

무선 센서 망을 위한 K -연결 $(K+1)$ -감지도 고장 감내 위상 제어 프로토콜

정회원 박 재 현*

K -connected, $(K+1)$ -covered Fault-tolerant Topology Control Protocol for Wireless Sensor Network

Jae-Hyun Park* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 무선 센서 망으로 k -연결 $(k+1)$ -감지 고장 감내 위상을 구성하는 분산 위상 제어 프로토콜을 제시한다. 센서 망에 있어 최근에 주목받고 있는 근본적인 문제는 최소한의 활동하는 노드들로 위상을 구성하며, 다양한 응용과 환경에 적합한 감지도와 망 연결수를 제공하는 것이다. 망의 수용 능력을 증대시키는 동시에 에너지 효율성을 개선하고 더불어 망의 연결성을 유지하기 위해서, 많은 위상 제어 알고리즘들이 제안되어 왔다. 대부분의 알고리즘들은 연결되는 링크들의 수를 줄임으로써, 노드들의 고장이나 파손시에 여분의 경로배정이 어렵게 되는 문제를 발생시킨다. 특정 감지도를 보장하며 이 문제를 해결하는 프로토콜이 제안되었으나, 감지도 계산을 위해서는 정확한 위치정보가 필요하고, k -감지인 경우에 대부분의 활동 센서들이 $2k$ -연결을 유지한다. 우리는 감지 범위의 반지름이 통신 범위의 반지름의 두 배인 조건이 연결이 감지범위를 함의하기 위한 필요충분조건임을 증명하고, 이에 기반하여 무선 센서 망에서 k -연결을 제공하며 $(k+1)$ -감지를 보장하는 고장 감내 위상을 구성하는 프로토콜을 제시한다. 제한된 분산된 알고리즘은 정확한 위치정보 없이 $(k+1)$ -감지를 보장하며, 복잡도는 $O(1)$ 이다. 모의 실험하여 패킷손실율과 전송 지연시간 그리고 에너지 소비율을 분석 하였다.

Key Words : Fault-tolerant Topology Control, Wireless Sensor Network, K -connectivity, $(K+1)$ -coverage, Distributed algorithm

ABSTRACT

In this paper, we present a distributed fault-tolerant topology control protocol that configure a wireless sensor network to achieve k -connectivity and $(k+1)$ -coverage. One fundamental issue in sensor networks is to maintain both sensing coverage and network connectivity in order to support different applications and environments, while some least active nodes are on duty. Topology control algorithms have been proposed to maintain network connectivity while improving energy efficiency and increasing network capacity. However, by reducing the number of links in the network, topology control algorithms actually decrease the degree of routing redundancy. Although the protocols for resolving such a problem while maintaining sensing coverage were proposed, they requires accurate location information to check the coverage, and most of active sensors in the constructed topology maintain $2k$ -connectivity when they keep k -coverage. We propose the fault-tolerant topology control protocol that is based on the theorem that k -connectivity implies $(k+1)$ -coverage when the sensing range is at two times the transmission range. The proposed distributed algorithm does not need accurate location information, the complexity is $O(1)$. We demonstrate the capability of the proposed protocol to provide guaranteed connectivity and coverage, through both geometric analysis and extensive simulation.

* 중앙대학교 공과대학 컴퓨터공학부 (hyunie@cau.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-07-297, 접수일자 : 2009년 7월 29일, 최종논문접수일자 : 2009년 11월 11일

I. 서 론

센서 기술과 무선 통신 기술의 발전은 환경 감시, 전쟁터 수색, 공해 감시, 교통 감시, 교량과 같은 기간시설의 감시와 같은 응용에 적합한 저비용의 대규모 센서 망의 구성을 가능하게 하고있다^{[1],[2]}. 무선 센서 망은, 서로 다중 홉의 무선 링크들을 통해서 통신하며, 공통의 일을 수행해나가기 위해서 협력하는, 작고 저전력을 사용하는 센서들로 구성된다.

전통적으로 무선 센서 망의 설계의 주안점은 가능한 오래 센서 망의 기능을 유지하는 것이다^[1]. 센서는 전지를 사용하기 때문에, 시간이 지나면서 에너지를 다 써버리게 된다. 이러한 센서들은 감시 기능을 더 이상 할 수 없게 된다. 최근의 연구들은 무선 센서 망들에 있어서 노드들의 작동 시간을 동적으로 관리함으로써 의미있는 에너지 절약을 할 수 있음을 보이고 있다^[2]. 이러한 방법들에서, 몇몇 노드들은 에너지 절약 모드로 들어가도록 스케줄되고, 나머지 동작하는 노드들은 지속적인 서비스를 제공한다^[2].

최근에 주목 받고 있는 센서 망의 근본적인 문제는 활동하는 노드들의 수를 최소화 하며, 응용들에 적합하게 수용될 수 있는 품질의 서비스를 제공하는 것이다. 특히 충분한 감지도 (Sensing Coverage)와 망 연결(Network Connectivity)을 활동하는 노드들로 제공하는 것은 센서 망들에서 반드시 요구된다^{[2],[5]}.

