

社会基盤構造ヘルスマモニタリングのための MEMS を用いたセンサノード開発

長岡技術科学大学 正会員 ○宮下 剛
長岡技術科学大学 正会員 長井正嗣

1. はじめに

長大橋梁などの空間スケールの大きな社会基盤構造物をモニタリングする場合、多数のセンサを配置したいことが往々にしてある。しかし、今のところ、センサは高精度であるものの、その価格が問題となり、多数のセンサを用いたモニタリングを実施することが困難な状況である。

構造ヘルスマモニタリングの分野では、MEMS(Micro Electro Mechanical System)技術の進展を背景とし、社会基盤構造物への応用を想定したセンサノード、センサネットワークに関する研究^{1),2),3),4)}が積極的に行われている。しかし、研究に用いられているセンサプラットフォームを入手することは難しい。そこで、本研究では、社会基盤構造物を広範囲にモニタリングすることを可能とするために、一般に入手可能である MEMS 製品を利用した安価なセンサノード開発を目的とした。ここでは、開発に係る基礎的な取組みについて報告する。

2. センサノード開発概要

センサノードのコアとなる MCU(Micro Controller Unit)の選定では、入手性、開発環境、情報量などを考慮して、Microchip 社の PIC シリーズを利用することとした。センサノードの一義的な要求事項として、任意のアナログ入力(当面は三軸加速度)、100Hz 程度のサンプリング周波数、データの長時間記録、小型軽量化、とした。時間同期、無線通信は、二義的な要求事項とした。開発環境は、現在では、効率性を考慮して、プログラマに MPLAB ICD2、開発言語に CCS 社 C コンパイラを利用している。

センサノードのプロトタイプおよび構成をそれぞれ図 1, 2 に示す。現時点では、まだテストおよび設計変更が容易に行えるようにブレッドボード上に実装している。性能は、リアルタイムクロック(RTC)モジュールによるタイムスタンプを付加しながら、三軸加速度計のアナログ出力を PIC のタイマによる周期的な割り込みを利用して 100Hz のサンプリング周波数で計測することが可能である。計測開始はプッシュボタンにより行う。計測データは MMC/SD カードに記録され、PIC に FAT ファイルシステムを実装しているため PC ではテキスト形式で直接読み込むことが可能である。動作は 6P 型 9V アルカリ乾電池一個により 5V で行い、約一時間の計測が可能であることを確認している(それ以上の動作も当然可能である)。図 3 に既設鋼トラス橋の垂直材に取付けて車両走行時の振動計測を行い、動作確認を実施した際の計測結果の一例を示す。

3. センサノード構成

図 2 をもとにセンサノードの各構成要素について、実装経緯、今後の課題を含めた説明を行う。

(1) Processing

MCU としては、初めに PIC16F877A を利用した。次に MMC/SD カードへのデータ記録を可能にするために PIC18F452 を利用し、現在では I/O ピン数(34)、RAM 容量(2KB)、動作速度(48MHz)を考慮して PIC18F4550 を利用している。ただし、いずれにおいても内蔵 AD コンバータ(ADC)モジュールは用いていない。外部オシレータとして秋月電子から入手可能な多出力クリスタルオシレータ EX03 を利用している。今後は、高性能 MCU として dsPIC などの利用を考えている。

(2) Sensing & Signal Conditioning

加速度計として、秋月電子から入手可能な三軸加速度センサモジュール(KXM52-1050)を用いた。測定レンジは $\pm 2g$ 、感度は 1000mV/g(電源 5V 時)である。ADC は Microchip 社の MCP3208 である。分解能は 12 ビット、計測チャンネルはシングルエンドで 8、サンプリング周波数は 100kHz(電源 5V 時)である。PIC とはソフトウェア(SW)SPI(Serial Peripheral Interface)により通信している。今後は、ADC の分解能向上のために $\Delta\Sigma$ タイプ ADC の利用、信号調節のためにフィルタ、DC-DC コンバータ、フォトカプラ、基準電圧 IC、OP アンプの実装などについて検討する必要がある⁵⁾。センシングする物理量についても加速度の他にひずみ・変位などを考えている。

(3) Memory

初めは、MCP3208 による 12 ビットの変換データを記録するために、外部 EEPROM として 24C256 を二個利用した。これは、12 ビットデータの低位 8 ビットを片方に記録し、残り上位 4 ビットをもう片方に記録するためである。次に、記録を長時間化させるために、24C1024 を二個利用した。外部 EEPROM を用いた場合、書き込み速度が遅いため、4CH 分のデータを 40Hz で計測することが限界であった。この後、書き込み速度を向上させるために、Ramtron 社の FeRAM メモリ FM24C256 を二個利用した。その結果、100Hz での計測が可能となった。以上のいずれとも PIC との通信は、ハードウェア(HW)²C(Inter-Integrated Circuit)により行っている。

