

센서 네트워크를 이용한 교량 안전진단 시스템 구현

박충명*, 허난숙*, 김동국**, 서동만**, 이좌형**, 김 윤*, 정인범*

*강원대학교 컴퓨터전공

**강원대학교 컴퓨터정보통신공학과

e-mail:cmpark@snslab.kangwon.ac.kr

The Implementation of a Structural Health Monitoring System of Bridge based on Sensor Network

Chong-Myung Park*, Nan-Sook Heo*, Dong-Gook Kim**,

Dong-Mahn Seo**, Joa-Hyoung Lee**, Yoon Kim*, In-Bum Jung*

*Dept. of Computer Engineering, Kangwon National Univ.

**Dept. of Computer Information & Telecommunication Engineering, Kangwon National Univ.

요 약

무선 센서 네트워크는 교량 안전진단(Structural Health Monitoring, SHM)을 위한 효율성, 신뢰성 등의 특징들을 제공한다. 그러나 현재 교량 안전진단은 아날로그 센서를 이용하여 데이터를 수집하고, 유선망을 사용하여 관리프로그램으로 전송하고 있다. 본 논문에서는 무선망에서 동작하는 센서 네트워크를 이용하여 교량 및 노면을 모니터링하기 위한 안전진단 시스템을 구현하였다.

1. 서론

최근 외부 이벤트를 감지하여 RF (Radio Frequency)를 이용해 전달하는 센서 네트워크 기술이 활발히 연구되고 있다[1]. 도로 유지관리 측면에서도 센서 네트워크 기술이 적용되고 있으나, 지능형 교통정보 시스템 등 일부 분야에 국한되어 있다. 교량이나 도로의 상태를 현장에서 직접 파악하고 대처하는 현재의 방법은 효율성, 신뢰성 및 신속성 등에서 문제점을 가지고 있다. 무선 센서 네트워크를 이용하면 그림 1에서 보는바와 같이 WEB을 통하여 원격으로 각 부분의 문제점을 실시간으로 파악하고 신속하게 대처할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 시스템을 구축하기 위해 LVDT 센서와 Micaz 모드를 이용하여 교량에 전해지는 진동을 측정할 수 있는 교량 안전진단 시스템을 구현하였다.



그림 1. 센서 네트워크를 이용한 도로 관리 시스템.

2. 관련연구

2.1. 센서 네트워크

센서 네트워크란 센서가 달려 있어 센싱이 가능하고 수집된 정보를 가공할 수 있는 프로세서가 달려있으며 이를 전송할 수 있는 무선 송수신기를 갖춘 소형장치, 즉, 센서 노드로 구성된 네트워크를 의미한다. 센서 네트워크의 일반적인 특징은 그 성향이 비슷한 애드혹(Ad-hoc) 네트워크에 비해 상대적으로 그 규모가 크고 많은 센서 노드가 조밀하게 배치될 수 있다는 점이다. 센서 노드는 열악한 환경 속에서 동작하므로 쉽게 그 기능을 수행하지 못할 수 있고 네트워크 토폴로지가

* 본 논문은 강원대학교 두뇌한국21사업에 의해 지원되었음.

* 본 논문은 강원대학교 산학협력중심대학사업에 의해 지원되었음.

* 본 논문은 임베디드 소프트웨어 협동연구센터의 지원을 받아 수행하였음.

매우 빈번하게 변경될 수 있다. 기존의 네트워크는 일대일 통신이 고려 대상이었지만 센서 네트워크에서는 브로드캐스팅 패러다임이 주로 이용된다. 센서 노드들은 전원, 메모리를 비롯한 하드웨어 자원뿐만 아니라 계산능력 또한 매우 제한된다. 또한 센서 노드들은 하나의 목적물을 위하여 배치된 수가 많기 때문에 IP 주소와 같은 국제적인 식별자를 갖는 것이 어렵다[2].