에너지 효율성을 개선하고 더불어 망의 연결성을 유지하기 위해서, 많은 위상 제어 알고리즘들이 제안되어 왔다^[6]. 대부분의 알고리즘들은 연결되는 링크들의 수를 줄임으로써, 에너지 효율성을 높이는 일에 주력해왔으나, 노드들의 고장이나 파손시에 망의 신뢰성을 떨어뜨리고, 여분의 경로배정이 어렵게 되는 문제를 발생시킨다^[6]. 특히 연결은 센서 망의 통신에 있어서 고장 감내성을 제공하는 것과 고성능을 제공하는 것에 많은 영향을 미친다^[6].

대부분의 센서 망들은 반드시 연결되어 있어야 한다. 즉 활동중인 노드들은 동작 중에 연결이 끊어지면 안된다. 특히, 많은 센서 망의 응용들에 있어서, 특히 예를 들어 전쟁터와 같은 상황에서는, 센서의 손상이나 고장 발생이 가능한데, 이런 경우, 하나의 고장이 망의 파손을 야기하는, 하나의 연결만을 유지하는 위상은 적합하지 않다^[6].

감지도 문제 역시 센서 망에 있어서 근본적인 문제이다^{[2],[5],[7],[8]}. 감지도는 하나의 센서 망이 얼마나

잘 감시 혹은 추적을 할 수 있는지를 나타낸다^{[7],[8]}. 센서 망이 감시하는 영역 내의 모든 점들이 적어도 k 개의 센서들에 의해서 감지되고 있는지 여부를 결정하는 문제는 센서 망의 품질을 결정하는 중요한 문제이다^{[7],[8]}. 이러한 k -연결과 k -감지 문제를 통합적으로 다루어 위상을 구성하는 프로토콜이 제안되었으나^[2], 이것은 k -감지인 경우에 k -연결을 보장하는 프로토콜이며, k -연결인 경우에 k -감지를 보장하지 못한다. 이 프로토콜로 구성되는 k -감지 센서 망은 목표 감시 영역의 대부분을 차지하는 내부 센서들 사이에 $2k$ 의 연결들을 제공한다.

센서의 감지 범위 (Sensing range)를 넓힘에 따른 에너지 소모량은 센서의 기술에 따라 선형으로 또는 제곱에 비례하여 늘어난다^[9]. 그런데, 최근의 미세전자기계시스템 (MEMS)의 발전에 따라, 비슷한 에너지 소모량을 유지하며 센서의 감도는 수십 배 정도 커지고 있다^{[10],[11]}.

본 논문에서는 무선 센서 망에서 k -연결을 제공하고, 이 위상이 감지 범위의 반지름이 통신 범위의 반지름의 두 배 이상 인 경우에 $(k+1)$ -감지를 보장하는 새로운 고장 감내 위상 제어 프로토콜을 제시한다. 제안된 프로토콜은, 본 연구에서 제시한 k -연결을 확인하면 $(k+1)$ -감지를 보장한다는 정리를 사용하여, 정확한 위치정보 없이 $(k+1)$ -감지를 보장한다.

본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 관련된 작업을 살펴본다. 3절에서는 연결 개수로부터 감지도를 알아낼 수 있는 방법을 분석한다. 4 절에서는 프로토콜을 제안하고, 5절에서는 성능과 에너지 소모를 모의실험을 사용하여 분석한 결과를 제시한다. 마지막으로 6절에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

감지와 통신에서 소모되는 에너지를 최소화해서 무선 센서 망을 지속적으로 운용하기 위해서, 위상 제어 기법들, 다시 말해 에너지 절약 스케줄링 메커니즘들이 많이 제안되어 왔다^{[1],[2]}. 이러한 메커니즘을 사용하는 센서 망이 다양한 응용에 적합한 품질의 감지를 제공하기 위해서는 요구되는 망의 감지도(Sensing Coverage)와 연결성(Connectivity)을 동시에 제공하여야만 한다는 사실이 최근에 중요하게 대두되었다^{[2],[5],[7],[8]}.

Zhang은 무선 통신 영역의 반경이 감지 영역 반경의 적어도 2배인 경우에 1-감지는 1-연결을 함의한다는 사실을 증명하고, 이를 기반으로 1-감지와

1-연결을 보장하는 센서 망을 구성하는 Optimal Geographic Density Control (OGDC) 프로토콜을 제안하였다^{3,4)}. OGDC는 동작하는 센서들 사이의 중복된 영역을 가능한 최소화한다. 센서는 기존에 동작하는 센서들 사이에 중복하여 감지되는 영역을 최소화할 수 있고, 동작하는 두 센서들 사이의 교점을 감지할 수 있는 경우에 동작된다. 센서는 자신의 위치와 동작하는 센서들의 위치들을 사용하여 이러한 조건이 만족되는지 여부를 판별한다. 따라서, OGDC는 정확한 위치정보가 필요하다. 또한 모든 센서들이 동시에 프로토콜을 동작시키기 위해서 시간을 동기화하는 것이 필요하다.

