Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 7 pp. 760~764, 2015
J. Korean Soc. of Marime Engineering (JKOSME)
http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.7.760

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
Original Paper

산업플랜트 기계상태 동시신호 연속취득을 위한 무선센서 네트워크프로토콜 구현

이후락[1] · 정경열[2] · 류길수†

(Received April 3, 2015 ; Revised May 18, 2015 ; Accepted August 26, 2015)

Protocol implementation for simultaneous signal continuation acquisition of industrial plant machine condition in wireless sensor networks

Hoo-Rock Lee[1] · Kyung-Yul Chung[2] · Keel-Soo Rhyu†

요약: 산업플랜트 현장에서 별도의 배선 없이 쉽고 빠르게 기계상태를 측정하기 위해서는 다중무선센서를 기계에 부착하고 측정과 전송이 동시에 가능한 시분할전송 방식이 필요하다. 그러나 아직까지 연속적인 신호를 동시에 100Hz이상 샘플로 시분할다중전송(TDMA;Time Division Multiple Access)하는 현장적용 연구가 알려지지 않고 있다. 따라서, 본 논문에서는 현장적용을 위해 100Hz이상의 샘플주기로 다수의 센서에서 동시에 취득할 수 있는 시분할다중전송 네트워크프로토콜을 구현하고 그 결과를 나타내고자 한다. 단일 클러스터 스타토폴로지를 대상으로 노드 개수와 거리에 따른 네트워크 가용성 확인을 위해 ns-2 시뮬레이터로 유사한 환경 조건으로 구동하여 결과를 분석하였다. 그 결과 4개의 센서노드로 동시에 연속적인 센서신호를 전송하는 비-시분할다중전송과 시분할다중전송프로토콜을 비교 분석하였다. 전송시간이 20초와 40초 일 경우는 수신율 차이가 작았지만 60초일 경우는 많은 차이를 나타냄을 관찰하였다.

주제어: 시분할다중전송, 다중무선센서, 연속적인 신호, 산업플랜트, 기계상태

Abstract: Wireless sensors, installed on machinery, and Time Division Multiple Access (TDMA) transmission make an ideal system for monitoring machine conditions in industrial plants because there is no need for electronic wiring. However, there has not yet been a successful field application of such a system, capable of continuously transmitting data at sample rates greater than 100 Hz. In this research, a TDMA network protocol capable of acquiring data from multiple sensors at sample rates greater than 100 Hz was developed for field application. The protocol was implemented in a single cluster-star topology network, and the system was evaluated based on the node number and transmission distance. Network simulator 2 (ns-2) was used for a real field simulation. Non-TDMA and TDMA protocol cases were compared using four sensor nodes. In the cases of 20-s and 40-s transmission times, there was little difference between the reception rates of the non-TDMA and TDMA systems. However, the difference was much greater when using a 60-s transmission time.

Keywords: Time division multiple access, Multiple sensors, Continuously transmitting data, Industrial plants, Machine conditions

1. 서 론

무선센서네트워크는 언제 어디서든 센서의 설치와 데이터 측정이 용이할 수 있게 해주는 기술이다. 이러한 장점은 산업플랜트 현장에서 유용하게 이용될 수 있다. 산업플랜트에서 운용되는 많은 구동기기 들은 운전 효율과 여러 가지 경제적 관점에서 관리되고 있다. 오래 전부터 해오던 계획정비와 예방정비 대부분이 시간을 기준으로 관리를 해온 반면, 최근에는 상태기반 정비를 위해 기계의 상태신호를 취득하여 분석하고 관리하는 시스템을 개발하고 있다.

산업용 중요 기계는 우선순위에 따라 온라인으로 신호를 감시하고 있으나 그렇지 못한 보조기계 또한 주기적으로 신호를 취득할 필요가 있다. 대부분의 현장은 넓고 복잡한 구조로 되어있기 때문에 상태신호를 취득하는 장비가 크고 무거울수록 사용하는데 어려움이 따른다. 현장 작업자가 직접 휴대하여 신호를 쉽고 빠르게 취득하는 방안으로 무선센서네트워크 적용제품 수요가 차츰 증가하고 있다. 그

† Corresponding Author (ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9434-5103): Division of Information Technology, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 606-791, Korea, E-mail: rhyu@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4571
1 Korea Institute of Machinery and Materials, E-mail: hrock@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7304
2 Division of Plant System and Machinery, University of Science & Technology, E-mail: kychung@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7333

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering

러나, 아직까지는 사용목표 사양과 비용을 만족시키면서 쉽고 효율적인 장치가 제공되지 못하고 있다.

