진동 기반 실시간 교량 안전 진단 시스템을 위한 효율적 무선 센서 네트워크 프로토콜

김준석, 황근하, 송대섭, 권영구
건국대학교 전자공학과

Efficient Wireless Sensor Network Protocol for Vibration-based Real-time Structural Health Monitoring System

Junseok Kim, Keunha Hwang, Daeseop Song, and Younggoo Kwon
Department of Electronic Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

진동 기반의 실시간 교량 안전 시스템을 구축하기 위해서는 각 진동 센서가 발생하는 다량의 데이터를 손실 없이 중앙서버로 전달하여야 한다. 또한 전체적 구조 변이를 분석하기 위하여 다수의 무선 진동센서 노드들의 샘플링 동기를 맞춰야 한다. 본 논문에서는 무선진동센서 노드들의 동기를 맞추고, 다량의 데이터를 효율적으로 전달하는 무선 센서 네트워크 프로토콜을 제안한다. 실험을 통하여 제안된 프로토콜이 기존의 멀티홉 라우팅에 비해 크게 성능을 향상시킴을 검증하였다.

1. 서 론

최근, 무선 센서 네트워크를 이용한 실시간 교량 안전 진단 시스템 구축 기술이 활발히 연구되고 있다[1]. 일반적으로 교량 안전 진단 시스템은 수십(백) 개의 유선 센서를 동축 케이블을 통하여 중앙 데이터 수집 장치에 연결하여 구축한다. 따라서 긴 교량의 안전 진단 시스템을 구축하기 위해서는 매우 큰 인적, 물적 자원이 필요하다. 무선 센서 네트워크 기술을 이용한다면 실시간 교량 안전 진단 시스템 구축비용을 획기적으로 줄일 수 있다[1][2][7].

진동 기반의 실시간 교량 안전 진단 시스템을 구축하기 위해서는 두 가지의 중요한 요구사항을 충족시켜야 한다. 첫째로 한 상판(segment)에 위치한 여러 진동센서들의 샘플링 동기를 맞춰야 한다. S. Pakzad et al.[2]은 샘플링 동기를 맞추기 위하여 flooding time-synchronization protocol (FTSP)을 이용하였다. FTSP는 멀티홉(multi-hop) 네트워크의 동기화를 위하여 다량의 패킷을 교환하기 때문에 매우 큰 오버헤드를 발생시킨다.

두 번째로 진동센서들이 발생시킨 다량의 데이터를 손실 없이 중앙 서버로 전달하여야 한다. 예를 들어 교량의 25Hz 이하의 진동을 감지하기 위하여 각 무선진동센서 노드는 최소 50Hz로 진동 값을 샘플링 하여야 한다. 하나의 진동 값은 2바이트로 출력되기 때문에 각 진동 센서는 초당 100바이트의 데이터를 출력하게 된다.

기존의 연구[4,5,6,7]에서는 무선진동센서 노드와 중앙 서버간에 원홉(one-hop) 또는 작은 규모의 네트워크 망을 구축해 왔다. 이와는 다르게 S. Pakzad et al.[2]은 흐름 제어 프로토콜인 Straw[3]와 TinyOS[9]의 기본 멀티홉 라우팅 프로토콜인 MintRoute을 이용하여 64개의 노드를 금문교에 부착하여 성능을 측정하였다. 하지만 일반적인 멀티홉 라우팅은 경로가 길어질수록 전송지연이 크게 증가하게 된다. 또한 노드들이 데이터를 포워딩하기 위해서 매우 많은 에너지를 소비하게 된다.

본 논문에서는 진동 기반의 실시간 교량 안전 진단 시스템 구축을 위한 효율적인 무선 센서 네트워크 프로토콜을 제안한다. 제안된 프로토콜에서는 각 무선진동센서 노드들의 샘플링 주기를 코디네이터(coordinator)들의 Beacon들을 통해서 맞추게 된다. 또한 코디네이터들은 다량의 진동 데이터를 효율적으로 중앙 서버로 전달하기 위하여, 흐름 제어를 수행한다. 제안된 프로토콜은 실제 교량에서의 테스트로 검증되었으며, 기존 멀티홉 라우팅 방식에 비해서 높은 전송률과 낮은 에너지 소비를 보이고 있다.