Wang은 Coverage Configuration Protocol (CCP) 라고 불리는 감지도와 연결을 통합적으로 다루어 위상을 구성하는 프로토콜을 제안하였다²⁾. Wang은 무선 통신 영역의 반경이 감지 영역 반경의 적어도 2배인 경우에 k -감지는 k -연결을 함의한다는 정리를 유도하고, 이를 기반으로 CCP를 제안했다. CCP는 무선 통신 영역의 반경이 감지 영역 반경의 2배 미만인 경우에 k 개의 연결을 보장할 수 없기 때문에, 연결을 유지하며 위상을 구성하는 대표적인 프로토콜인 SPAN¹²⁾과 결합하여 두 가지 목적들을 모두 달성하는 프로토콜을 추가적으로 만들었다. 그러나, SPAN은 특정한 연결 개수를 유지할 수는 없다. CCP는 감지도를 계산하기 위해 정확한 지역 정보가 필요하다. 또한 k -감지를 위해서 $2k$ 의 내부 연결 수를 가지게 된다²⁾. 따라서, 통신을 위해 요구되는 에너지가 센서의 동작에 필요한 에너지의 10배 정도인 상황에서¹³⁾, CCP는 센서 망의 운용에 상대적으로 많은 에너지를 소모할 가능성이 있다.

Cerpa는 높은 밀도를 가진 센서 망에서, 다시 말해 전체 센서들의 수가 동작하는 센서들의 수의 적어도 10배인 밀도높은 센서 망¹¹⁾에서, 특정 데이터 전달율 (Delivery Ratio)를 유지하기 위해서, 연결수를 조정하며 망의 위상을 구성하는 Adaptive Self-Configuring Sensor Network Topologies (ASCENT) 프로토콜을 제안하였다¹⁴⁾. 센서들은 그들의 연결수와 데이터 손실율을 측정하고, 그들의 이웃 노드들을 구동한다. ASCENT는 노드들의 정확한 위치 정보를 필요로 하지 않는다. 하지만, 연결수를 보장하지 못한다.

제안된 위상 제어 프로토콜은, 앞서 언급한 방법들과는 달리, k 개 이상의 감지를 보장하기 위해서 정확한 위치 정보를 사용하지 않으며, 감지 범위의 반지름이 통신 범위의 반지름의 두 배 이상인 경우

에, k -연결이 제공되면 ($k+1$)-감지를 보장하는 새로운 알고리즘이다. 또한, 5장의 모의실험에서 보이게 되는 바와 같이, 망에 대한 노드의 밀도가 19.5인 경우에, 패킷의 전달 지연시간을 SPAN 보다 33.7%를 줄일 수 있다.

III. 연결과 감지범위와의 관계

본 절에서는 감지 범위의 반지름이 무선 전달 범위의 반지름의 두 배인 조건이 연결이 감지범위를 함의하는 필요 충분 조건임을 유도한다. 여기서, 우리는 전체 감지 영역이 볼록 (Convex) 집합임을 가정하고, 감지 범위는 r_s 로 표기하고, 무선 통신 범위는 r_t 로 표기한다.

정 리 1: 감지 범위가 무선 통신 범위의 적어도 두 배라는 조건은 k -연결이 ($k+1$)-감지를 함의하는 필요충분조건이다.

증 명: $r_s \geq 2r_t$ 가 충분조건이라는 사실은 다음과 같이 간단하게 증명된다. $r_s \geq 2r_t$ 이면 r_t 의 영역은 자신의 센서에 의해서 감지되면서, 이 노드와 연결되어 있는 모든 노드들의 센서들에 의해서 감지 된다. 따라서, k 개의 연결들이 있는 경우에 $k+1$ 개의 센서에 의해서 감지된다.

이제 $r_s \geq 2r_t$ 가 필요조건이라는 사실을 증명하자. k 개의 연결이 있으면 $k+1$ 개의 센서들에 의해서 감지된다는 명제는 $r_s \geq 2r_t$ 를 함의한다는 명제를 그것의 대우(Contraposition) 명제를 증명하여 증명하자. 증명하려는 명제의 대우명제는 $r_s < 2r_t$ 이면, k 개의 연결이 있다는 것이 $k+1$ 개의 센서들에 의해서 감지됨을 함의하지 않는다 이다.

유한한 영역이 $k+1$ 개의 센서들에 의해서 감지된다는 것은 감지 영역 안에 존재하는 모든 점들이 $k+1$ 개의 센서들에 의해서 감지된다는 것을 의미한다. 먼저 어떤 한 노드 S 가 k 개의 연결들을 가지고 있다고 가정하자. 그리고, S 와 연결을 가진 한 노드 D 가 S 를 중심으로 하고 반지름이 r_t 인 원 위에 존재한다고 가정하자. 이 경우에, $|\overline{SD}| = r_t$ 이므로, $2|\overline{SD}| = 2r_t$ 이다. 그런데 $r_s < 2r_t$ 이라면, $r_s < 2|\overline{SD}|$ 이다. 다시말해, 노드 S 를 중심으로 하고 반지름이 r_t 인 원의 영역 중에서 노드 D 를 중심으로 반지름이 $2|\overline{SD}|$ 보다 작은 r_s 인 영역과 겹치는 부분만이 노드 D 로 부터 감지되고, 나머지 부분은 감지되지 않는다. 노드 S 를 중심점으로 하고 r_t 를 반지름으로