현재까지 다양한 형태로 산업현장에 무선센서네트워크가 적용되고 있지만 시분할다중전송(TDMA;Time Division Multiple Access)를 이용하는 응용 대부분은 저주기 샘플형태로 적용되고 있다. 구조물 등의 상태 측정을 위해서는 최소 100Hz 이상의 샘플을 통해 데이터를 취득해야만 유용한 정보를 얻을 수 있으므로 최소한 10ms 보다 빠른 샘플주기가 요구되고 있다**[1]**.

본 논문에서는 기계설비 운전 중 일정 시간 동안 상태신호를 취득하기 위한 시분할전송 알고리즘을 구현하여 그 성능과 가용성을 확인하고자 한다. 일반적으로 기계설비 장치들이 단일 취득장치에서 시분할전송방식으로 다수의 무선센서신호를 동시에 취득할 수 있도록 구성되어 있다. 따라서 이와 유사한 단일클러스터 형태의 스타토폴로지 네트워크에서 가용한 노드 숫자를 확인하기 위해서 시뮬레이션을 수행한 후, 무선센서노드에 연속측정 시분할전송 프로토콜을 구현하여 일반전송방식과 비교 실험을 진행하고 그 결과를 분석하였다.

2. 관련연구

현재까지 산업플랜트 현장에 적용된 무선기술로 Wi-Fi, WirelessHART와 Zigbee가 다양한 형태로 적용되고 있다. 대부분 대기업이 주도하여 공장자동화나 설비관리를 위해 적극적인 무선기술을 도입하고 있다. 이 가운데 WirelessHART는 현장 작업자가 오랫동안 사용해본 HART 기술을 기반으로 IEEE 802.15.4-based wireless mesh network를 이용할 수 있는 규격을 포함한다. 반면, 같은 규격을 기반으로 하는 Zigbee의 경우에 사용자를 위한 솔루션 부족과 보안 취약 등으로 인해 많은 수요가 창출되고 있지 못한 실정이다**[2][3]**. WirelessHART 제품군은 기존 산업센서와 호환을 가능하게 하며 설치되는 센서들을 고정형 네트워크로 구축하여 저속샘플 전송 시분할 스케줄링을 통해 장기간에 걸친 설비감시를 목적으로 이용되고 있다.

반면에 구조건전성 감시분야에서는 무선센서네트워크를 이용한 많은 연구가 이루어져 왔다. 건물의 건전성을 감시하기 위하여 정확한 데이터 동기화, 신뢰성 있는 데이터 전송과 압축기술에 초점을 맞추어 진행되어 왔다. 구조물 감시를 위해서는 구조물 크기에 따라 넓은 공간에 노드를 배치하여 장시간 감시하기 위해 매쉬(mesh)구조의 멀티홉 라우팅 프로토콜을 적용하여 연구를 수행하였다**[1][4]**. 네트워크의 구조와 물리적인 제약상 높은 샘플링 주기를 가질 수 없으므로 기계상태감시를 위한 응용과는 차이점이 존재한다.

위에서 언급한 연구들에 적용되는 시분할다중전송 알고리즘 연구 또한 다양한 방법으로 진행되고 있다. 그 대부분은 MAC 프로토콜상의 스케줄링 알고리즘으로 QoS와 저전력기술 등을 다루면서 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘들을 확인하는 형태로 진행되었다**[5][6]**. 그러나 현장에서 이를 적용하기 위해서는 MAC프로토콜을 구현하고 이기종과 호환성을 해결해야 하는 과정이 필요하다. 또한, 현장에서 작업자가 용이하게 데이터 샘플속도와 개수를 조절하여 데이터를 취득하기에 어려운 점이 존재한다.

