子 2 bit(0x01)	発信元アドレス 8 bits	収集フェーズフラグ 6 bits
要求フレーム番号 16 bits		

図 5: 予測プログラム配信用通信プロトコル
Fig. 5: Communication protocols for delivering predicting program

に示すパケットで通信を行う。放送ノード及びセンサノード送信データにおける識別子、各アドレス、各ステップ時間はセンサ情報収集通信プロトコルと同じである。

放送ノード送信データにおける、配信プログラム種類はセンサ解析情報プログラムなどを示し、フィルタ番号は解析処理やフィルタ処理プログラムの番号を示す。配信プログラムフレーム番号は、プログラムを分割した順に番号が振られる。予測プログラムは、64 バイト固定長で、予測プログラムが短い場合は 0 で埋められる。

センサノード送信データにおける、収集フェーズフラグには再送要求 (0x08) を指定する。要求フレーム番号は、再送を必要とする最初のフレーム番号をもとめ、0 を指定した場合は放送ノードは初めからプログラムを配信する。

この通信方式により、各センサノードに対して放送を用いたプログラムの配信を行い、センサノードの動作を一斉に変更することを実現する。

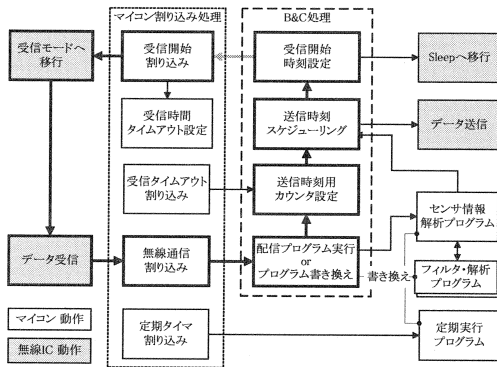


図 6: センサノードの動作詳細
Fig. 6: A sensor node detailed state-transition

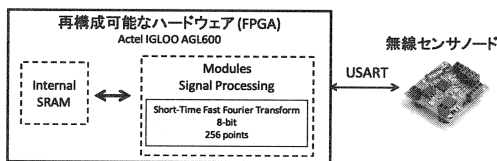


図 7: センサノード構成
Fig. 7: A sensor node composition

3.4 センサノードの動作

センサノードの動作の詳細を、図 6 に示す。センサノードには、事前に割込処理と B&C 処理がプログラムされている。

センサノードの動作は、割り込み処理をの基本にしており、無線通信のタイミングを管理するタイマと、定期的に動作するタイマの 2 つの割込を用いる。

無線通信のタイミングを管理するタイマは、B&C 方式で決められている各フェーズの動作を実現する。放送により配信されるセンサ解析情報を受信するため無線 IC を受信モードへさせると同時にタイムアウトの設定を行なう。放送フェーズで正常に受信した場合は、センサ解析プログラムを実行し、必要であれば収集フェーズで決められた時刻にセンサ情報を送信する。収集フェーズの動作終了後に、次回の受信開始時刻をタイマに割込設定する。

定期的に動作するタイマは、B&C の受信タイミングとは別にセンサ情報を取得したい場合や、外部との通信を行なう。

4 実装

4.1 センサノード

実装に用いたセンサノードは、2.4GHz 帯の無線センサノードである Nao_RF と、再構成可能なハー

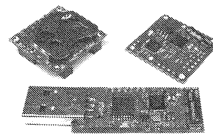


図 8: センサノードハードウェア (約 25mm 四方)
Fig. 8: Sensor node hardwares
(Size: approx. 25mm sq.)

ドウェアを組み合わせた図 7 に示す構成である。

2.4GHz 帯通信での無線センサノードとして、筆者らが開発した Nao_RF を用いて実装を行う。Nao_RF は、クロスボウ社が発売する汎用的なセンサノード Mote と同じく Atmel 社製 8 ビット MCU である AVR を採用しており、開発環境なども似ている。しかし、サイズが小さくリチウム電池で動作し、1 つあたりのコストが 4,000 円程度と安価であることから採用した。

また、センサデータの解析に再構成可能なハードウェアである FPGA を用いた。回路構成を再構成可能なハードウェアを用いることで、従来の MCU では計算処理が遅い信号処理計算を高速に実現する。また、筆者らが用いる再構成可能なハードウェアは、信号処理などの時間がかかる計算処理などにおいては、センサノードの MCU で計算するより合計消費電力が少ない。本研究では、再構成可能なハードウェアを書き換えないが、放送配信で書き換えることで将来高度なセンサシステムを提案できると考え採用した。図では省略しているが、再構成可能なハードウェアへのアクセスを、USART で直接行なえないため仲介に MCU をもちいている。本研究では、再構成可能なハードウェアである FPGA と制御に必要な MCU を含めて、再構成可能なハードウェアと呼ぶ。