2.2. 구조물 안전 진단 시스템

구조물의 파손을 찾아내고 상태를 감시하는 일련의 과정을 구조물 안전진단(Structural Health Monitoring, SHM)이라고 한다. SHM을 구현하기 위한 다양한 방법들이 시도되어왔다. 전통적인 방법으로 구조물의 상태를 육안으로 확인하는 방법이 있다. 하지만 이 방법은 가시적인 증상만을 발견할 수 있고, 관찰자의 판단이 항상 정확하지 않을 수 있는 문제를 가지고 있다. 또 다른 방법으로는 구조물의 내부 상태를 분석하는 진단 장비를 사용하는 것이다. 이 방법은 지역적인 부분의 피해 정도를 파악할 수 있지만, 구조물 전체적인 감시 시스템에는 적합하지 않다. 센서 네트워크를 이용하면 앞서 설명한 방법들의 문제점을 개선하여 효율적이고 신뢰성 있는 시스템을 설계할 수 있다 [3].

3. 시스템 설계 및 구현

3.1. 시스템 개요

그림 2는 개발된 시스템의 구성을 나타낸다. 시스템은 교량 및 노면의 진동을 감지하는 LVDT 센서, 감지된 아날로그 신호를 센서 노드로 전달하는 MDA300CA와 수신된 데이터를 처리하는 호스트 PC로 구성되어 있다. 사용한 센서 노드는 버클리 대학의 Micaz 모트이고, LVDT 센서를 모트에 연결하기 위한 데이터 수집 보드(Data Acquisition Board)로 MDA300CA 보드를 사용하였다.

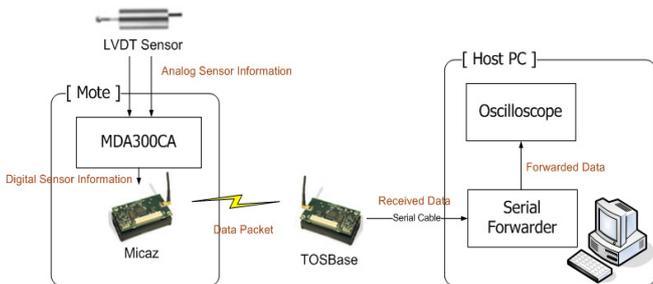


그림 2. 시스템 구성.

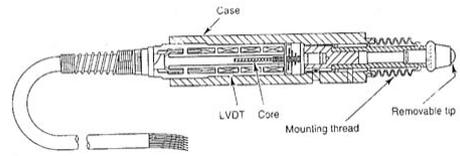


그림 3. LVDT 구조.

3.2. 시스템 구성

교량에 전해지는 진동을 감지하기 위해 하중 감지 센서인 LVDT(SDP-100C)을 사용하였다. 그림 3은 일반적인 LVDT 센서의 구조를 나타낸다. 기계적 변위를 전기적인 신호로 바꿔주는 LVDT는 코어(core or armature)의 이동으로 1차 코일에서 2차 코일에 유도되는 자속의 변화, 즉 상호 인덕턴스를 변화시키는 변환기(Transducer)이다. LVDT 센서는 기계적, 전기적으로 분리되어 움직일 수 있는 코어의 변위에 비례하여 전기적 출력이 발생된다. 발생된 전기 신호는 MDA300CA를 통해 Micaz 모트로 전달된다.

LVDT로 부터의 데이터는 MDA300CA와 같은 데이터 수집 보드를 통해 모트에 전달될 수 있다. MDA300CA는 그림 4와 같이 아날로그 채널(A0~A13), 디지털 채널(D0~D5), 인터널 채널(Internal Channel) 등을 가지고 있다. 그림 4의 핀 할당표는 각 핀과 대응되는 채널을 나타내며, 본 논문에서는 LVDT 센서의 출력 전압인 $2.5mV \pm 0.2%$ 에 대응되는 아날로그 채널 7(채널 범위 : $\pm 12mV$)을 사용하였다.