3. 시분할전송 프로토콜 시뮬레이션

본 논문에서는 100Hz이상의 샘플주기로 다수의 센서에서 동시에 취득할 수 있는 시분할다중전송 네트워크프로토콜을 구현하고 그 결과를 나타내고자 한다. 구현하고자 하는 프로토콜의 흐름도는 **Figure 1**과 같다. 모니터링서버(단말기 등)으로부터 사용자가 취득하고자 하는 S.N.(Sensor Node) 개수와 샘플개수를 요청하면 B.S.(Base Station)이 이를 S.N.에 전달한다. 각 S.N.는 수신한 패킷의 정보를 확인하여 자신이 언제 데이터를 보내고 몇 개의 샘플을 얼마 주기로 보내야 하는지 판단하여 전송을 수행한다.

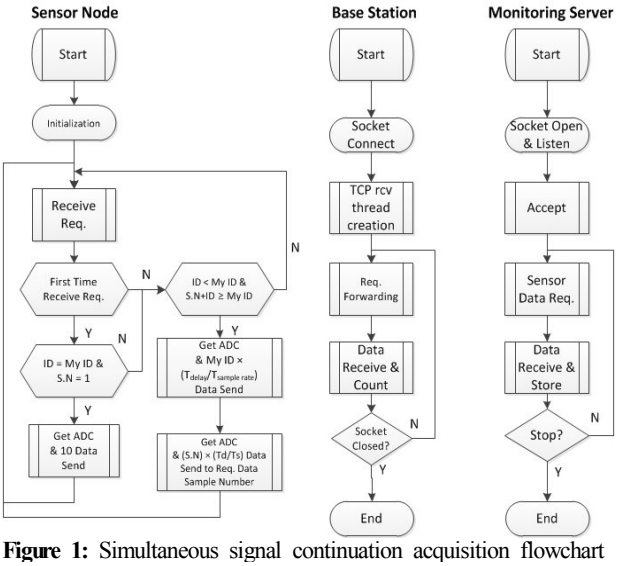

Figure 1: Simultaneous signal continuation acquisition flowchart

3.1 시분할전송 시뮬레이션 환경구성

시분할다중전송을 이용한 기계상태 측정은 매우 다양한 환경과 경우의 수가 존재할 수 있다. 예를 들면, 대상 기계의 크기, 센서부착 부위, 구조, 재질, 온도, 샘플속도, 작업자와의 거리 및 무선환경 등을 들 수 있다. 산업현장의 무선환경에 있어서는 다양한 고려요소들이 있으며 패킷손실이 발생할 수 있는 점을 고려해야 한다**[7]**.

본 논문에서는 아래와 같은 조건을 가정하여 시뮬레이션을 수행한다.

- 10meter deployment range
- 0.1meter Omnidirectional Antenna
- 250kbps radio speed
- Single cluster random topology

Figure 2에 표시된 토폴로지 맵 은 ns-2에서 랜덤하게 생성하였다. 생성된 맵을 이용하여 수행하는 시뮬레이션은 **Table 1**에 나타낸 조건으로 수행하였다. 중요 파라미터로 네트워크 크기는 가로세로10미터이고 B.S.는 위치(0, 0), C.H.(Cluster Head)는 위치(2, 2)에 가깝게 배치하였다. C.H.는 고에너지 노드로 200J를 초기 값으로 가지며 센서 노드들은 2J을 초기 값으로 가진다. 다른 설정 값은 통신을 수행하여 소모하는 에너지 factor로 이용된다. 여기서 C.H.를 기본으로 낮은 번호의 ID를 갖는 노드부터 개수에 따른 수행조건으로 네트워크에 포함되도록 하였다.

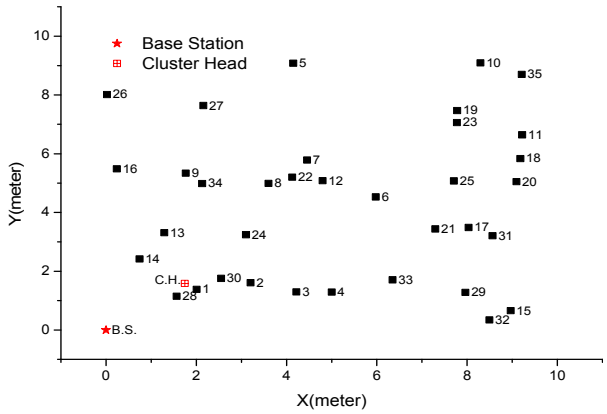

Figure 2: Simulation topology map

Table 1: Simulation parameter and value

Parameter	Value
Network gird	(0, 0) × (10, 10)
Base station	(0, 0)
Simulation time (seconds)	3,600
E_{elec}	50 nJ/bit
$\epsilon_{friss-amp}$	10 pJ/bit/m^2
$\epsilon_{two-ray-amp}$	0.0013 pJ/bit/m^4
Desired number of clusters	1
eq_energy:2J	0
high_e_nodes ID:200J	0