하는 원의 영역 중에서 노드 D에 의해서 감지되지 않는 부분이 존재하므로, 노드 S의 그 영역은 k 개의 연결들을 가지더라도, 노드 D와 같은 노드들이 여러 개가 존재한다면, $k+1$ 개의 센서들에 의해서 감지되는 대신, k 개의 연결을 가질 때 감지될 수 있는 최대 수인 $k+1$ 에서 D 노드와 같은 센서들의 개수를 뺀 수만큼의 센서들에 의해서 감지될 것이다. 따라서, $r_s < 2r_t$ 이면, k 개의 연결이 있다는 것이 $k+1$ 개의 센서들에 의해서 감지됨을 함의하지 않는다는 것을 증명하였다. 결과적으로, k 개의 연결이 있으면 $k+1$ 개의 센서들에 의해서 감지된다는 것은 $r_s \geq 2r_t$ 임을 함의한다는 것을 증명하였다. 그러므로, $r_s \geq 2r_t$ 가 필요조건이라는 사실을 증명하였다. ■

그런데, 목표 감지 영역 A의 가장 자리에 있는 센서들과 안쪽에 있는 센서들의 연결 정도는 본질적으로 다르다. 다음에서 이러한 사실을 정리하겠다.

정 의 1: 먼저 불록한 목표 감지 영역 A의 변과 자신의 무선 통신 범위가 되는 원과 교점이 있는 센서들을 경계지역 센서라고 정의하자. 그러면, 모든 경계지역 센서들은 영역 A의 변으로부터 r_t 만큼 떨어진 거리 안의 부분 영역에 존재한다. 경계지역 센서들이 존재하는 이러한 부분 영역을 경계 영역이라고 하자. 감지 영역 A중에서 경계 영역을 제외한 부분 영역을 내부 영역이라고 하자. 내부 영역 안에 존재하는 모든 점들을 내부 점이라고 하고, 외부 영역에 존재하는 모든 점들을 외부 점이라고 하자. 영역 A의 내부 영역에 존재하는 나머지 센서들은 내부 센서라고 정의하자. ■

정 리 2: 목표 감지 영역 A 안에 k 개의 연결들을 가지는 내부 센서들이 균일하게 설치된 경우, 모든 경계지역 센서는 내부 센서들과 평균 $k/2$ 개의 연결을 가진다.

증 명: 센서 각각이 k 개의 연결들을 가지는 내부 센서들의 집합 I가 경계지역 센서들의 집합 B와 연결들을 가지고 있다고 하자. 불록한 목표 감지 영역 A의 평면에 센서 노드들이 균일하게 분포되어 있기 때문에, 집합 I중에서 집합 B와 직접 연결된 노드들은, 평균적으로 연결의 절반은 집합 I의 노드들과 연결되고, 나머지 절반은 집합 B와 연결된다. 따라서, 평균적으로 집합 B의 노드들은 각각 $k/2$ 개의 연결들을 집합 I의 노드들과 가진다. ■

직관적으로 보면, 경계지역 센서들은 망의 전체 연결 정도를 결정한다²¹. 그런데, 대규모 센서망에서, 대부분의 센서들을 차지하는 내부 센서들은 일반적으로 많은 트래픽을 전달하고, 따라서 더 많은 연결들을 제공해야 한다²¹.

따름 정리 1: 불록한 목표 감지 영역 A의 경계선으로부터 무선 통신 범위가 되는 원의 반지름 r_t 만큼 떨어진 거리 안에 있는 감지 영역 A의 외부의 영역에 센서들을 추가적으로 설치하면, k -연결 위상 제어 알고리즘을 사용하여, 확장 이전의 목표 감지 영역 A의 모든 노드들에 대해서 k -연결과 $(k+1)$ -감지를 제공할 수 있다.

증 명: 불록한 목표 감지 영역 A의 변으로부터 무선 통신 범위가 되는 원의 반지름 r_t 만큼 떨어진 거리 안에 존재하는 외부 영역에 목표 감지 영역에 배치된 센서 노드들과 동일한 밀도로 센서들을 추가적으로 설치하여 목표 감지 영역 A'을 구성하자. 그런데, 목표 감지영역 A의 내부 센서들에게 k -연결과 $(k+1)$ -감지도를 제공하는 프로토콜은 목표 감지영역 A'의 내부 센서들에게 k -연결과 $(k+1)$ -감지도를 제공할 수 있다. 따라서, 이렇게 센서 노드들의 추가로 설치하면, k -연결 위상 제어 프로토콜을 사용하여, 확장 이전의 목표 감지 영역 전체에 k -연결과 $(k+1)$ -감지도를 보장할 수 있다. ■

IV. k -연결을 보장하는 위상제어 알고리즘

본 절에서는 범위의 반지름이 무선 전달 범위의 반지름의 두 배인 경우에 k 개 이상의 연결을 가지는 내부 센서들로 망을 구성하며, 감지 영역 내의 모든 내부 점들이 $k+1$ 개 이상의 센서들에 의해서 감지되는 위상을 구성하는 분산 알고리즘을 제시한다. 이 알고리즘으로 구성된 위상의 경계 센서들은 $k/2$ 개의 연결을 가진다. 따라서, 경계 지역의 점들은 $(k/2)+1$ 개의 센서에 의해서 감지된다. 기존의 가능한 최소의 연결을 제공하는 위상제어 프로토콜¹⁵⁾을 수정하여 이 프로토콜을 만들었다.