2. 프로토콜 설계

2.1 시스템 개요

우리는 Lynch et.al.[4] 연구를 기반으로 그림 1.과 같이 실시간 교량 안전 진단 시스템을 구축하였다. 한 지간(span)에는 9개의 무선진동센서 노드가 일정한 간격으로 배치된다. 무선진동센서 노드는 2개의 AA 베터리로 작동한다. 지간 가운데에 1개의

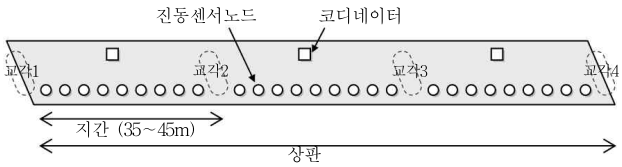


그림 1 무선 센서 네트워크 기반 교량 모니터링 시스템

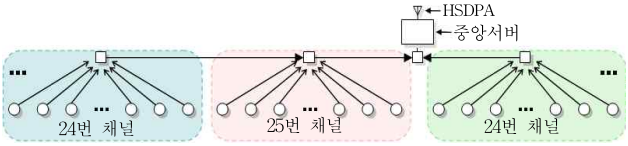


그림 2 전체 네트워크 토폴로지

코디네이터 노드가 배치된다. 코디네이터는 가로등 등에 부착되어 전원을 공급 받는다. 그림 2.와 같이 9개의 무선진동센서 노드와 1개의 코디네이터가 하나의 클러스터를 형성하고 각 인접한 클러스터는 충돌을 회피하기 위해서 다른 주파수 채널을 사용한다. 모든 진동 데이터는 코디네이터간의 멀티홉 라우팅을 통해 중앙서버로 수집된다. 무선진동센서 노드의 overhearing을 줄이기 위하여 중앙서버 노드와 코디네이터간의 통신은 별도의 주파수 채널을 사용한다. 이후 중앙서버에서 처리된 결과는 HSDPA 등을 통하여 원거리에 위치한 관리자 서버로 전송된다.

2.2 무선 진동 센서 동기화

한 상판에 위치한 진동센서들의 샘플링 동기를 맞추기 위하여 코디네이터들은 주기적으로 Beacon을 전송한다. 우선 코디네이터 채널을 통하여 주기적으로 코디네이터간의 동기를 맞춘다. 상판 중앙에 위치한 코디네이터가 코디네이터 Beacon (C-beacon)을 브로드캐스트(broadcast)한다. 이후 각 코디네이터는 자신의 클러스터 채널 상에서 Beacon을 브로드캐스트한다. 따라서 각 무선진동센서 노드들은 통신, 샘플링, ADC변환 등에 의해 발생한 지터(jitter)를 Beacon을 통해 제거하고 동기를 맞출 수 있다. 실험상에서 Beacon의 주기, T_{beacon}^{period},는 1초로 세팅하였다.

2.3 진동 데이터 수집

앞서 언급하였듯이, 각 무선진동센서 노드는 매 초마다 100바이트 이상의 패킷을 발생하기 때문에 일반적인 멀티홉 라우팅을 사용하면, 큰 전송지연과 손실을 유발하게 된다. 제안한 프로토콜에서는 각 코디네이터가 클러스터내의 9개 무선 진동 센서 노드로부터 데이터를 빠르고 안정적으로 수집한다. 수집한 데이터들은 코디네이터 간의 멀티홉 라우팅을 통해서 중앙서버로 빠르게 전달된다.