現在では、計測時間をさらに長時間化させるために、データを MMC/SD カードに記録している⁶⁾。ここでは、Brush Electronics 社の CCS C コンパイラ用の SD/MMC Card File System ドライバ⁷⁾を利用している。PIC に FAT ファイルシステムを構築し、4CH 分のデータを 100Hz のサンプリング周波数にてテキスト形式により記録することが可能となった。PIC との接続は、HW SPI により行っている。PIC 側は 5V 動作、MMC/SD カード側は 3.3V 動作であるため、9V 乾電池から三端子レギュレータにより 5V と 3.3V を作成し、両者の通信ではロジック IC として TC74VHC125 を使用している。

(4) Communication

センサノードからの計測データの取込みおよびデバックを行うために、PC との通信は RS232C インターフェース IC(MAX232)を介して行っている。PIC との接続は、HW/SW USART(Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter)により行っている。また、動作状況を確認するために LCD(SC2004CSLB)を利用している。

PIC18F4550 は USB2.0 内蔵モジュールを有するため、センサノードを USB デバイス化させることが可能であるものの、FAT ファイルシステムと CDC(Communication Device Class)クラスの実装がプログラムメモリの制約から困難な状況にある。USB デバイス化が可能となれば、PC からの電源供給やデータアクセスが容易となるため、今後も検討を進める。

文献 2)で提案されている“Smart sensor”の要求項目の一つにワイヤレス化がある。本プロトタイプにおいても無線通信に関する基礎的な検討を行っている。まず、野村エンジニアリングの特定小電力無線モジュール TS02A を用いた⁸⁾。これはモジュール単体にて技術基準適合証明を取得済みであるため、

キーワード 構造ヘルスマモニタリング, MEMS, センサ, 振動, 橋梁

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 環境・建設系 TEL: 0258-47-9641 Email: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

免許申請などは不要である。通信距離は見通し距離で 200m 以上、環境が良好であれば 500m 以上とされている。PIC との通信は USART により行う。ただし、伝送速度が平均 1800bps であるため、リアルタイムでの計測データ転送は困難であった。今後は、伝送速度が大幅に向上した野村エンジニアリングの特定小電力無線モジュール TS24 の利用を考えている。また、LANTRONIX 社の X-Port、Microchip 社の ENC28J60、PIC18F67J60 などを利用した Ethernet 通信の検討を進めたい。

(5) Synchronization

多数のセンサノードを利用して広範囲なモニタリングを行う場合は、センサ間の時間同期が重要となる。ここでは、秋月電子から入手可能な RTC モジュール(RTC-8564NB)、マイクロテック社の超高精度 UART RTC モジュール(RTC-10)、GARMIN 社の GPS モジュール(GPS15L)による検討を行った。

RTC-8564NB は PIC との通信を I²C により行う。現在は、PIC へプログラムを書き込む前にプログラム上で日時を設定を行っている。計測では、開始からの経過時間(秒)をタイムスタンプとして、図 4 に示すように三軸加速度計のデータとともにテキストファイルに書き出している。

RTC-10 は温度補償型 RTC モジュールであり、PIC とは USRAT による通信から日時を得ることが可能である。また、ボタン電池 CR2032 によるバッテリーバックアップ機能付きであるため、電源切断時でも約 500 時間の動作が可能である。

GPS15L は 3.3~5.4VDC で動作し、1s 毎に NMEA0183 フォーマット形式のデータを送信する。PIC との通信は USART により行い、GPGGA あるいは GPRMC センテンスから、図 5 に示すように時刻の取得を行う。

今後は、計測開始前に、まず GPS から時刻を取得し、RTC-8564NB の時間設定を行う。ここでは、10ms 以下の時刻同期精度が必要と思われる。次に、RTC-10 のようなバッテリーバックアップ機能を RTC-8564NB に実装させ、センサノード

の主電源が切断しても時刻保持を可能としたい。

(6) Power

センサノード全体を 6P 型 9V アルカリ乾電池一個から三端子レギュレータにより 5V と 3.3V を作成して動作させている。3.3V は MMC/SD カードおよびロジック IC に供給している。今後は、動作時間、消費電力についても検討する必要がある。PIC のスリープ機能を利用した低消費電力化や太陽電池などを利用した電源の長時間化について考える。

4. まとめ

今後、作成したプロトタイプからセンサネットワークを構築して多点同期計測を可能にするためには、時間同期と通信について特に検討を進める必要がある。また、実構造物への適用を行いながら、精度・動作検証を進める。