제안된 프로토콜은 응용에서 요구되는 품질의 서비스를 제공하기에 충분한 망을 구성하며, 다시말해 요구되는 감지도 (Sensing Coverage)와 망 연결 (Network Connectivity)을 제공하는 센서 망의 위상을 구성하며, 동시에 활동하는 노드들의 수를 가능한 최소로 만들도록 한다. 다시 말해, 앞 절에서 제

시한 정리 1에 의해, 감지 범위의 반지름이 무선 통신 범위의 두 배 이상일 경우에 k 개의 연결수가 $k+1$ 개의 감지를 보장한다. 제안된 프로토콜은 가능한 최소의 개수의 k 개의 연결들을 가지는 활동하는 노드들로써 센서 망을 구성하기 위한 목적함수를 가진다.

먼저 가능한 최소의 개수의 활동하는 노드들만으로 센서 망을 구성하기 위해, (최소의 연결을 제공하는 위상제어 프로토콜^[15]과 같은 방법을 사용하여,) 한 노드가 깨어 있을 경우에 얼마나 많은 이웃 센서들이 에너지 절약 모드로 들어갈 수 있는지를 다음과 같은 볼츠만 요소인 부 목적함수를 사용하여 표현할 수 있다.

$$p[u_i = r] = c_0 \cdot e^{-w_0 \cdot r} \quad (1)$$

여기서 $u_i = 1 - C_i / (\frac{E_i}{2})$ 이고, E_i 는 노드 i 의 이웃 센서들의 갯수이고, C_i 는 노드 i 가 활동하면 (i 를 통해 연결되어) 에너지 절약 모드로 들어갈 수 있는 노드들의 개수를 연결 개수로 정규화한 값이다. u_i 는 노드 i 의 기여도에 반비례한다. 그리고, w_0 와 c_0 는 정규화 상수이고, $w_0=10$, $c_0=0.1$ 이다.

다음으로 k -연결을 제공하는 센서 망을 구성하기 위해, 한 노드가 깨어 있을 경우에 활동 중인 이웃 노드들과 k 개 이상의 연결들을 만들 수 있는지를 표현하는 다음과 같은 볼츠만 요소인 부목적함수를 정의한다.

$$p[u'_j = d] = c_1 \cdot e^{-d} \quad (2)$$

여기서 $u'_j = \begin{cases} u_j - k & \text{if } u_j \geq k \\ u_j - c_2 \cdot k & \text{otherwise} \end{cases}$ 이다.

$u_j \geq k$ 경우에, u'_j 은 노드 j 의 차수 u_j 와 k 와의 차이이다. c_1 는 정규화를 위한 상수이고, $c_1=0.1$ 이다. $u_j < k$ 경우에, u'_j 은 다른 경우에 비해 큰 값을 가지도록 만들었는데, 이는 결과적으로 $p[u'_j]$ 를 작은 값으로 만들어, 식 (4)에 의해서 해당 노드가 활동을 하지 않도록 만든다. 결국 c_2 차수가 k 보다 작은 경우에 해당 노드의 활동을 배제하기 위해 사용하는 큰 수이다. 여기서는 10을 사용한다.

마지막으로 주변 이웃에 활동노드들에 의해서 제공되는 연결 개수가 k 개 보다 적은 경우에 자신을 활동노드로 만들기 위한 부 목적함수를 정의한다.

$$p[u'_i = s] = c_2 \cdot e^{-s}, \quad (3)$$

$u'_i = \text{MAX}(u_m - k)$ for $\forall m \in \{x|x \text{는 노드 } i \text{의 이웃 활동노드}\}$

u'_i 은 k 와 노드 i 에 직접 연결된 활동노드 m 의 차수 u_m 와의 차이의 최대값이다. c_2 는 정규화를 위한 상수이고, $c_2=0.1$ 을 사용한다.

세개의 요소들을 곱하여, 식 (1)과 식 (2) 그리고 식 (3)에 의해서 표현된 3개의 목표들을 결합시킨 목적 함수를 만들 수 있다. 결국, 우리는 다음과 같이 백-오프 (Back-off) 지연시간을 정의한다.

$$\text{delay}_0 = \frac{1}{p[u_i] \times p[u_j] \times p[u'_i]} \times RTT \quad (4)$$

여기서 RTT 는 왕복 지연시간 (Round trip time)을 나타낸다.

여기에 추가하여, 에너지 소모가 특정 문턱치를 넘으면, 활동하는 노드로 선정되지 않도록, (최소의 연결을 제공하는 위상제어 프로토콜^[15]과 동일하게,) 다음의 부목적 함수를 추가로 정의하여 사용한다. 일반적으로 전지 용량의 약 80%를 다 써버릴 때까지 정상적인 전압을 공급한다^[16]. 따라서, 문턱치를 표현하는 함수를 다음과 같이 만들 수 있다.

$$E = \frac{e^{(w_1 \cdot (E_u - 0.8))}}{1 + e^{(w_1 \cdot (E_u - 0.8))}} \cdot \text{MAX}_{i,j} \left\{ \frac{1}{p[u_i] \times p[u_j] \times p[u'_i]} \right\} \quad (5)$$

$$E_u = 1 - \frac{E_r}{E_m}$$

여기서 E_u 는 최초의 에너지 량에 대한 사용된 에너지 량의 비율이다.