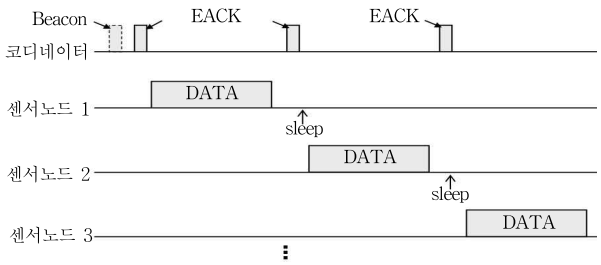


그림 3 코디네이터의 센서노드들로부터 데이터 수집

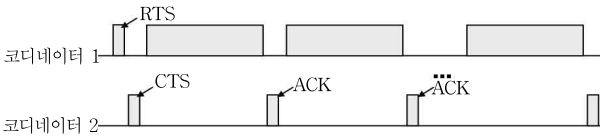


그림 4 코디네이터간 데이터 포워딩

2.3.1 코디네이터의 데이터 수집

안정적으로 데이터를 수집하기 위하여, 코디네이터는 각 무선진동센서 노드들에게 순차적으로 데이터 전송을 요청한다. 그림 3.에서 볼 수 있듯이, 코디네이터는 Beacon 전송 이후에 1번 노드에게 Early ACK (EACK)을 전송한다. EACK을 전송받은 1번 노드는 지난주기에 수집한 진동 데이터를 전송한다. 코디네이터가 데이터를 정상적으로 수신하였다면 2번 노드에게 EACK을 전송한다. 이 EACK을 수신한 1번 노드는 다음 Beacon 수신시 까지 라디오를 sleep 모드로 전환한다. 제안된 알고리즘의 장점은 패킷 충돌에 의한 전송지연과 데이터 손실을 크게 줄일 수 있으며, 라디오에 의한 에너지 소모량 또한 크게 줄일 수 있다는 것이다.

2.3.2 중앙서버로 데이터 전달

무선 진동 센서 노드들로부터 데이터를 수집한 이후 코디네이터들은 코디네이터 채널을 통해 멀티홉 포워딩으로 중앙 서버로 데이터를 전달한다. 패킷 충돌에 의한 전송 지연 및 데이터 손실을 줄이기 위해서 Opportunistic Auto Rate (OAR) 알고리즘을 차용하였다[8]. 그림 4.에서 볼 수 있듯이 RTS/CTS 교환을 통하여 채널을 확보한 코디네이터 1는 코디네이터 2로 9개의 데이터를 연속적으로 보내게 된다. 중앙서버는 수신한 데이터의 코디네이터 ID, 무선진동센서노드 ID, 시퀀스(sequence)를 기록하여 누락된 데이터가 있다면 해당 코디네이터에게 재전송을 요청할 수 있다.

2.3 무선진동센서 노드의 에너지 소모량

앞서 언급하였듯이, 무선진동센서 노드들은 소형 배터리로 동작을 함으로, 에너지 소모를 최대한 줄여야 한다. 각 무선진동센서 노드들은 Beacon을 수신한 이후 sleep 모드에 있다가, 코디네이터가 E-

표 1 실험에서 사용된 파라미터

심볼	설 명	값
$L_{preamble}$	Preamble 크기	3 byte
L_{HDR}	Header 크기	8 byte
L_{beacon}	beacon payload 크기	2 byte
L_{EACK}	EACK payload 크기	2 byte
L_{DATA}	DATA payload 크기	100 byte
L_{FCS}	Frame Check Sequence 크기	2 byte
$rate$	IEEE 802.15.4 라디오 전송속도	250kbps
P_{TX}	데이터 송신에 필요한 파워	35mW
P_{RX}	데이터 수신에 필요한 파워	38mW
P_{sleep}	라디오 Off, MCU On에 필요한 파워	15uW
P_{sample}	진동 샘플링에 필요한 파워	3.5mW
T_{DIFS}	DCF Interframe Space 시간	0.64ms
T_{SIFS}	Short Interframe Space 시간	0.32ms

ACK을 요청할 때($*T_{gather} \times (Node\,ID-1)$ 이후) 다시 라디오를 wake 한다. 코디네이터에게 데이터를 전송한 이후 무선진동센서 노드는 다시 라디오를 sleep으로 전환 한다.

Beacon에 할당된 시간은 다음과 같다.

$$T_{beacon} = \frac{(L_{preamble} + L_{HDR} + L_{beacon} + L_{FCS}) \times 8}{rate} = 0.48ms \quad (1)$$

각 무선진동센서 노드가 코디네이터로 데이터를 전송하기위해 소요되는 시간, T_{gather},은 다음과 같다.

$$T_{EACK} = T_{DIFS} + \frac{L_{preamble} + L_{HDR} + L_{EACK} + L_{FCS}}{rate} = 1.12ms$$

$$T_{DATA} = T_{SIFS} + \frac{L_{preamble} + L_{HDR} + L_{DATA} + L_{FCS}}{rate} = 3.936ms$$

$$T_{gather} = T_{EACK} + T_{DATA} = 5.056ms \quad (2)$$

실제 환경에서 안정적인 전송을 위하여 1번의 재전송 시간을 더 하였다.

$$*T_{gather} = T_{gather} \times 2 = 10.112ms \quad (3)$$

각 무선진동센서 노드는 Beacon과 데이터 송수신 시간 이외에는 sleep 모드를 유지한다. 한 주기에서 sleep 시간은 다음과 같다.

$$T_{sleep} = T_{beacon}^{period} - T_{beacon} - *T_{gather} - T_{EACK} = 988.288ms \quad (4)$$

그리고 한 주기에서 송수신 시간은 다음과 같다.

$$T_{RX} = T_{beacon} + (*T_{gather} - T_{DATA} + T_{SIFS}) + T_{EACK} = 8.096ms$$
$$T_{TX} = T_{DATA} - T_{SIFS} = 3.616ms \quad (5)$$

(4)와 (5)에 의해서 각 무선진동센서 노드의 한 주기에 소모하는 에너지량은 다음과 같다.