또한 센서 네트워크를 구성하는 플랫폼으로 Micaz 모트를 사용하였다. Micaz 모트는 51핀 확장 커넥터에 센서를 연결하여 사용할 수 있어, MDA300CA를 커넥터에 연결하여 외부 센서로부터 데이터를 수신하도록 하였다. 또한, MDA300CA로부터 데이터를 샘플링하는 프로그램을 프로그래밍보드(MIB510)를 이용하여 호스트 PC에서 Micaz 모트로 포팅하였다[4][5].

A0 or A11+	Single-ended analog channel 0 or differential analog channel 11 positive side
A1 or A11-	Single-ended analog channel 1 or differential analog channel 11 negative side
A2 or A12+	Single-ended analog channel 2 or differential analog channel 12 positive side
A3 or A12-	Single-ended analog channel 3 or differential analog channel 12 negative side
A4 or A13+	Single-ended analog channel 4 or differential analog channel 13 positive side
A5 or A13-	Single-ended analog channel 5 or differential analog channel 13 negative side
A6	Single-ended analog channel 6
A7+ A7-	Differential analog channels 7
A8+ A8-	Differential analog channels 8
A9+ A9-	Differential analog channels 9
A10+ A10-	Differential analog channels 10
DATA	I2C Data
CLK	I2C Clock
D0 - D6	Digital Lines D0 to D6
C	Counter Channel
LED1	RED LED
LED2	GREEN LED
E5.0	5.0 V excitation
E3.3	3.3 V excitation
E2.5	2.5 V excitation
Vcc	Vcc of the Mote
RL1	Relay one sides (Normally-Open)

그림 4. MDA300CA 평면도와 핀 할당.

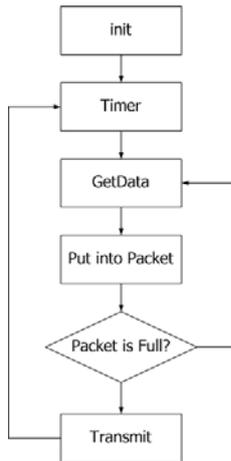


그림 5. 데이터 샘플링 과정.

3.3. 데이터 샘플링

그림 5는 Micaz 모트에서 MDA300CA로 부터 데이터를 샘플링하는 과정을 나타낸다. *init* 과정에서 타이머 컴포넌트 등 사용되는 컴포넌트들을 초기화하며 프로그램을 시작한다. 타이머는 정해진 시간마다 이벤트를 발생시키고 이벤트 발생시 ADC(Analog to Digital Converter) 컴포넌트에서 *GetData()* 함수를 통해 MDA300CA의 아날로그 채널로부터 데이터를 샘플링하고 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한다. 데이터 샘플링이 완료되면 이벤트가 발생하며 이벤트 처리 루틴에서 패킷에 데이터를 적재하고 데이터 버퍼를 채운 후 베이스 스테이션으로 전송한다. 전송 과정에서 패킷 전송이 완료되었는가를 검사하여 패킷 전송 실패시 재전송하여 데이터 전송 오류를 줄였다.

3.4. 패킷

TinyOS는 Active Message를 사용한다. Active Message란 패킷 내에 메시지 타입을 포함하고 있어, 수신측에서 타입에 따라 명령을 수행하는 방법이다. 본 논문에서는 TinyOS의 Active Message 구조체인 *TOS_Msg* 패킷의 데이터 영역에 호스트 PC의 모니터링 툴인 오실로스코프의 메시지 패킷(*OscopeMsg*)을 포함시켜 패킷을 구성하였다.

3.5. 오실로스코프

오실로스코프는 호스트 PC에서 수신된 데이터를 그래프를 통해 보여주며, 데이터를 데이터베이스에 저장하는 역할을 한다. *OscopeMsg*의 *MoteID*와 *Channel*에 따라서 각각의 그래프를 출력한다.

