

대규모 무선 센서 네트워크에서 적응적 링크 품질 측정 및 경로 설정 기법

준희원 이 정 욱*, 종신회원 정 광 수**

Adaptive Link Quality Estimation and Routing Scheme in Large-scale Wireless Sensor Networks

Jungwook Lee* Associate Member, Kwangsue Chung** Lifelong Member

요 약

무선 센서 네트워크는 다양한 환경에 분산되어 설치되며 무선 링크를 통하여 센싱된 데이터를 수집한다. 무선 센서 네트워크에서 무선 링크의 품질은 환경적 요인이나 하드웨어의 성능에 따라 변화하는 특성을 갖는다. 링크 품질의 변화는 데이터의 손실을 야기 시킬 수 있으므로 링크 품질의 변화를 적응적으로 측정할 수 있어야 하며, 상위 계층인 경로 설정 프로토콜에서는 이를 고려해야 한다. 본 논문에서는 대규모 무선 센서 네트워크에서의 적응적 링크 품질 측정 및 경로 설정 기법을 제안한다. 제안한 기법은 링크의 품질이 불안정할 때 민첩하게 링크의 품질을 측정하여 새로운 경로를 선택하고 링크의 품질이 안정할 때 간헐적으로 링크 품질을 측정하여 에너지 소모를 줄인다. 또한 높은 밀집도의 네트워크에서는 오버헤드를 줄이기 위해 적은 수의 비컨을 사용하며, 낮은 밀집도에서는 많은 수의 비컨을 사용하여 품질이 좋은 링크를 경로로 설정함으로써 패킷 손실률을 개선한다. 실험을 통하여 제안한 방법이 신뢰성 및 에너지효율성 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words : link quality estimation, network density, routing, energy efficiency, reliability

ABSTRACT

Wireless sensor networks are installed in various environments and collect sensing data through wireless links. The quality of a wireless link may be unstable due to environment causes and hardware performance in wireless sensor networks. Since the change of the link quality may cause data loss, sensor nodes need to adaptively estimate the change of the link quality. Also, the routing protocol should deal with this situation.

In this paper, the adaptive link quality estimation and routing scheme in the large-scale wireless sensor networks are proposed. When the quality of a link is unstable, sensor nodes agilely estimate the quality of links, and the new route is selected. When quality of a link is stable, the link quality is occasionally estimated so that the energy consumption is reduced. Moreover, sensor nodes exchange less beacons in order to reduce an overhead in dense networks. In the case of sparse network, the sensor nodes exchange more beacons for finding a better route. We prove that the proposed scheme can improve the energy efficiency and reliability.

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT성장동력기술개발사업의 일환으로 수행된 연구(2008-S-041-01, u-City용 센서네트워크 PHY/MAC 개발)와 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C03)에 의해 수행된 결과임.

* 광운대학교 전자통신공학과 컴퓨터통신 연구실(jwlee@adams.kw.ac.kr, kchung@kw.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-10-492, 접수일자 : 2009년 10월 28일, 최종논문접수일자 : 2010년 1월 6일

I. 서 론

무선 센서 네트워크는 화산, 생태 서식지, 도시에 이르는 다양한 환경에 분산되어 설치되며 무선 링크를 통하여 센싱된 데이터를 수집한다. 이와 같은 무선 센서 네트워크에서 무선 링크의 품질은 환경적 요인이나 하드웨어의 성능에 따라 변화하는 특성을 갖는다. 예를 들어 센서 노드가 도시에 설치될 경우에는 빌딩, 차량, 사람 등과 같은 장애물에 의하여 신호가 감쇄되어 링크의 품질이 저하되며, 802.11b와의 간섭, 높은 온도, 낮은 습도와 같은 날씨에 의해 링크 품질이 저하 될 수 있다^[1]. 또한 안테나의 방향성, 노드를 설치한 방향에 따라서 전송 범위가 크게 달라져 링크 품질이 저하될 수 있다. 이와 같은 링크 품질의 불안정은 데이터의 손실을 야기할 수 있으므로 링크 품질의 변화를 적응적으로 측정할 수 있어야 하며, 상위 계층인 경로 설정 프로토콜에서는 이를 반영하여 적절한 경로를 선택할 수 있어야 한다^[2].

기존에 제안된 링크 품질 측정 및 경로 설정 기법으로 MultihopLQI(Multihop Link Quality Indicator)^[3]가 있다. MultihopLQI는 수신한 패킷의 신호의 세기를 기반으로 링크의 품질을 측정하고 측정된 품질 지표를 이용하여 경로를 설정한다. 그러나 MultihopLQI는 패킷 손실을 고려하지 않고 링크의 품질을 측정할 시기에 LQI가 좋으면 품질이 좋은 링크로 간주되는 문제가 있다^[4]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 재전송을 포함한 양방향의 전체 패킷의 전송 횟수를 링크의 품질 지표로 하는 ETX(Expected Transmission Number)^[5]가 제안되었다. MultihopLQI와 ETX는 유니캐스트 방식의 데이터 전송이나 브로드캐스트 방식의 주기적인 비컨 메시지를 통하여 링크 품질을 측정하고 경로 설정에 반영한다. 데이터 전송으로 링크의 품질을 측정하는 기법은 응용에 따라서 측정 주기가 달라지기 때문에 정확하게 측정할 수 없다. 또한 주기적으로 비컨 메시지를 교환하는 기법은 네트워크의 상태에 따라 적응적으로 링크의 품질을 측정할 수 없다. 즉, 링크의 상태가 안정적일 때는 패킷 손실이 없기 때문에 긴 주기의 측정 메시지를 보내는 것이 에너지 효율적이며, 노드가 이동을 하거나 불안정한 상황일 때는 좀더 민첩하게 대응하기 위하여 비컨 메시지를 짧은 주기로 교환해야 한다. 또한 다량의 브로드캐스트 패킷은 네트워크에 심각한 오버헤드를 초래할 수 있다^[6]. 특히 밀집도가 높은 네트워크는

다수의 이웃 노드와 연결성이 있기 때문에 브로드캐스트 패킷은 심각한 오버헤드가 될 수 있다. 결국 경쟁 기반의 프로토콜에서는 잦은 충돌로 인하여 패킷 손실이 발생된다. 반대로 밀집도가 낮은 네트워크에서는 브로드캐스트 패킷에 대한 오버헤드는 적지만, 네트워크의 연결성이 떨어진다. 따라서 정확하게 링크의 품질을 측정하여 적절한 경로를 선택하지 않으면 네트워크 파티션에 의해 심각한 패킷 손실이 발생된다.