그리고, 식 (5)의 마지막 항은 일종의 최대치 222,000이고, w_1 은 에너지의 소비가 0.8인 점의 곡선의 변화율을 나타내는 상수이다. 모의실험에서 사용된 이 상수의 값은 1,000 이다.

이제 지연시간 delay_0 을 구하는 식에 이 항을 추가하여, 소비된 에너지의 양을 고려한, 지연시간 delay_1 을 다음과 같이 만들 수 있다.

$$\text{delay}_1 = \left(\frac{1}{p[u_i] \times p[u_j] \times p[u'_i]} + E \right) \times RTT \quad (6)$$

그런데, 많은 노드들이, 이 지연시간 $delay_1$ 후에, 자신들을 후보들로 공지하는 경우에, 통신 매체의 간섭으로 인해서, 모든 노드들이 동시에 활동 중인 노드의 부재를 발견하고, 활동을 시작할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, 다음과 같이 임의의 수를 사용하여, 백-오프 시간에 임의성을 부여한다.

$$delay_2 = \left(\frac{1}{p[u_i] \times p[u_j] \times p[u'_i]} + E + R \right) \times RTT \quad (7)$$

R은 [0, 0.01] 구간의 임의의 수이다.

그림 1에 보여진 제안된 프로토콜에 따르는 각 노드는 식 (1)부터 식 (6)까지를 모두 인자으로써 포함한 식 (7)를 사용하여 백-오프 지연시간을 계산하고, 이 지연시간 후에 활동노드로써 자신을 공지하는 HELLO 메시지를 발송 하게 된다. 그리고, HELLO 메시지를 보낸 노드들은 활동 노드로써, 데이터 패킷을 전달 하게 된다. 백-오프 시간 이전에 HELLO 메시지를 받은 비 활동 노드는 잠들게 된다. 제안된 프로토콜은 식 (7)에 의해서 백-오프 지연시간을 계산하는 것을 제외하고는 기존의 에너지 절약 스케줄링 메커니즘들^[12]과 거의 유사하다.

HELLO 메시지는 노드 자신이 의존하는 활동노드 그리고 노드의 이웃들에 관한 정보를 담고 있다. 전역적인 정보교환이 없는 이러한 분산 알고리즘의 시간 복잡성은 $O(1)$ 임은 간단히 알 수 있다. HELLO 메시지와 상태들은 이전에 만들어진 무선

애드혹 망의 경로설정 규약들^[12,15]의 그것에 거의 유사하다. 이것은 또한 IGMP 와 같은 멀티캐스팅 프로토콜에서 상실된 패킷들의 중복되는 재전송을 피하기 위해서 사용된 나누어 뿌리기 (slotting-and-damping) 방법을 원용한 것이다.

충분한 연결들을 제공하는 활동노드를 발견할 수 없었던 노드 (식 (2)을 사용) 또는 주변의 활동노드들이 충분한 연결을 제공하지 못하는 경우 (식 (3)을 사용)에 노드는 자신이 활동노드가 될 것을 선언하고, 활동을 시작한다. 따라서, 제안된 프로토콜은 k 개의 연결들과 k+1 개의 감지를 제공한다. 그리고, 공지 메시지 사이에 전송 망의 연결성이 잠시 손실되는 것을 방지하기 위하여, 노드는 활동 중지를 선언한 후에 짧은 시간 동안에 계속해서 활동노드로서 봉사한다. 그림 2에서는 제안된 프로토콜 (k=5인 경우)을 사용하여 구성된 망의 예를 보여 준다.

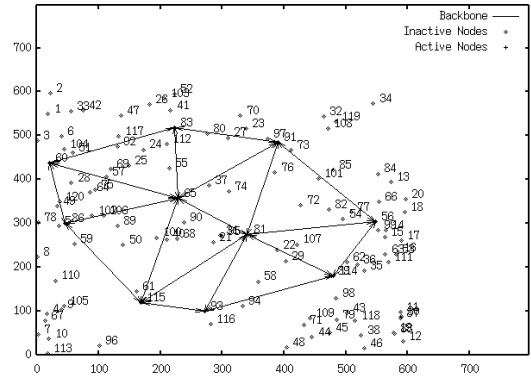


그림 2. 100개의 노드들이 600 m x 600 m 의 영역에 임의로 분포된 경우, 제안한 방법으로 구성된 센서 망의 내부 노드의 연결이 5인 위상

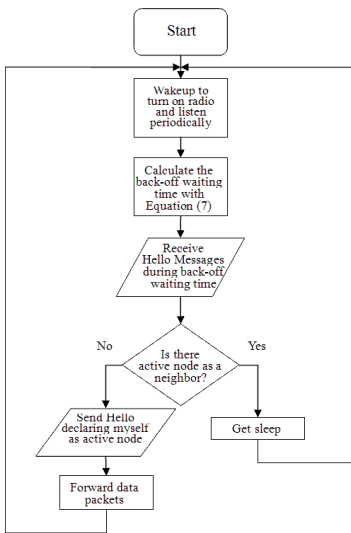


그림 1. 제안한 위상 제어 프로토콜

V. 성능 및 에너지소비 평가

이절에서는 모의실험을 사용하여 제안한 프로토콜의 성능과 에너지 소비율을 분석한다. 망의 밀도를 변화시켜가며 망을 구성하고, 다른 프로토콜들을 사용하여 구성한 망들과 비교한다.