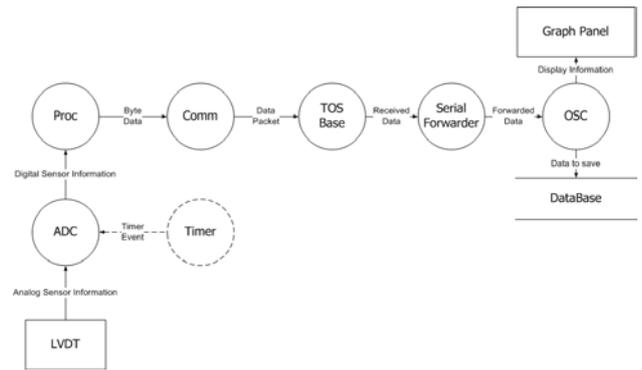


그림 6. 자료 흐름도.

3.6. 자료 흐름

그림 6은 시스템의 자료 흐름도를 나타낸다. 시스템 초기화시에 ADC 컴포넌트의 샘플링 레이트와 타이머를 결정한다. 타이머 구동시 *TIME_REPEAT* 파라미터를 설정해 특정 시간마다 반복하여 이벤트를 발생시키도록 한다. 타이머 컴포넌트에서 Timer Event 가 발생하면, 이벤트 처리 루틴(*Timer.fired*)의 ADC 컴포넌트는 모트에 연결된 MDA300CA의 아날로그 채널을 통해 LVDT 센서의 데이터를 샘플링하고, 아날로그 데이터를 디지털 데이터로 변환한다. 변환된 데이터는 Comm 컴포넌트에서 RF를 이용해 베이스 스테이션으로 전송된다. 베이스 스테이션은 수신된 데이터를 Serial Forwarder 인터페이스를 통해 호스트 PC로 전달하고, 호스트 PC의 오실로스코프 프로그램에서 데이터를 수신하여 그래프로 출력함과 동시에 데이터베이스에 저장한다.

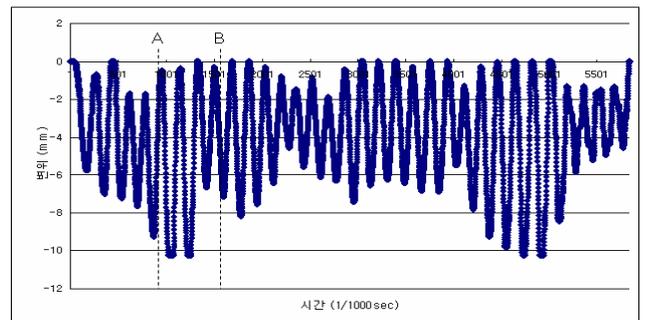


그림 7. 유선 측정기를 이용한 변위 측정값.

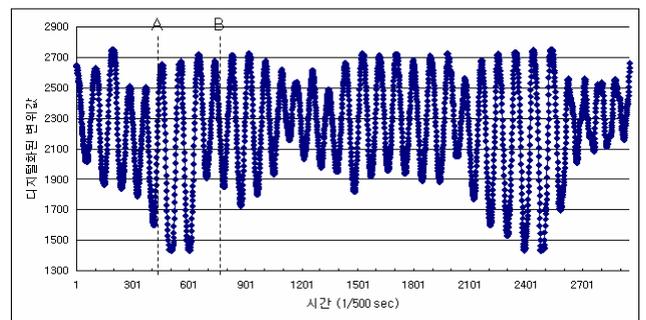


그림 8. 센서 네트워크를 이용한 변위 측정값.

기존 유선 계측기		Micaz		증감비율(I)	오차율(E)
변위	증감(X)	변위	증감(Y)		
-0.51	.	2642	.	.	.
-10.24	-9.73	1434	-1208	124.15	0.01
-0.335	9.905	2668	1234	124.58	0.33
-10.24	-9.905	1433	-1235	124.68	0.42
0	10.24	2710	1277	124.71	0.43
-6.615	-6.615	1896	-814	123.05	0.89
-0.335	6.28	2675	779	124.04	0.10
-7.16	-6.825	1829	-846	123.96	0.17

표 1. 그래프 결과 분석.