본 논문에서는 대규모의 무선 센서 네트워크에서 링크 상태 및 밀집도에 따라서 적응적으로 링크의 품질을 측정하고 경로를 설정하는 기법을 제안하고자 한다. 제안하는 기법은 링크의 변화를 판단하게 되면 민첩하게 네트워크에 적응하기 위하여 짧은 주기로 링크 품질을 측정한다. 그리고 네트워크가 안정적일 경우 이웃 노드의 수에 따라 밀집도 판단을 통해 링크 품질 측정 주기를 달리하여 네트워크의 오버헤드를 개선하고자 하였다. 또한 경로 설정에서는 측정된 링크 품질을 비교하여 적절한 경로를 설정함으로써 네트워크의 신뢰성을 개선하고자 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무선 링크의 불안정한 요인에 대하여 분석하고 기존에 제안된 링크 품질 측정 기법에 대하여 기술한다. 3장에서는 주기적인 링크 품질 측정 기법의 문제점과 본 논문에서 제안한 링크 품질 측정 기법에 대하여 기술한다. 4장에서는 본 논문에서 제안한 기법과 기존에 제안된 링크 품질 측정 기법과의 비교 실험을 통하여 성능을 평가하고 마지막으로 5장에는 결론 및 향후 연구 방향을 기술한다.

II. 관련 연구

2.1 불안정한 무선 링크의 요인

무선 링크의 불안정은 무선 멀티 홉 환경에서 다음 홉을 결정하는 라우팅 프로토콜에 중요한 영향을 미친다. 즉, 동적으로 변화하는 링크의 품질로 인하여 각 링크는 전송 범위가 비대칭적으로 형성되기 때문에 경로의 재설정 필요하다. 무선 링크의 불안정은 하드웨어의 제약과 환경적 요인의 두 가지에 기인한다.

첫 번째로 하드웨어의 제약은 안테나의 종류와 배터리의 레벨로 나눌 수 있다. 무선 센서 네트워크에서는 Dipole안테나와 PCB(Printed Circuit Board) Pattern 안테나가 주로 이용된다. PCB 안테나가 비

용이 저렴한 이유로 많은 응용에서 이용되지만 Dipole 안테나에 비하여 링크의 비대칭성이 심한 특성을 지니고 있다. 전방향성 안테나는 모든 방향에 동일한 무선 신호를 보내고 받으며 모든 방향에 있는 노드들과 링크를 형성한다. 반대로 방향성 안테나는 하나의 방향에 무선 신호를 보내고 받으며 단 방향에 있는 노드와 링크를 형성하여 전형적인 유선망과 특징이 같다. 또한 좁은 지역에 영향을 주기 때문에 링크 사이의 간섭 현상을 대부분 줄일 수 있는 장점이 있다. 하지만 실제로 대규모의 밀집된 네트워크 상황에서는 설치하기가 용이하지 않을 뿐더러 노드가 이동을 할 때는 방향성이 매우 불규칙하게 변화하는 결과를 초래할 수 있다.

또한 배터리의 전압레벨에 따라 링크의 특성이 변화될 수 있다. 그림 1과 같이 무선 송신기의 전송파워를 설정할 때, 배터리 전압에 대한 레귤레이션을 하지 않고 이를 기준으로 하여 전송 파워의 레벨을 설정하게 되면, 각각의 노드들이 동일한 전송 파워를 설정하였다고 하여도 노드의 배터리 상태에 따라서 링크의 품질이 달라지는 문제를 초래할 수 있다⁸⁾. 즉, 초기 전압 레벨에서 전송이 가능하였지만, 배터리의 전압 레벨이 낮아지고 전송파워 레벨이 감소하면서 전송이 불가능하다. 따라서 배터리 레벨과 전송파워 레벨을 보상하지 않거나 변경된 전송파워 상태에서 빠르게 링크의 품질을 측정하지 않으면, 네트워크 상황에 빠르게 적응할 수 없기 때문에 심각한 데이터 손실을 야기할 수 있다.

두 번째는 환경적인 요인에 의해 발생하는 무선 링크의 불안정이다. 장애물에 의한 페이딩 현상은 전송 신호를 감쇄시키고 링크의 품질을 저하시킨다. 장애물은 불규칙하게 이동하기 때문에 시간에 따라 링크 품질의 변화가 많을 수 있다. 실험을 통하여 환경적인 요인인 사람이 이동하는 실내 환경에서 링크의 품질이 좀 더 비대칭(Asymmetric)적으로 변

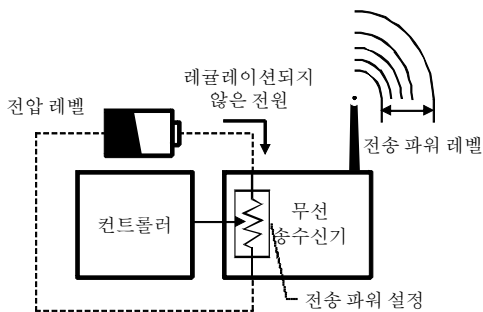


그림 1. 배터리 전압에 따른 전송파워의 변화

화한다는 것을 확인하였다. 실험에 사용된 노드의 하드웨어는 RF송수신기 칩인 CC2420⁹⁾과 저전력 마이크로프로세서 MSP430F1611¹⁰⁾이 탑재된 Telosb¹¹⁾를 이용하였으며, 실험은 실내 환경에서 사람의 이동이 빈번한 시간과 사람의 이동이 적은 시간에 약 4800초 동안 링크의 품질을 측정하였다. 실험 방법은 두 개의 노드를 3m 간격에 두었고 각 노드에서는 CC2420의 라디오 파워 출력 레벨을 -25dBm으로 설정하였다. 또한 20바이트의 패킷을 1초 마다 전송하고 ACK(Acknowledgment)를 받는 방법으로 진행하였으며, 60초 동안 각 노드에서 수신된 ACK의 수신율을 측정하였다.