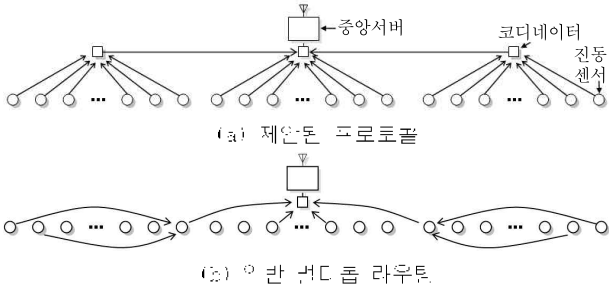
$$E = T_{TX} \times P_{TX} + T_{RX} \times P_{RX} + T_{sleep} \times P_{sleep} + T_{beacon}^{period} \times P_{sensor}$$

3. 실험 및 결과

3.1 실험 시나리오

우리는 제안한 프로토콜을 검증하기 위하여 경기도 이천시에 위치한 시험교량인 금당교에서 실험을 수행하였다.(그림 5) 무선 센서 네트워크 플랫폼은 하이버스사의 Hmote 2420[10]을 사용하였으며, 네트워크 토폴로지는 그림 6.와 같다. 각 무선진동센서 노드는 1초마다 100바이트의 진동데이터를 생성하고, 모든 데이터는 중앙서버로 전송된다. 실험에서는 누락된 데이터에 대해서 중앙서버에서 재전송을 요청하지는 않았다.

그림 5 금당교 (시험교량)



(a) 제안된 프로토콜

(b) 일반 라우팅

그림 6 실험시 사용된 네트워크 토폴로지

3.2 실험 결과

그림 7.은 각 무선진동센서 노드가 1초 마다 소모한 에너지량을 보여주고 있다. MintRoute은 앞서 언급한, S. Pakzad et al. 연구[1]에서 사용한 라우팅 프로토콜을 사용한 결과이다. 10% MintRoute는 무선진동센서 노드의 소모 에너지를 줄이기 위해서 MAC 프로토콜에 10% duty-cycle을 부여한 결과이다. 결과를 통하여 일반적인 라우팅 프로토콜을 사용 할 때 보다 제안된 프로토콜이 훨씬 적은 에너지를 사용하고 있음을 확인할 수 있다. 10% MintRoute는 MintRoute에 비해 에너지 소모를 크게 감소시키나, 예상(MintRoute 결과의 10%)보다 높은 에너지 소모를 보이고 있다. 이는 다량의 데이터들을 포워딩하는 가운데 무선진동센서 노드의 overhearing에 의한 에너지 소모가 매우 크기 때문이다.

그림 8.은 무선진동센서 노드로부터 중앙서버까지 데이터 전송률 (PDR: Packet Dilvery Rate)를 보여주고 있다. MintRoute에서는 데이터를 전송하기 위해서 평균적으로 1.5 홉을 거치기 때문에 매 초마다 40.5번 데이터 송수신이 발생한다. 따라서 패킷 충돌에 의해 상대적으로 낮은 전송률을 보인다. 10% MintRoute는 데이터 송수신이 짧은 기간 동안 이루어지기 때문에 데이터 전송 혼잡도가 증가하여,