3.2 시뮬레이션 결과

대부분의 상태진단 대상기계는 회전기계, 즉 모터, 펌프, 밸브 등으로 진동과 음향측정을 하는데 필요한 동시측정 지점은 약 3~5개 정도로 파악되었다. 그 조건에 맞추어 소량의 무선노드로 구동되는 특성을 우선적으로 파악하고자 하였다. 우선 기본적인 구성으로 C.H.를 포함한 3개 노드로 측정하는 데이터 개수를 **Figure 3**을 통해 살펴보면 15,000번 정도의 패킷을 주고받으면 에너지가 고갈되어 네트워크 기능이 상실되는 것을 확인하였다. 노드 2개가 죽은 후 데이터 전송과 에너지 소모가 지속적으로 이루어지는 결과는 고에너지 노드인 C.H.가 전송하는 데이터와 그에 따른 에너지소모를 나타낸다.

Figure 4는 C.H.를 포함한 2개부터 36개 노드들을 각각 구성하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 첫번째 노드가 수명을 다한 시간(network lifetime)은 C.H.를 포함한 4개 노드인 경우가 가장 긴 것을 알 수 있다. 그러므로 다음에 나타내는 시분할다중전송 구현 실험은 이에 따라 이루어졌다.

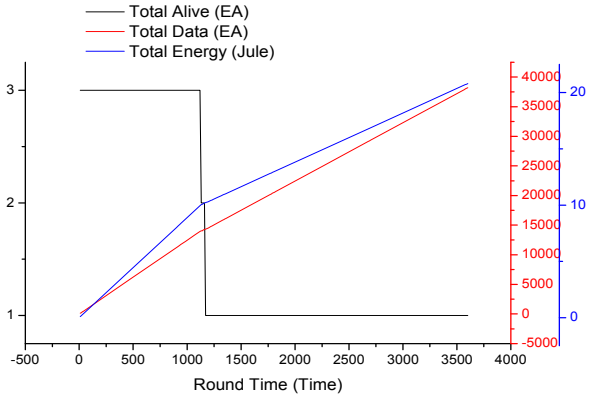

Figure 3: Result of three nodes simulation

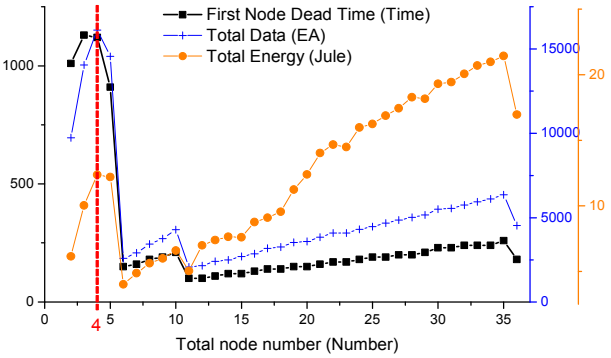

Figure 4: Result of network availability simulation

4. 동시측정 연속데이터전송 프로토콜 구현

4.1 다중무선노드 연속데이터전송 스케쥴

동시측정 연속데이터전송 프로토콜 구현에서 첫번째로 고려될 사항은 MAC프로토콜에서 보장하는 패킷 간의 간격이다. 패킷전송 간격이 너무 짧으면 시각 지터(timing jitter)에 의해 패킷이 손실되는 상황이 발생하기 때문이다. 특수하게 고려된 무선센서노드가 아니라면 지터의 크기를 보장할 수 없으므로 해당 하드웨어의 특성에 따라 패킷 전송 간격이 조절될 수 있다. 다음으로 고려할 사항은 통신대역폭(bandwidth)이다. 시간당 보낼 수 있는 데이터양에 따라서 샘플속도가 제한적이다. 샘플속도는 센서와 ADC 성능에 따른다. 샘플을 저장할 공간인 메모리와 통신버퍼 또한 하드웨어 사양에 따라 조건이 다르게 설정될 수 있다. 그 외에는 무선환경 등 물리적인 현상에 따른 에러율이다. 네트워크 프로토콜에서는 MAC이하에서 에러보정이 되는 가정하에 구현하였다.