그 결과 그림 2와 같이 사람의 이동이 많은 환경과 적은 환경에서 링크의 품질을 비교 할 수 있었다. 세로축에서 제시한 것과 같이 정방향과 역방향의 패킷 수신율의 차이를 통하여 링크의 비대칭성 정도를 판단하였다. 사람의 이동이 많은 환경인 경우 두 개 노드의 수신율의 차이가 최대 42.4%까지 나타났으며 평균 수신율의 차이는 7.2%를 보였다. 반면에 사람의 이동이 적은 환경에서의 결과는 최대 25%까지 나타났으며 평균 수신율의 차이가 4.4%를 나타내었다. 이와 같이 장애물이 많은 환경에서는 링크의 품질 감소로 인하여 수신율의 비대칭성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 고온의 환경에서는 라디오의 전송 파워가 감쇄되고 습도가 높을수록 전송거리가 증가하게 된다^{12),13)}. 즉 날씨에 따라서 링크의 품질이 변화될 수 있으며, 특히 날씨에 구애를 받는 응용에서는 날

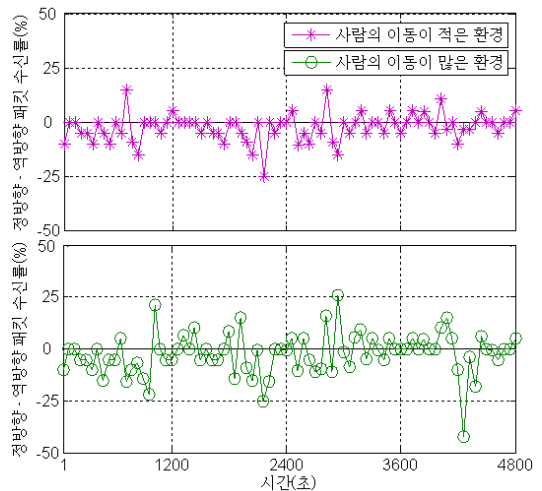


그림 2. 환경적 요인에 따른 양방향의 패킷 수신율

씨에 따른 링크품질 변화를 고려해야한다. 마지막으로 802.15.4의 2.4GHz는 비슷한 주파수 대역을 사용하는 802.11b의 간섭을 받는다. K.Srinivasn et. al^[2]는 그림 3과 같이 802.15.4에서 사용하는 11번에서부터 26번까지의 총 16개의 채널 중에서 25와 26번 채널을 제외한 나머지 채널은 802.11b에 의해 간섭을 받게 되며, 802.11b이 설치된 환경에서 무선 센서 네트워크의 11번과 26번 채널의 성능을 측정 한 결과 11번 채널의 패킷 손실이 26번보다 많은 것을 증명하였다.

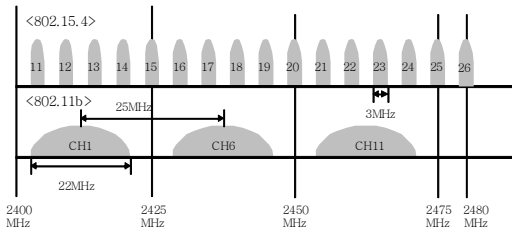


그림 3. 802.11b와 802.15.4의 주파수 스펙트럼

2.2 링크의 품질 측정

물리계층에서 제공하는 LQI는 노드에 장착된 라디오 송수신기인 CC2420에서 지원하는 링크 품질의 지표로써 수신된 패킷의 비트 에러율을 이용하고 그 값을 0~255까지 표현한다. 하드웨어 자체에서 지원하는 링크 품질 지표로 비용적 측면에서 저렴하고 RSSI(Received Signal Strength Indication) 값을 기반으로 칩 에러율(Chip Error Rate)를 계산하여 링크의 품질을 산출한다. 하지만 CC1000, CC2400등과 같은 라디오 송수신기의 경우 LQI를 제공하지 않고 RSSI를 지원하기 때문에 노드의 확장성 문제가 있다. 표 1과 같이 제조사별로 지원하는 링크 품질 지표가 각각 다른 것을 알 수 있다.

또한 MultihopLQI는 수신된 패킷에서 샘플링한 LQI 값에 따라 링크의 품질을 판별하고 경로를 설

표 1. 제조사 및 제품별 링크 품질 지원여부

Type	Vender	PartNumber	링크품질지표
Narrow Band	RFM	TR1000	RSSI
	TI	CC1000	RSSI
	TI	CC2400	RSSI
	Nordic	nRF2401	None
Wide Band	TI	CC2420	RSSI/LQI
	TI	CC2520	RSSI/LQI
	Freescalse	MC13191/92	RSSI/LQI
	Zeevo	ZV4002	RSSI

정한다. 따라서 수신율이 좋지 않더라도 LQI가 좋으면 품질이 좋은 링크로 판단하기 때문에 패킷 손실이 종종 발생한다. 결국 물리계층에서는 링크의 품질을 미리 예상하고 상위 계층에서 대응할 수 있는 정보로 이용될 수 있지만, 정확한 정보를 얻을 수 없다는 것을 고려해야 한다.

데이터 링크 계층에서는 ETX와 같이 링크의 두 방향에서 패킷의 전송과 전송된 패킷의 ACK (Acknowledgment)를 계산하여 경로 설정에 참조한다. 즉, 정방향의 패킷 손실률을 p_f , 역방향의 패킷 손실률을 p_r 이라고 하였을 때 링크의 ETX는 식 (1)로 나타낼 수 있다. 식 (1)에서 d_f 는 정방향의 전송률로 $1-p_f$ 을 의미하고 d_r 은 역방향의 전송률로 $1-p_r$ 을 의미한다.

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r} \quad (1)$$

구체적으로는 각 노드에서 수신 받은 패킷에는 시퀀스 넘버(Sequence Number)를 포함하여 이웃 노드에서 받은 패킷의 전송률을 구하고 그 정보를 비컨과 같은 메시지에 포함하여 이웃 노드의 ETX를 계산한다. 또한 경로를 설정할 때는 경로의 ETX 합이 가장 낮은 값으로 한다. 그림 4는 ETX를 측정하는 방법의 예시를 보여주고 있다. 소스 노드가 10개의 비컨 패킷을 보내었을 때 목적지는 9개의 패킷을 받아 $1-p_f$ 에 의하여 정방향 전송률은 0.9가 되며, 소스 노드는 목적지 노드로부터 10개의 ACK중 8개의 ACK를 받았기 때문에 $1-p_r$ 에 의하여 역방향 전송률은 0.8이 된다. 이 링크의 ETX의 값을 계산하면 식 (1)에 의하여 ETX 값은 1.39로 나타낼 수 있다.