謝辞:本研究は、平成 18 年度日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(スタートアップ)により遂行しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Lynch, J. P., "Decentralization of Wireless Monitoring and Control Technologies for Smart Civil Structures", Ph.D. Dissertation, Stanford Univ., 2002.
- 2) Spencer Jr., B. F. et al.: "Smart Sensing Technology: Opportunities and Challenges," *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 11, No. 4, pp. 349-368, 2004.
- 3) 三田他: 構造ヘルスマニタリング用ワイヤレスセンサに関する研究, 日本地震工学会論文集, Vol3, No.4, pp.1-13, 2003.
- 4) Aoki S. et al.: Intelligent bridge maintenance system using MEMS and network technology, Proc. of SPIE, Vol.5057, pp.37-42, 2003.
- 5) 秦ら: PIC マイコンの基礎とセンサ活用入門, CQ 出版社, 2005.1.
- 6) トランジスタ技術 2007 年 2 月号, CQ 出版社
- 7) <http://www.brushelectronics.com/index.php?page=software#SDFS>
- 8) トランジスタ技術 2006 年 2 月号, CQ 出版社

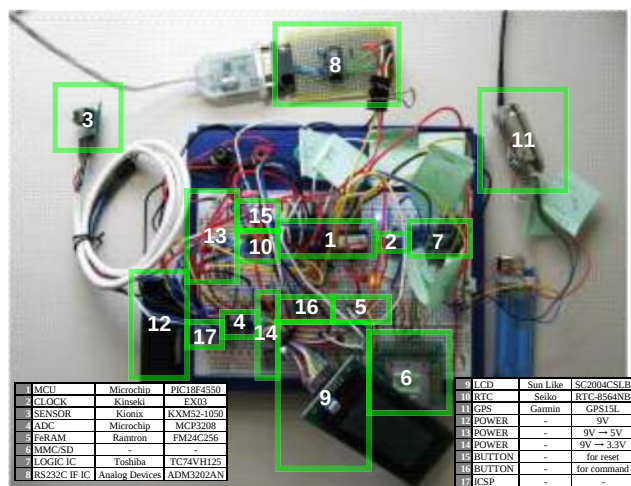


図1 センサノードプロトタイプ

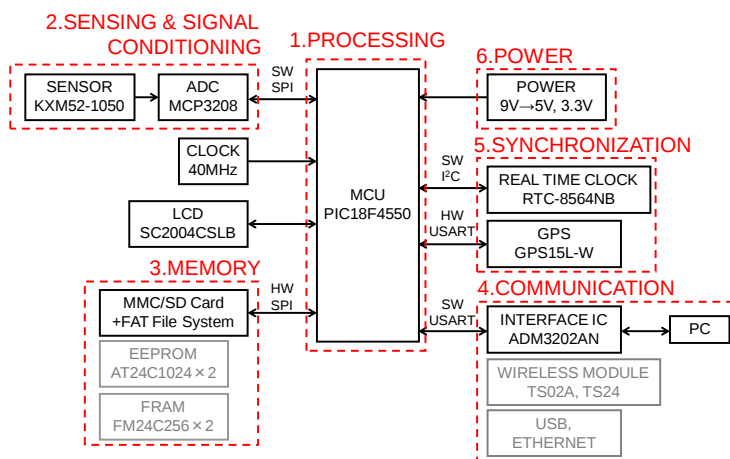
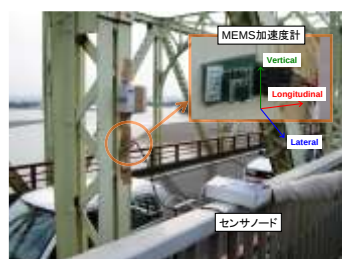
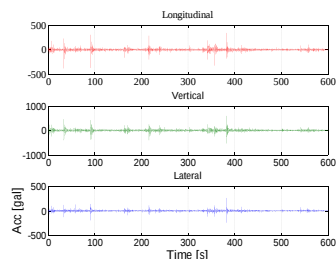


図2 センサノード構成



(a) 計測概況



(b) 計測結果

図3 実構造物での動作検証

タイムスタンプ 三軸加速度

110	30	41244	43012	40704
111	30	41008	43264	40640
112	30	41216	43136	40640
113	30	41024	43264	40592
114	30	41216	43072	40592
115	30	40992	43264	40720
116	30	41216	43008	40624
117	31	41088	43136	40664
118	31	41216	43152	40960
119	31	41120	43024	40752
120	31	41216	43152	40960
121	31	41216	43024	40816
122	31	41088	43008	40816

図4 計測データ例



図5 GPSデータのLCD表示