Nao_RF の概要

無線センサノードの Nao_RF は 25mm 四方のセンサノードであり、PC と直接接続することが可能なセンサノードと共に外形を図 8 に示す。

MCU には、8bit マイコンである ATMEL 社製 AVR ATmega168 を採用した。プログラムメモリを 16KByte 持ち、10 bits A/D 変換などを有している。また、通信として UART(RS-232C TTL レベル)の通信と SPI シリアル通信、I²C 通信が可能である。無線 IC として ATMEL 社製 AT86RF230 を採用し、2.4GHz 帯での IEEE802.15.4 準拠の通信ができる。

センサには、8 ポートの A/D コンバータか SPI

表 1: ハードウェア仕様
Table 1: Hardware Specifications

MCU	Atmel 社製 AVR ATMEGA168
動作周波数	8MHz
外部 EEPROM	1Mbits
無線送受信	Atmel 社製 AT86RF230
無線通信規格	802.15.4 互換
無線周波帯	2.4GHz 帯
送信出力	最大 3mW
インタフェース	デジタル入出力 8 ports (アナログ入力兼用) USART (Max. 250kbps) SPI (Max. 8Mbps) I ² C
電源	DC 1.8V ~ 3.3V CR2016/CR2025/CR2032
外形寸法	25mm x 25mm x 3mm

通信を使い、温度センサや光センサ、加速度センサを搭載することができる。

4.2 ソフトウェア

4.2.1 無線センサノード

無線センサノードのプログラムは、開発環境にオープンソースで提供されている、gcc と avr-libc を使い、言語は C にて WindowsXP 上で開発した。

センサノードの動作は、3.4 節で述べたように、すべての動作が割り込み処理を基本とした実装を行い、MCU が持つタイマを使い動作する。割り込み動作はすべて、事前にセンサノードへプログラムするため、各割り込み動作はすべて MCU の割り込み先を記述しておく。

配信プログラム動作は、MCU 上のプログラム領域の指定されたプログラムアドレスから実行される。これは、MCU により変更する必要があるが、今回採用した Nao_RF においては、センサ情報解析プログラムは 0x1000 から実行され 2kByte 確保されている。また、各フィルタと解析処理プログラムは、1 フィルタ番号ごとに 1kByte のプログラム領域を確保し、5 番までの 5kByte を用意した。

各プログラム間でのセンサ情報の受け渡しは、特定の RAM 領域を指定することで、B&C 動作とセンサ情報解析プログラム、フィルタと解析処理プログラム間で情報を共有する。また、センサ情報解析プログラムから収集フェーズでの動作を記述するメモリ空間として、32Byte のメモリと、1Byte の送信の有無と、各ステップを指定するメモリとして収集フェーズメモリを設定した。

プログラム書き込み領域を変更する方法は、B&C 動作に実装しており、通信プロトコルにおいてプログラムの配信時に実行される。具体的な例としてセンサ情報解析プログラムを書き換える場合は、MCU

のプログラム領域 0x1000 にスリープ動作のコードを記述し、0x1002 から配信されたプログラムを書き込む。すべての予測プログラムが配信された場合に 0x1000 の領域を消し 0x1002 から動作するよう行うよう書き換えることで、プログラムの再書き込みを実現する。

4.2.2 再構成可能なハードウェア

再構成可能なハードウェアの FPGA の開発には、Actel 社より提供されている Libero8.3 を使い、言語は Verilog-HDL にて WindowsXP 上で開発した。

筆者らの評価実験に用いた、再構成可能なハードウェアによる小型センサノード⁶⁾ から、高速フーリエ変換の一部を変更して、Nao_RF と接続している。高速フーリエ変換は、Actel 社より提供されている、CoreFFT で 8bit 256 ポイントのプログラムを生成し、内部メモリの取り扱いを 1 つの入力データごとにシフトするように変更し、再度計算するよう変更した。これにより連続した短時間フーリエ変換からランニングスペクトルを計算した。

5 検証実験

検証実験として、4 章で実装したセンサノードに、加速度センサを取り付け B&C により 100Hz のサンプリングを行なうプログラムを構築する。加速度センサの 100Hz のセンサデータから、周波数解析結果のピーク周波数を取得するプログラムを動作させる。放送配信によりセンサ情報解析プログラム配信し、低い周波数内のピーク周波数を取得するプログラムを 2 種類用意し順に書き換える。最後に、通常の B&C 動作である配信された予測センサ情報と、加速度センサのデータを比較して送信を行なうプログラムへ書き換える。

フィルタ処理は初めからセンサノードに書き込んでおき、再構成可能なハードウェアによって計算された 256 ポイントの周波数解析結果から、ピークの周波数を返すプログラム、0 から 32 ポイントの間と、32 から 128 ポイントの間でピークの周波数を返すプログラムの 3 つをセンサノードにプログラムしておく。