데이터 링크 계층의 ETX기법은 전송한 패킷에서 샘플링한 수가 많을수록 정확한 정보를 얻기 때문에 물리 계층의 링크 품질 측정 방법보다 느리게

$$ETX = \frac{1}{(d_f \times d_r)} = \frac{1}{0.9 \times 0.8} = \frac{1}{0.72} = 1.39$$



PRR Form D to S = 0.2

PRR Form S to D = 0.2

그림 4. ETX 측정 방법

측정할 수 있다. 특히 대규모의 밀집된 네트워크의 상황에서는 이웃 노드가 증가하게 되며, 각각의 이웃 노드를 ETX와 같은 기법으로 링크 품질을 측정한다면 트래픽이 많아질 것이며, 다수의 노드의 정보가 경로 설정 테이블에 저장이 된다면 컴퓨팅 자원이 한정된 노드에 심각한 오버헤드를 초래할 것이다.

P. Levis et. al^[14]은 Trickle이라는 알고리즘을 사용하여 네트워크에 적응적으로 코드를 전송하는 알고리즘을 제안하였다. Trickle은 토폴로지가 안정적이고 견고할 때 적은 비컨 패킷을 보내고 급격하게 코드를 전송하는 타이머를 증가시킨다. 반대로 데이터 전송 경로가 문제가 있는 것을 발견하였을 때는 매우 빠르게 적응하는 방법이다. Trickle은 크게 두 가지 메커니즘을 이용하는데 전송 억제와 적응적인 타이머 주기이다. 만약 노드가 이웃 노드로부터 같은 버전의 코드에 대한 메시지 받으면, 자신의 전송을 억제하여 반복 메시지를 줄인다. 또한 새로운 코드 버전을 수신하였을 때는 짧은 주기로 타이머를 설정하여 빠르게 업데이트를 하며 보통의 상태일 때는 설정한 최대의 주기까지 점차 상승시킨다. 네트워크의 밀집도가 적은 상황에서는 짧은 주기의 비컨 패킷의 트래픽이 적기 때문에 짧은 주기로 링크의 품질을 측정하여도 오버헤드가 적다. 그러나 밀집도가 높은 네트워크에서는 링크의 품질 측정할 때 브로드캐스트되는 비컨의 수가 다양으로 증가되기 때문에 트래픽, 에너지 소모, 지연 시간이 증가하게 된다. 따라서 네트워크의 밀집도에 따라 링크의 품질을 적응적으로 측정할 필요가 있다.

III. 적응적 링크 품질 측정과 경로 설정 기법

링크의 품질은 하드웨어의 제약과 주변 환경의 영향으로 매우 동적으로 변화하게 된다. 노드는 변화된 경로 정보를 빠르게 얻지 못한다면 오래된 경로 정보를 가지고 데이터를 전송하기 때문에 경로 설정 정보를 업데이트하기 전까지 데이터 손실을 초래하게 된다. 이와 반대로 링크의 품질의 변화가 적을 경우 빈번한 경로 설정 정보를 업데이트는 심각한 오버헤드를 초래할 뿐만 아니라 에너지 소모가 많아지게 되어 네트워크의 생존 시간이 감소된다. 결국 동적인 네트워크 상황에서는 민첩하게 경로 설정을 업데이트하며 패킷 손실을 줄이고 안정적인 때는 적은 오버헤드를 갖도록 경로 설정 업데이트 메시지를 줄이는 적응적인 링크 품질 측정 기법이 필요하다.

3.1 주기적인 링크 품질 측정의 문제점

비컨 패킷을 기반으로 하는 대부분의 링크품질 측정 기법에서는 주기적으로 비컨을 브로드캐스트한다. 그림 5와 같이 싱크 노드를 A라고 하고 B, C를 센서 노드라고 가정하였을 때, 장애물의 이동, 노드의 이동, 전송 파워 감소 등에 의해 노드 B는 대체 경로인 노드 C로 경로를 설정해야 한다. 하지만 주기적으로 링크 품질을 측정하게 되면 패킷 손실 및 지연의 우려가 있다. 즉 주기적으로 링크의 품질을 측정하는 노드 B는 다음의 주기기 도달할 때까지 토폴로지의 변화를 파악할 수 없기 때문에 변화 발생부터 변화를 인식하는 기간 동안 패킷을 손실하게 된다. 만약 재전송을 사용하게 된다면 토폴로지 변화를 파악한 후에 재전송이 가능하기 때문에 전송의 지연을 야기한다. 따라서 노드 B는 링크의 품질이 저하될 때에 적합한 경로인 노드 C를 통하여 데이터를 전송할 수 있도록 빠르게 경로를 재 탐색해야 한다.

링크 품질이 감소하였을 때, 그림 6(a)와 같이 긴 주기의 링크 품질 측정은 심각한 패킷 손실을 유발할 수 있다. 반면에 그림 6(b)의 경우는 짧은 주기로 링크의 품질을 측정하고 경로를 변경하기 때문에 패킷 손실을 줄일 수 있다. 그러나 네트워크가 안정적일 때는 짧은 주기의 비컨의 패킷은 불필요한 에너지 소모를 발생하기 때문에 긴 주기로 링크의 품질을 측정하는 것이 바람직하다.