우리는 NS-2를 사용하여 만들어진 SPAN의 모의 실험기를 수정해서 모의실험기를 만들었다. 본 절에서, 우리는 제안된 방법의 성능과 에너지 소비를 SPAN^[12], MORCDS^[15], 802.11 MAC PSM과 PSM이 없는 802.11의 그것들과 비교한다. 우리는 정량적인 비교를 위해, 다음과 같이, 실험 모형을 SPAN의 그것과 거의 동일하게 만들었다. 노드들의 다양

한 밀도에 대해서 제안된 방법을 평가하기 위해, 우리는 다양한 크기들의 정방형 영역에 120 개의 노드들이 임의로 설치된 무선 망들에 대해서 모의실험을 수행한다.

이 실험에서, 노드의 대역폭은 2Mbps 이고, 노드의 무선 영역은 250 미터 반경 이다. 전체 노드들 중 20개의 노드들이 패킷들을 보내고 받는다. 이들의 각각은 다른 노드들에게 6kbps의 고정 비트 비율의 트래픽을 보내고, 각 CBR 흐름은 128 바이트 패킷들로 구성된다.

각 패킷들이 목적지 노드에 여러 홉들을 거쳐서 도달하게 만들기 위해, 10 개의 원천지와 10 개의 목적지 노드들이, 모의 실험되는 영역의 왼쪽과 오른쪽에 위치한다, 2개의 50 미터 넓이의 목표 감지 영역 A의 전체 높이를 한 변으로 가진 직사각형의 영역들 각각에 임의로 균일하게 위치한다. 그리고, 원천지의 노드들은 반드시 다른 영역의 목적지 노드들로 패킷들을 보낸다. 나머지 100개의 노드들의 초기 위치들은 모의실험 영역 안에서 임의로 균일하게 분포된다. 그러므로, 모의 실험 영역의 면적의 제곱근과 각 패킷에 의해서 요구되는 홉들의 수는 근사적으로 비례한다.

각 모의 실험을 위해 600 초의 모의 실험 시간을 사용한다. 패킷의 전달과정과 손실 모형은 MORCDS와 동일하다^[15]. 우리는 임의로 선택한 서로 다른 5개의 시나리오들을 사용하여, 총 5번의 모의실험들을 하고, 그 결과들을 평균하여 본 절에서 제시한다. 우리는 하나의 무선 영역, 즉 250²π 정방 미터 영역에, 존재하는 원천지와 목적지가 아닌 노드들의 수로 노드의 밀도를 정의 한다.

제안된 프로토콜과 SPAN^[12], MORCDS^[15], 802.11 PSM, 802.11의 정량적인 비교를 위해서, 각 원천지 노드가 일정한 비트율 흐름인 6 Kbps인 부하를 발생시킬 경우의 패킷손실율과 전달 지연, 그리고 에너지 소모율을 제시한다. 노드의 밀도를 변화시키기 위해, 우리는 모의 실험 영역의 면적을 변화시켜가며 실험한다.

그림 3에 보인 바와 같이, 무선 센서 망이 상대적으로 밀집한 밀도 19.6 이상 (다시 말해, 변의 길이 1000 미터 이하)인 경우에, 제안된 프로토콜 (FTWSN)로 구성된 위상의 패킷손실율은 802.11에 근접한다. 특히 밀도 19.6인 경우에 SPAN^[2,12]의 패킷손실율의 56.9%에 불과하다. 다시말해 SPAN에 비해 손실율을 43.1% 줄였다. 이는 MORCDS의 패킷손실율의 63.2%에 불과하다.

그림 4에 보인 바와 같이, 제안된 프로토콜로 구성된 위상의 전송 지연시간은 상대적으로 밀집한 밀도 19.6 이상 (다시 말해, 변의 길이 1000 미터 이하)인 경우에 802.11에 근접한다. 특히 밀도 19.6인 경우에 801.11의 1.13배 밖에 되지 않는다. 이 경우는 SPAN의 지연시간의 66.3%에 불과하고, 이는 지연시간을 33.7% 줄였다는 것을 뜻한다. 또한 MORCDS의 지연시간의 72.2%에 불과하다.

그림 5에서 보인 바와 같이, 망의 밀도가 54.5인 경우에, MORCDS의 에너지 소비보다는 5.5% 더 많으나, SPAN의 에너지 소비보다 17.9% 더 적