Figure 5는 본 논문에서 구현하는 스케줄 개념 다이어그램을 나타낸다. 그림에서 (?ms)는 하드웨어와 무선통신조건에 따라 달라질 수 있기 때문에 실험을 통해 최적의 값을 결정해야 한다. 첫번째 노드가 B.S.,를 통해서 요청을 받으면 즉시 주어진 패킷전송 지연버퍼(delay buffer) 시간에 맞게 샘플링을 수행하고 데이터를 전송한다. 다음 노드는 계속 샘플링을 수행하면서 지연버퍼시간 이후에 샘플 데이터를 전송하고 최종 노드까지 동일한 방법으로 전송을 수행한다. 이때 최종노드가 샘플을 전송하는 시간과 지연버퍼시간을 합한 시간이 첫번째 노드의 최대샘플 시간을 넘지 않는다.

반면 비-시분할다중전송은 MAC에서 CSMA/CA를 통하여 각 노드가 전송하는 시간을 제어하거나 특정 MAC의 프로토콜에 의존하여 데이터를 전송하는 특징을 가진다.

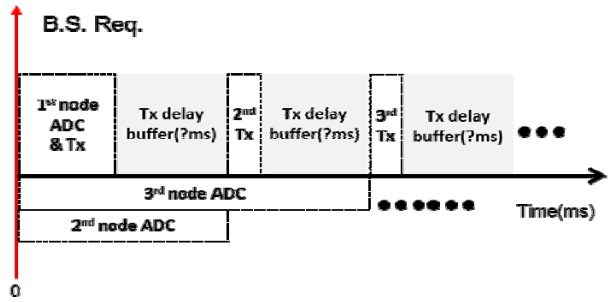

Figure 5: Simultaneous signal continuation acquisition schedule diagram

4.2 무선노드 전송프로토콜 구현

무선전송노드는 TinyOS-2.x 운영체제 플랫폼인 휴인스의 telosb기반 UBee430 플랫폼을 이용하였다. 해당 플랫폼에 실험을 위한 동시측정 연송데이터전송 프로토콜동작 코드를 구현하였다. 구현한 코드의 각 컴포넌트에 연결된 형태의 확인을 위한 다이어그램은 **Figure 6**에 나타내었다. 일반적인 무선센서네트워크의 센서데이터 전송 형태와 크게 다르지 않으며, 내부적인 처리 방식만 시분할다중전송을 위한 변수를 이용하여 구분동작 하도록 하였다.

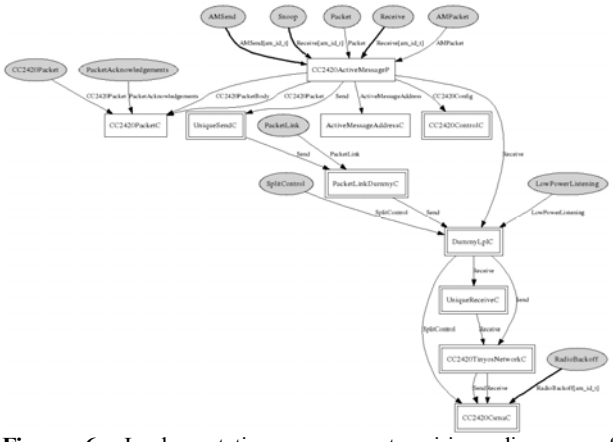

Figure 6: Implementation component wiring diagram of TinyOS-2.x platform

4.3 동시측정 연속데이터전송 실험 및 분석

실험환경은 일반 사무환경의 실험실에서 2.4GHz 무선센서노드 4개로 비-시분할다중전송과 시분할다중전송 프로토콜 모드 동작으로 구분하여 실험을 진행하였다. B.S. 노드에서 전송요청을 하고 패킷분석기(packet analyzer)를 통해 수신되는 패킷과 밀리초 단위 간격을 확인하였다.