실험을 통하여 주기적인 비컨 패킷으로 링크의 품질을 측정할 때의 문제점을 파악하였다. 싱크 노드를 포함한 3개의 노드를 구성하여 TinyOS의 시뮬레이터인 TOSSIM^[15]에서 CC2420을 지원하는 MICAZ 플랫폼을 이용하였다. 안정적인 네트워크와 링크 품질의 변화가 많은 불안정한 네트워크에서 링크의 품질을 측정하는 비컨의 주기를 변화시켜 성능을 측정하였다. 링크의 상태는 안정적인 노이즈 모델과 불안정한 노이즈 모델을 이용하였으며, 일정 주기에 데이터의 전송하여 각 비컨의 주기에 따른

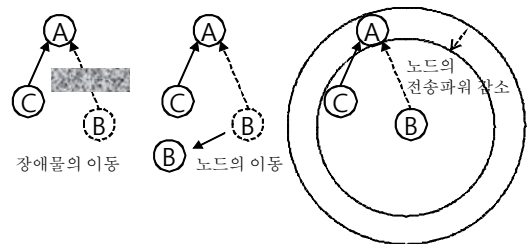


그림 5. 링크 품질의 감소 요인

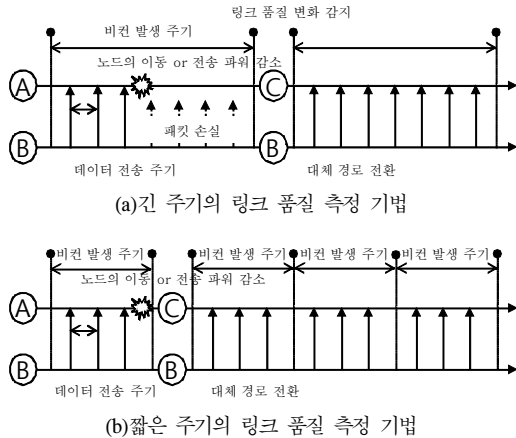


그림 6. 비컨 기반의 주기적인 품질 측정 기법

표 2. 주기적인 링크 품질 측정 기법의 성능평가 파라미터

실험시간	3000초
데이터 전송주기	8초 (총: 370개의 패킷)
비컨 주기	1,2,5,10,20,30,50,100,300초
노드의 수	3
링크 모델	Transitional Region 링크모델, Effective Region 링크모델 ^[6]

패킷 수신율을 측정하였다. 실험 환경은 표 2와 같다.

실험 결과는 그림 7과 같이 비컨의 발생 횟수는 주어진 3000초 동안 비컨의 주기로 나눈 값과 일치하여 나타났다. 비컨의 발생 횟수는 에너지와 오버헤드와 상응하는 값이라고 할 수 있다. 또한 그림 8의 패킷 수신율에 대한 실험에서 안정적인 네트워크에서는 비컨의 주기를 변경하여도 대부분 100%의 패킷 수신율을 보여 주었다. 불안정한 링크가 존재하는 네트워크에서는 비컨의 주기가 커질수록 안정적인 네트워크보다 패킷의 수신율이 대체적으로 감소하는 경향을 볼 수 있다. 따라서 노드의 이동이나 환경의 변화에 따라 전송 거리가 감소되고 링크

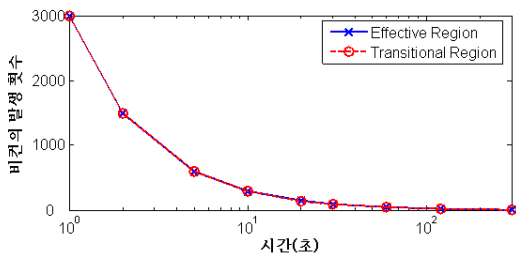


그림 7. 각 주기별 비컨 발생 횟수

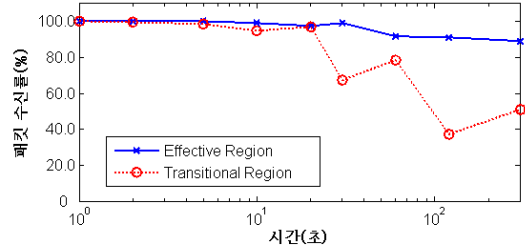


그림 8. 각 주기별 패킷 수신율

의 품질이 저하되었을 때, 빠르게 전송이 가능한 경로로 대체하지 못하여 패킷 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

결국 안정한 링크일 때는 빈번하게 발생하는 비컨의 횟수를 줄이는 것이 에너지와 오버헤드의 측면에서 이득이 될 수 있다. 또한 불안정한 링크일 때는 브로드캐스트되는 패킷에 영향을 덜 받기 때문에 비컨의 주기를 짧게 하여 링크의 품질을 측정하는 것이 패킷의 손실을 줄일 수 있다.

3.2 적응적인 링크 품질 측정 기법

네트워크 밀집도는 자신이 포함하고 있는 이웃 노드의 테이블 수로 판별할 수 있다. 네트워크 측면에서 다수의 이웃 노드가 존재할 때는 전송 가능한 다수의 경로가 존재할 가능성이 많아지기 때문에 네트워크 파티션을 방지할 수 있는 장점이 있다. 즉, 노드의 실패가 일어나더라도 새로운 경로를 재탐색하여 좋은 경로를 선택할 수 있는 가능성이 많아지는 것이다. 그러나 네트워크의 밀집도는 링크 품질의 측정에서 브로드캐스트된 패킷에 의해서 다수의 노드가 간섭을 받기 때문에 트래픽 문제가 심각해질 수 있다. 특히 짧은 주기로 링크의 품질을 측정할 때 주변의 이웃 노드가 다수 존재하기 때문에 노드의 링크 품질이 불안정하면 좋은 경로를 찾기 위한 경로 재설정이 빈번하게 발생되어 더욱 심각한 오버헤드 문제를 야기할 수 있다. 이와 반대로 밀집도가 낮은 네트워크에서는 네트워크의 파티션을 복구할 수 없지만 빈번한 링크의 품질 측정은 밀집도가 높은 네트워크 보다 오버헤드가 적으며, 링크의 품질이 불안정할 때 빠르게 적응할 수 있는 방법이 된다.