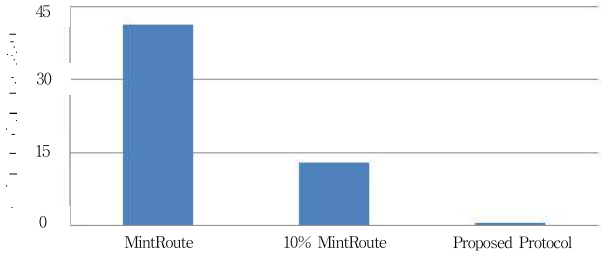


그림 7 무선진동센서 노드의 한 주기당 소모 에너지

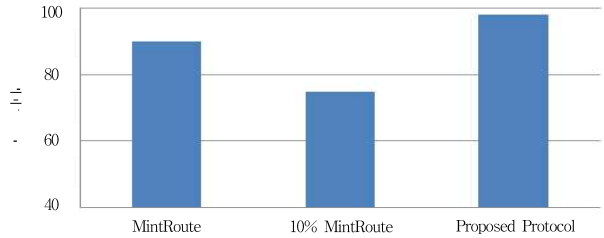


그림 8 무선진동센서 노드에서 중앙서버까지 전송률

더 낮은 전송률을 보이고 있다. 반면에 제안된 프로토콜은 매우 높은 전송률을 보이고 있다. 이는 코디네이터가 무선진동센서 노드의 많은 데이터를 순차적으로 처리하여 패킷 충돌이 크게 줄어들기 때문이다.

4. 결 론

기존 유선 케이블 기반의 교량 안전 진단 시스템은 설치가 어려우며 설치비용이 매우 크다. 최근 무선 센서 네트워크 기반의 시스템 구축에 대한 연구가 활발하나 무선 센서 네트워크의 특징상 거대한 교량에 설치 시 발생하는 성능저하에 대한 문제점들은 충분히 연구되지 못하고 있다. 본 논문에서는 진동 기반의 실시간 교량 안전 진단 시스템 구축을 위한 효율적인 무선 센서 네트워크 프로토콜을 제안하였다. 제안된 프로토콜에서는 코디네이터들이 무선진동센서 노드들의 주기와 발생한 데이터 수집을 관리한다. 따라서 기존의 멀티홉 라우팅 방식에 비해서 높은 전송률을 제공하고 에너지 소모를 크게 줄일 수 있다. 우리는 실험 결과를 통해서 제안한 프로토콜을 검증하였으며, 기존의 프로토콜에 비해 매우 큰 성능향상을 얻을 수 있음을 확인하였다. 실험에 사용된 가속도 센서[11]가 교량의 미세한 진동들을 얻기에 충분한 정밀도를 제공하지 않아서, 현재 Silicon사의 1221 MEMS[12]를 이용한 고정밀 진동센서 보드를 제작 중에 있다.

본 연구보고서는 정보통신부의 출연금 등으로 수행한 정보통신연구개발사업의 연구결과입니다. 본 연구보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 정보통신부 정보통신연구개발사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.

참 고 문 헌

[1] J. Lynch and K. Loh, "A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring," Shock Vib. Dig., vol. 38(2), pp. 91-128.

[2] S. Pakzad, G. Fenves, S. Kim, and D. Culler. "Design and Implementation of Scalable Wireless Sensor Network for Structural Monitoring," Journal of Infrastructure Systems pp. 89-101, 2008. March.

[3] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, and J. Demmel. "Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Wireless Sensor Networks," Proc. IPSN, Apr. 25-27, 2007.

[4] J. Lynch, Y. Wang, K. Law, J. Yi, C. Lee, and C. Yun. "Validation of a large-scale wireless structural monitoring system on the Geumdang Bridge," Proc., Int. Conf. on Safety and Structural Reliability, Rome, Italy.

[5] .L. Mastroleon, A. Kiremidjiana, E. Carryerb, and K. Law. "Design of a new power-efficient wireless sensor system for structural health monitoring," Proc. SPIE, 5395, 51-60.

[6] J. Lynch, Y. Wang, K. Law, J. Yi, C. Lee, and C. Yun. "Validation of a large-scale wireless structural monitoring system on the Geumdang Bridge," Proc., Int. Conf. on Safety and Structural Reliability, Rome, Italy.

[7] J. Paek, K. Chitalapudi, J. Cafferey, R. Govindan, and S. Masri. "A wireless sensor network for structural health monitoring: Performance and experience," Proc. EmNetS-II.

[8] B. Sadeghi, V. Kanodia, A. Sabharwal, and E. Knightly. "OAR: an opportunistic auto-rate media access protocol for ad hoc networks," Wireless Networks. vol. 11, pp. 39-53, 2005.

[9] TinyOS: www.tinyos.net

[10] Hybus 2420: www.hybus.net

[11] Analog Devices: Precision ±1.7g Single/Dual Axis Accelerometer ADXL103/ADXL203

[12] Silicon Designs, INC: Model 1221 LOW NOISE ANALOG ACCELEROMETER