センサ情報解析プログラムには、再構成可能なハードウェアへセンサデータを送信し、256 ポイントの周波数解析結果を受信するプログラムを記述する。次にそれぞれのフィルタ処理を使う関数を呼び出す、最後に配信されたセンサデータ解析情報と比較し、B&C の収集フェーズメモリに記録する。また、通常の B&C 動作のプログラムとして、センサデータと配信されたプログラムを比較し収集フェーズメモリに記録するプログラムを記述する。プログラムサイズは、ランニングスペクトルを用いるプ

プログラムで、3種類とも248 Byteとなり、通常のB&C方式の動作を行なうプログラムが、216 Byteであった。

これらのプログラムを実際の無線センサノードにプログラムし、パソコンに取り付けた放送ノードからセンサ情報を配信することで、提案システムが正常に動作することを確認した。

6 まとめ

本研究では、放送型配信を用いたB&C方式に、センサデータ解析情報と解析プログラムを配信するシステムを構築することで、加速度センサ等の周波数の高いセンサデータから、状況変化に対応でき、効率良くセンサ情報を収集するシステムを提案した。また、SHMで用いることを想定して、センサノードに加速度センサより得られたセンサデータを、再構成可能なハードウェアを用いてランニングスペクトルを求め、必要となる周波数情報のみを取り出すプログラムの実装を行なった。さらに、必要となる周波数情報の変更のため、センサ情報解析プログラムを放送により配信することで、提案手法が正しく動作することを確認した。また、これまでに提案していた予測プログラムをすべて書き換える方式のプログラムを同様に生成したところ700Byteを超えることから、1/3程度の通信量でプログラムを書き換えられたことになる。SHMでは、センサノードが同じ構造物に多く設置され、類似したセンサ情報を取得することで構造物の健全性を診断する特徴から、放送配信によるB&C方式を用いることは有効であると考えられる。

今後は、再構成可能なハードウェアへの解析プログラムの変更が行なえるようにすることで、複雑な解析処理をセンサノード上で柔軟に行なえるシステムを提案し、実際の橋梁などの構造物に取り付け、SHMとして有効であることを検証していきたい。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金(基盤(A))「ユビキタス環境のための全体プログラミング方式」(課題番号:20240007)の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Farrar, C. R., Park, G., Allen, D. W. and Todd, M. D.: Sensor network paradigms for structural health monitoring, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13, No. 1, pp. 210–225 (2006).
- 2) Lynch, J. P.: Overview of Wireless Sensors for Real-Time Health Monitoring of Civil Structures, *Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Control and Monitoring*, pp. 189–194 (2004).
- 3) Graizer, V., TQ, C., Shakal, A. and Hipley, P.: Data from downhole arrays instrumented by the California Strong Motion Instrumentation Program in studies of site amplification effects, *Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation* (2000).
- 4) 藤田直生, 義久智樹, 塚本昌彦: 放送配信を用いたデータ予測型センシングシステムの実装と評価, 信学技報, USN2008-49, Vol. 108, No. 252, pp. 63–68 (2008).
- 5) 藤田直生, 義久智樹, 塚本昌彦: プログラム配信によるデータ予測型センシングシステム, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2008) 論文集, 情報処理学会, pp. 1724–1731 (2008).
- 6) 田中 聡, 柳沢 豊, 寺田 努, 塚本昌彦: 再構成可能なハードウェアによる省電力機構をもつ小型センサノードの実現, 信学技報, USN2008-49, Vol. 108, No. 252, pp. 117–122 (2008).
- 7) Amol, D., Carlos, G., R., M. S., M., H. J. and Wei, H.: Model-driven data acquisition in sensor networks, *Proc. of the International Conference on Very Large Data Bases (VLDB 2004)*, pp. 588–599 (2004).
- 8) Wang, L. and Deshpande, A.: Predictive Modeling-Based Data Collection in Wireless Sensor Networks, *Wireless Sensor Networks 5th European Conference EWSN 2008*, LNCS, Vol. 4913, Springer Berlin Heidelberg, pp. 34–51 (2008).
- 9) Liu, T. and Martonosi, M.: Impala: a middleware system for managing autonomic, parallel sensor systems, *PPoPP '03: Proceedings of the ninth ACM SIGPLAN symposium on Principles and practice of parallel programming*, New York, NY, USA, ACM, pp. 107–118 (2003).
- 10) Kim, C. W., Kawatani, M., Tsukamoto, M. and Fujita, N.: Wireless Sensor Node Development for Bridge Condition Assessment, *Advances in Science and Technology*, Vol. 56, pp. 573–378 (2008).