본 논문에서 제안하는 링크 상태와 밀집도를 고려한 적응적인 링크 품질 측정 알고리즘은 그림 9와 같다. 먼저 초기 설정에서는 네트워크 밀집도를 구분하기 위하여 이웃 노드 테이블의 한계값을 설정하고 링크의 변화가 발생할 시 적응적으로 링크

```

PROGRAM Link state and density aware link quality estimation

GLOBAL Bcurrent, Ncurrent
Set the number of neighbor nodes Nnum,
Set the [max,min] beacon interval Bmax, Bmin

WHILE
    IF (New node || Data packet loss) THEN
        Beacon timer reset
        Beacon interval = Bmin
    ELSE
        Beacon interval = Bcurrent
        IF (Ncurrent > Nnum) THEN
            Increase multiplicatively the Bicurrent
            IF (Bmin ≤ Bcurrent) Bcurrent = Bmax
        ELSE
            Increase additively the Bicurrent
            IF (Bmin ≤ Bcurrent) Bcurrent = Bmax
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF
ENDWHILE

END PROGRAM
    
```

그림 9. 링크 상태와 밀집도를 고려한 적응적인 링크 품질 측정 알고리즘

의 품질을 측정하기 위한 주기의 최소값과 최대값을 설정한다. 다음은 링크의 품질의 변화를 판별하는 단계로 새로운 노드가 생성되어 이웃 노드와의 링크 품질을 측정하여 새로운 경로 선택이 필요할 때나 현재 통신을 하던 노드가 이동을 하거나 주변 환경의 영향으로 인해 링크의 품질이 감소하는 경우이다.

만약 링크 품질의 변화가 일어났을 때 링크의 품질을 측정하는 주기가 초기화 되고 앞서 설정한 최소의 링크 품질 측정 주기로 동작하여 변화된 링크에 따라 빠른 속도로 적응하여 패킷 손실이나 지연을 방지할 수 있도록 한다. 결국 변화된 링크에 적응하였을 때 현재의 짧은 주기는 네트워크에 많은 비용을 초래하기 때문에 다시 긴 주기인 설정한 최대값의 주기로 도달해야 한다. 이러한 동작을 다음 단계에서 행하게 되는데 이 단계에서는 초기 설정 값인 이웃 노드의 수를 기준으로 네트워크의 밀집도를 판별한다. 네트워크의 밀집도에 따라서 초기에 설정한 최대값까지 증가시키는 방법을 달리한다. 밀집도가 높은 네트워크에서는 빈번한 링크 품질 측정은 심각한 오버헤드를 초래하기 때문에 처음의 최소값에서 최대값까지 지수적으로 증가하여 오버헤드를 감소시키며, 빈번한 경로의 재설정을 방지하는 효과를 얻을 수 있다. 이와 반대로 밀집도가 낮은 네트워크에서는 빈번하게 링크 품질을 측정하여도 오버헤드가 적다. 또한 대체 경로가 적은 상황에서 링크 품질 변화에 빠른 적응을 할 수 있도록 링크

```

PROGRAM Link quality based routing

GLOBAL UPDATEnum, Currentparent_lq, Neighborlq
Set the BCAST estimation window size BCASTwindow

WHILE
    IF (BCASTwindow ≤ UPDATEnum) THEN
        UPDATEnum Reset
        IF (Currentparent_lq < Neighborlq) THEN
            Change the other parent
        ELSE
            Maintain the current parent
        ENDIF
    ELSE
        Update the link quality of neighbor table
    ENDIF
ENDWHILE

END PROGRAM
    
```

그림 10. 링크 품질 측정 기반 경로 설정 알고리즘

의 품질 측정을 초기 최소값에서 최대값까지 가산적으로 증가시킨다.

그림 10은 링크상태와 밀집도를 고려하여 링크 품질 측정하고 경로를 설정하는 알고리즘이다. 이 알고리즘은 비컨으로 측정한 각각의 이웃 노드의 링크 품질을 업데이트하고 이것의 횟수가 충족될 때 현재의 부모 노드와 이웃 노드의 링크 품질을 비교하여 경로를 재설정하거나 유지하는 방법이다. 만약 현재의 부모가 테이블에 없을 때에는 새로운 이웃 노드를 부모 노드로 설정한다.

IV. 실험 및 성능 평가

본 장에서는 적응적인 링크 품질 측정 알고리즘의 성능 평가를 위해 TinyOS의 TOSSIM에서 MICAZ 플랫폼을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 4.1절에서 링크 상태에 따른 적응적인 링크 품질 측정에 대한 성능평가를 하였으며, 4.2절에서는 네트워크의 밀집도에 따른 적응적인 링크 품질 측정에 대하여 성능을 측정하였다.

4.1 링크 상태에 따른 성능 평가

링크 상태에 따라 적응적으로 링크의 품질을 측정하는 알고리즘에 대한 성능을 평가하기 위해 링크 노드를 포함한 3개의 노드에서 링크의 신호의 세기를 변화시켰다. 또한 각 노드는 주기적으로 데이터를 전송하고 링크의 품질변화에 따라 적응적으로 비컨의 주기를 변경하고 초기화하는 알고리즘을 실험하였다. 노드간 링크는 전송 불가능 영역(Clear

Region), 전송이 불안정한 영역(Transitional Region), 전송 가능 영역(Effective Region)의 세 가지 영역으로 나눌 수 있다⁶⁾. 전송이 불안정한 영역은 환경의 변화나 노드의 성능 변화에 따라 나타나는 현상으로 그 정도가 심각할 때 이 영역이 확장될 수 있다. 그림 11과 같이 전송이 불가능한 영역으로 선정된 RSS(Receive Signal Strength)인 -102dBm이하에서는 노드 간에 비컨을 전송을 할 수 없기 때문에 비컨의 발생 횟수가 적었다. 또한 그림 12와 같이 노드 간에 데이터 전송을 할 수 없기 때문에 전체 3개의 노드 중에서 싱크 노드만이 데이터 전송을 하여 약 33%의 패킷 수신율을 보여 주고 있다. 다음 -102dBm에서 -98dBm사이인 전송이 불안정한 영역에서는 링크의 품질에 매우 불안정하게 변하기 때문에 지속적으로 링크의 품질을 적응적으로 측정하므로 전체 노드에서 비컨의 횟수 변화가 많은 것을 확인할 수 있고 패킷의 수신율 개선을 확인할 수 있다. 마지막으로 -98dbm 이상에서는 전송 가능 영역으로 노드 간의 주고받는 비컨의 수는 전송 불가능 영역보다 증가하였으며, 패킷 수신율은 100%에 가깝게 도달하는 것을 알 수 있