진행한 실험 결과는 **Table 2**에 나타내었다. 샘플속도는 3ms로 설정하였고 S.N.가 B.S.로부터 전송요청을 받아 신호를 전송하는 시간 단위를 20 초, 40초, 60 초 단위로 구분하였다. 그 구분은 시간에 따른 실제 전송률을 확인하기 위해 구분한 것이다.

시분할다중전송프로토콜의 지연버퍼는 30ms 로 설정하였다. 설정 시간은 실험을 통해 에러율이 가장 적으면서 속도가 보장되는 최소값을 구한 값이다. 수신율을 보면 단시간 내에서는 큰 차이가 없었지만 조금 긴 시간 내에서는 많은 차이를 나타내고 있으며, 스케쥴링한 프로토콜은 일정한 시간 간격을 나타냄을 알 수 있다. 각 실험 횟수는 조건당 3번을 실시한 평균값이며, 동일한 장소에서 동일한 하드웨어를 이용하여 진행하였다.

Table 2: Result of 4 nodes experiments

Condition	Sample speed	Total Transmission Packet	Total Receive Packet	Average Packet per Second	Average Period Time per Packet	Receive Ratio
20 Second Normal	3ms	1,164	1,061	58.20	14.55 ms	91.15%
20 Second TDMA	3ms	618	603	30.90	7.73 ms	97.57%
40 Second Normal	3ms	4,472	4,182	111.79	27.95 ms	93.53%
40 Second TDMA	3ms	1,197	1,194	29.93	7.48 ms	99.72%
60 Second Normal	3ms	5,318	2,981	88.63	22.16 ms	56.05%
60 Second TDMA	3ms	1,775	1,770	29.58	7.40 ms	99.72%

5. 결론 및 향후 연구방향

본 논문에서는 산업플랜트 현장에서 빈번하게 수행하는 기계상태 신호측정을 위해 쉽고 빠른 방법을 제안하기 위한 시분할다중전송 구현방안과 실제 구현을 통해 적용성을 입증하였다. 구현방법과 구성형태를 확인하기 위해서 ns-2 시뮬레이터를 이용한 노드 개수와 거리에 따른 단일 클러스터 성능을 확인하였다. 결과를 바탕으로 실제 무선센서노드에 프로토콜을 구현하고 비-시분할다중전송과 비교실험을 진행하였고, 제안한 프로토콜이 비-시분할다중전송에 비해 일정한 시간간격을 나타내며 60초 동안 약 2배 더 안정적으로 동작함을 확인할 수 있었다.

향후에는 더욱 다양한 조건과 적용방법에 대하여 연구를 진행하고 실제 현장에 적용하여 산업플랜트 현장 운영효율 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 전력기반센터의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (1-2011-0-044-00)

References

[1] N. Xu, S. Rangwala, K. K. Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan, and D. Estrin, “A wireless sensor network for structural monitoring,” Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, ACM, pp. 13-24, 2004.

[2] J. Song, S. Han, A. K. Mok, D. Chen, M. Lucas, and M. Nixon, “WirelessHART: Applying wireless technology in real-time industrial process control,” Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, IEEE, pp. 377-386, 2008.

[3] T. Lennvall, S. Stefan, and F. Hekland., “A comparison of WirelessHART and ZigBee for industrial applications,” Factory Communication Systems, IEEE International Workshop on IEEE, pp. 85-88, 2008.

[4] J. Paek, K. Chintalapudi, J. Caffrey, R. Govindan, and S. Masri, “A wireless sensor network for structural health monitoring: Performance and experience,” Embedded Networked Sensors, pp. 1-10, 2005.

[5] Berger, Achim, Albert Potsch, and Andreas Springer., “TDMA approach for efficient data collection in wireless sensor networks,” Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on, pp.755-760, 2011.

[6] S. C. Ergen and P. Varaiya, “TDMA scheduling algorithms for wireless sensor networks,” Wireless Networks, vol. 16, no. 4, pp. 985-997, 2010.

[7] B. Azimi Sadjadi, D. Sexton, P. Liu, and M. Mahony, “Interference Effect on IEEE 802.15.4 Performance,” Proceedings of the 3rd International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2006), IEICE, 2006.