4. 실험 결과 및 분석

실험은 하나의 진동판에 LVDT 센서 2개를 부착하고, 센서를 토목분야에서 사용되는 유선 계측기와 Micaz 모트에 각각 연결하여 같은 진동에 대하여 변위 값을 측정하였다. 그림 7, 8은 시간에 따른 변위 측정 그래프이다. 토목분야에서 사용되는 기존의 유선 계측기는 LVDT센서에서 발생하는 전압을 mm 단위로 환산하여 결과를 출력하지만 센서 네트워크를 이용한 방법에서는 결과 값이 mm 단위가 아닌 ADC에서 변환된 디지털화된 값을 나타내기 때문에 값의 차이가 발생한다. 데이터가 다르더라도 결과 값의 변화율이 같게 나타난다면, RF를 이용해 측정한 값이 유효하다고 할 수 있다.

표 1은 그림 7, 8의 구간 A-B에서 시간에 따른 변위 데이터를 분석한 표이며, 유선 계측기와 센서 모트를 이용해 측정한 변위값, 값의 증감(X, Y), 증감 비율(I)과 증감 비율의 오차율(E)을 나타내었다. 증감 비율 및 오차율은 식(1)과 식(2)를 이용해 구할 수 있다.

$$I = \frac{Y}{X}, \quad \text{식(1)}$$

$$E = \left| \frac{I \times n}{\sum_{k=1}^n I_k \times 100} \right|. \quad \text{식(2)}$$

표 1에서 증감 비율의 오차가 1% 미만으로 적게 나타나는 것을 알 수 있고, 센서 네트워크와 LVDT를 이용하여 측정된 데이터에 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 센서 네트워크를 이용한 교량 안전 진단을 위한 시스템을 구현하였다. 안전진단을 위해 일반적으로 눈으로 확인하거나 유선 계측 장비를 이용하는 방법을 사용한다. 하지만 센서 네트워크를 이

용하여 유선에서의 신속성 및 신뢰성의 문제를 해결할 수 있으며, 실험을 통해 센서 네트워크 사용의 유효성을 확인하였다. 하지만 앞서 제기된 측정값의 mm로의 환산 문제를 해결해야 하며, 실제로 필드에 많은 노드들이 있을 경우에 멀티 홉 라우팅 프로토콜과 노드들 간의 시간 동기화에 관한 연구가 있어야 한다[6][7]. 또한, 앞으로 본 시스템을 웹을 통한 실시간 모니터링 시스템과 연동시켜 신속하고 편리한 교량 및 도로의 안전진단 환경을 구축해야 한다.

참고문헌

- [1] D. Culler, D. Estrin, M. Srivastava "Overview of Sensor Networks" IEEE Computer Society pp.41-49 August 2004.
- [2] Akyildiz, I.F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci "A Survey On Sensor Networks" IEEE Communications Magazine pp.102-114 August 2002.
- [3] A. Basharat, N. Catbas, M. Shah "A Framework for Intelligent Sensor Network with Video Camera for Structural Health Monitoring of Bridges" Proceedings of Third IEEE International Conference on PerCom March 2005.
- [4] J. Hill and D. Culler "Mica: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks" IEEE Micro. vol 22 No6 pp.12-24 Nov/Dec 2002.
- [5] Crossbow (<http://www.xbow.com>).
- [6] H. Gharavi and K.Ban "Multihop Sensor Network Design for Wide-Band Communications" Proceedings of the IEEE vol. 91 No8 pp.1221-1234 August 2003.
- [7] J. Elson and D. Estrin "Time synchronization for wireless sensor networks" Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS-01) IEEE Computer Society p.186 April 2001.