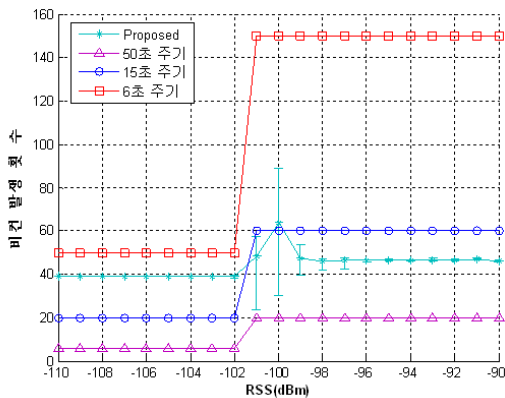


그림 11. 링크상태에 따른 비컨의 발생 횟수

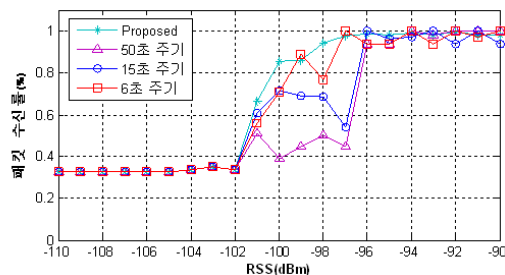


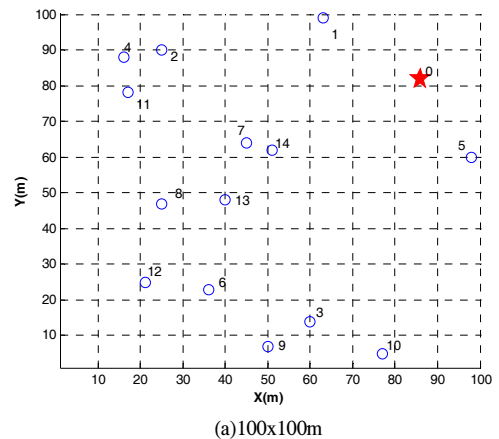
그림 12. 링크상태에 따른 패킷 수신율

다. 따라서 불안정한 링크에서는 품질의 변화 판별을 통하여 적응적으로 링크의 품질을 측정하는 것이 주기적으로 링크를 측정하는 방법에 비하여 에너지 효율적으로 패킷의 수신율을 개선할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

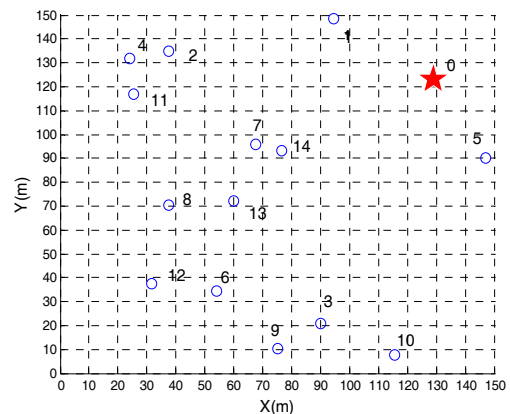
4.2 네트워크 밀집도에 따른 성능 평가

네트워크의 밀집도에 따른 적응적인 링크 품질 측정의 성능 평가를 하기 위해 그림 13(a), 13(b)와 같이 100x100m과 150x150m의 영역에서 같은 전송 파워로 싱크 노드를 포함한 15개의 노드를 거리에 대칭적으로 배치하여 밀집도를 다르게 설정하였다. 즉 150x150m보다 100x100m에서 노드의 밀집도가 높으며, 또한 이웃 노드의 수가 많다.

그림 14는 100x100m과 150x150m의 배치에서 10회의 실험을 통하여 링크 품질 측정 주기를 지속적으로 증가시킬 때의 패킷 수신율 비교를 나타낸



(a)100x100m



(b)150x150m

그림 13. 밀집도에 따른 노드의 배치

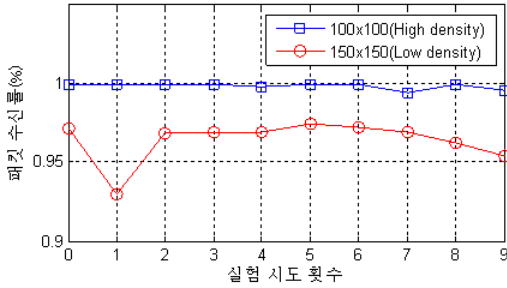


그림 14. 링크 품질 측정 주기를 가산적으로 증가시킬 때의 패킷 수신율

다. 즉, 링크의 품질이 감소하였을 때 측정 주기를 최소값인 1초로 초기화하고 현재 값에 2를 곱하여 최대값인 50초 까지 지수적으로 증가하도록 하였다. 밀집도가 높은 경우 이웃하는 대체 경로가 다수 존재하기 때문에 표 3과 같이 대체적으로 적은 수의 비컨으로 100%에 가까운 패킷 수신율을 보여주고 있다. 하지만 밀집도가 낮은 경우 링크의 품질이 불안정한 상황에서는 적은 수의 비컨으로 효율적으로 대체 경로를 설정하지 못하기 때문에 낮은 수신율을 보여주고 있다.

그림 15에서는 비컨의 주기를 가산적으로 증가시켰을 때, 밀집도에 따른 패킷 수신율을 비교하였다.

표 3. 비컨의 발생 횟수

밀집도	비컨의 증가방법	평균 비컨 발생 횟수
100x100 높음	지수적으로 증가	192 (최소:185, 최대:210)
150x150 낮음	지수적으로 증가	245 (최소:189, 최대:360)
100x100 높음	가산적으로 증가	786 (최소:705, 최대:1123)
150x150 낮음	가산적으로 증가	1406 (최소:905, 최대:1827)

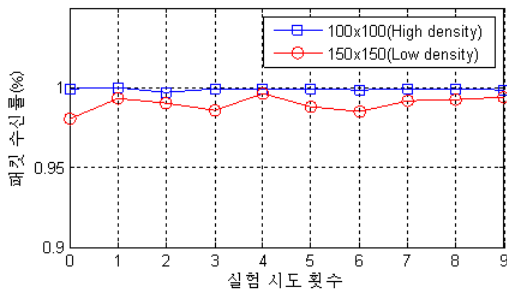


그림 15. 링크 품질 측정 주기를 지수적으로 증가시킬 때의 패킷 수신율

마찬가지로 최소값으로 초기화된 상태에서 현재 값에 5초씩 더하여 최대값까지 증가시켰다. 밀집도가 높거나 낮은 경우에도 가산적으로 증가하였을 때는 많은 수의 비컨으로 측정하기 때문에 두 경우 모두 좋은 패킷 수신율을 보인다. 그러나 비컨의 발생 수는 밀집도와 상관없이 많아지는 것을 표 3에서 확인할 수 있다. 즉 밀집도가 높을 경우 다수의 품질이 좋은 링크가 존재하며 에너지 소모 및 오버헤드 측면에서도 많은 수의 비컨은 불필요하다는 것을 알 수 있다. 결국 밀집도가 높은 네트워크에서는 적은 링크 품질 측정의 표본으로 경로를 설정하여 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 따라서 적은 수의 비컨으로 오버헤드를 줄이는 것이 경로를 효율적으로 설정할 수 있다. 밀집도가 낮은 네트워크에서는 링크 품질 측정의 오버헤드가 높은 밀집도의 네트워크 보다 적기 때문에 빈번하게 비컨을 교환하여 많은 링크 품질 측정의 표본으로 경로를 선택하는 것이 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

V. 결론

무선 센서 네트워크에서 무선 링크 품질의 불안정은 하드웨어나 주변 환경에 의해 발생한다. 즉, 하드웨어의 제약이 많은 센서 노드는 배터리의 전압 레벨과 안테나의 특성에 따라 링크의 품질의 차이가 발생하며, 또한 온도, 습도, 802.11b와의 간섭, 장애물 등에 의하여 링크의 품질이 저하될 수 있다. 이와 같이 무선 센서 네트워크에서는 링크의 품질이 불안정하게 변하기 때문에 기존의 주기적인 링크품질 측정은 신뢰성과 에너지의 측면에서 비효율적이다.

본 논문에서는 손실이 많은 대규모의 무선 센서 네트워크에서 적응적으로 링크의 품질을 측정할 뿐만 아니라 네트워크의 밀집도를 고려하여 링크의 품질을 측정하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 측정된 링크의 품질을 기반으로 경로를 설정하는 알고리즘을 제안하였다. 첫 번째로 비컨의 주기별 패킷 수신율을 통하여 링크가 불안정할 때에는 비컨 발생주기가 빈번할수록 패킷 수신율이 향상될 수 있음을 확인하였다. 이를 통하여 시간에 따라 변화하는 무선 링크에 대하여 품질 측정 주기를 달리해야 할 필요성에 대하여 인식하였다. 두 번째 링크 상태에 따라 품질 측정 주기를 달리하는 알고리즘의 성능평가에서는 불안정한 링크 상태에서 품질 변화 판별을 통하여 적응적으로 링크의 품질을 측정함으

로써 기존의 주기적인 측정 기법에 비하여 패킷 수신율 및 에너지 효율의 개선이 있음을 확인하였다. 마지막으로 밀집도를 고려하여 링크의 품질의 주기를 최소값으로 초기화한 상태에서 주기를 증가하는 방법을 조절함으로써 각 밀집도에 따른 적절한 비컨발생으로 신뢰성을 향상 시키고 에너지 효율을 피할 수 있었다. 향후에는 응용에 따라 변화하는 QoS(Quality of Service) 요구사항을 충족시키기 위하여 본 논문에서 성능을 평가한 신뢰성과 에너지 효율성뿐만 아니라 전송지연 측면을 추가적으로 고려해야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] R. Murty, A. Gosain, M. Tierney, A. Brody, A. Fahad, J. Bers, and M. Welsh, "CitySense: A Vision for an Urban-Scale Wireless Networking Testbed," *In Technical Report TR-13-07*, September 2007.

[2] K. Srinivasan, P. Dutta, A. Tavakoli, and P. Levis, "Some Implication of Low Power Wireless to IP Networking," *In Proc. of ACM HotNets-V*, November 2006.

[3] MultiHopLQI, <http://www.tinyos.net>

[4] R. Fonseca, O. Gnawali, K. Jamieson, and P. Levis, "Four-Bit Wireless Link Estimation," *In Proc. of ACM HotNets-VI*, November 2007.

[5] D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-Throughput path Metric for Multi-hop Wireless Routing," *In Proc. of ACM MobiCom '03*, September 2003.

[6] A. Woo, T. Tong, and D. Culler. "Taming the Underlying Challenges of Reliable Multihop Routing in Sensor Networks," *In Proc. of ACM SenSys '03*, November 2003.

[7] S. Ni, Y. Tseng, Y. Chen, and J. Sheu, "The Broadcast Storm Problem in Mobile Ad Hoc Network," *In Proc. of ACM MobiCom '99*, August 1999.

[8] D. Ganesan, B. Krishnamachari, A. Woo, D. Culler, D. Estrin, and Stephen Wicker, "Complex Behavior at Scale: An Experimental Study of Low-Power Wireless Sensor Networks," *In Technical Report*

UCLA/CSD-TR 02-0013, 2002.

[9] CC2420 RF Transceiver, <http://ti.com>.

[10] MSP430F1611, <http://ti.com>.

[11] Telosb Mote, <http://www.xbow.com>.

[12] K. Bannister, G. Giorgetti, and S. Gupta, "Wireless Sensor Networking for "Hot" Applications: Effects of Temperature on Signal Strength, Data Collection and Localization," *In Proc. of ACM HotEmNets '08*, June 2008.

[13] J. Thelen, D. Coense, and K. Langendoen, "Radio Wave Propagation in Potato Fields," *In Proc. of IEEE WiOpt '05*, April 2005.

[14] P. Levis, N. Patel, D. Culler, and S. Shenker, "Trickle: A Self-Regulating Algorithm for Code Maintenance and Propagation in Wireless Sensor Networks," *In Proc. of ACM NSDI '04*, March 2004.

[15] TOSSIM simulator, <http://tinyos.net>.

이 정 욱 (Jungwook Lee)

준회원



2008년 8월 광운대학교 정보제어공학과
2008년 8월~현재 광운대학교 전자통신공학과 석사과정
<관심분야> 무선센서네트워크, 임베디드시스템

정 광 수 (Kwangsue Chung)

종신회원



1981년 2월 한양대학교 전자공학과
1983년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1991년 2월 미국 University of Florida 전기공학과 박사 (컴퓨터공학전공)

1983년 3월~1993년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원
1993년 3월~현재 광운대학교 전자통신공학과 교수
<관심분야> 인터넷 QoS, 유·무선 비디오 스트리밍, 센서 네트워크