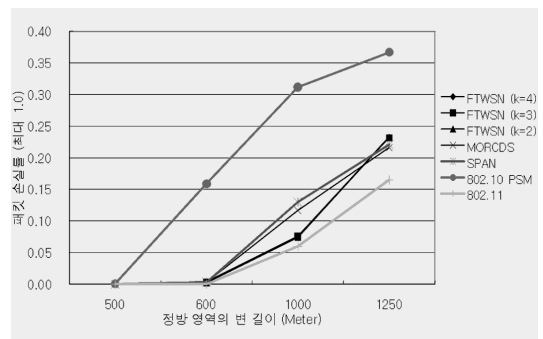


그림 3. 노드들의 다양한 밀도들에 따른 패킷손실율

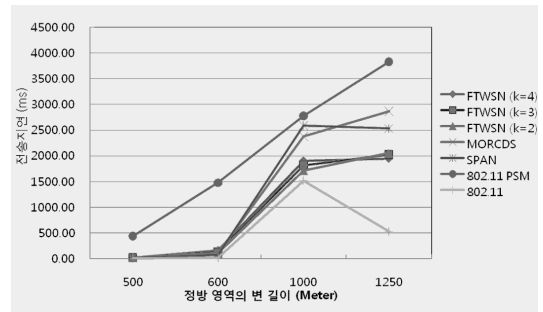


그림 4. 노드들의 다양한 밀도에 따른 전송 지연

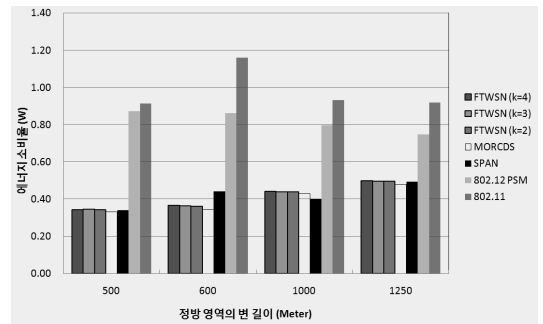


그림 5. 노드들의 다양한 밀도에 따른 에너지 소비율

다. 전반적으로 SPAN과 MORCDS와 거의 비슷한 에너지 소비율을 보이고 있다. 제안된 프로토콜이 SPAN과 MORCDS과 비교해 비슷한 에너지 소비율을 보이며, 전송 지연시간이 802.11의 그것에 더 근접하고 있는 사실은 주목할 만 하다.

VI. 결 론

본 논문에서는, 감지 범위의 반지름이 무선 전달 범위의 반지름의 두 배인 경우에 k 개 이상의 연결을 가지는 내부 센서들로 망을 구성하며, 감지 영역 내의 모든 내부 점들이 $k+1$ 개 이상의 센서들에 의해서 감지되는 위상을 구성하는 새로운 에너지 효율적인 고장 감내 분산 위상 제어 알고리즘을 제시한다. 제안된 프로토콜은 응용들에 적합하게 수용될 수 있는 충분한 망 연결과 감지도를 제공하는 센서 망의 위상을 구성하며, 동시에 활동하는 노드들의 수를 가능한 최소로 만든다.

우리는 감지 범위의 반지름이 무선 전달 범위의 반지름의 두 배인 조건이 연결이 감지범위를 함의하는 필요충분조건임을 증명하였다. 이로써 감지 범위의 반지름이 무선 전달 범위의 반지름의 두 배인 센서 노드들을 사용하는 경우에, 제안된 프로토콜이 k 개 이상의 연결을 가지는 내부 노드들로 망을 구성하며, 동시에 감지 영역 내의 모든 내부 점들이 $k+1$ 개 이상의 센서들에 의해서 감지되는 위상을 구성함을 보였다.

또한, 목표 감지 영역 A의 가장 자리에 있는 센서들과 안쪽에 있는 센서들의 연결 정도는 본질적으로 다름을 보였다. 다시 말해, 목표 감지 영역 A의 내부 센서들이 k 개의 연결들을 가질 경우에 경계 센서들은 $k/2$ 개의 연결을 가지고, 감지 범위의 반지름이 무선 통신 범위의 반지름의 2배인 경우에, 경계 지역의 점들은 $(k/2)+1$ 개의 센서에 의해서 감지된다는 사실을 보였다. 따라서, 목표 감지 영역의 경계선으로부터 무선 통신 범위의 반지름만큼 떨어진 거리 안쪽에 있는 외부 영역에 센서들을 추가적으로 설치하면, 제안한 프로토콜은 확장 이전의 목표 감지 영역의 모든 점들에 대해서 k -연결과 $(k+1)$ -감지를 제공함을 보였다.

제안한 방법으로 구성된 망의 성능과 에너지 효율을 기존의 다른 방법들로 구성된 망의 위상들의 그것들과 정량적으로 비교하기 위해, 우리는 수정된 NS-2 망 모의실험기를 사용하여, 망을 구성하는 노

드들의 밀도를 변화시켜가며, 위상들을 구성하는 모의 실험을 하였다. 제안된 프로토콜로 구성된 위상의 패킷손실율은 상대적으로 밀집한 밀도 19.6 이상인 경우에 802.11의 그것에 근접한다. 특히 밀도 19.6인 경우에, 다시 말해 변의 길이 1000 미터인 경우에, 대표적인 연결 유지 위상제어 프로토콜인 SPAN의 패킷손실율의 56.9%에 불과하고, MORCDS의 그것의 63.2%에 불과하다. 제안된 프로토콜로 구성된 위상의 전송 지연시간도 상대적으로 밀집한 밀도 19.6 이상인 경우에 802.11의 그것에 근접한다. 특히 밀도 19.6인 경우에 801.11의 전송 지연시간의 1.13배 밖에 되지 않는다. 이 경우에 SPAN의 지연시간의 66.3%에 불과하고, MORCDS의 지연시간의 72.2%에 불과하다.

망의 밀도가 54.5 인 경우에, MORCDS의 에너지 소비보다는 5.5% 더 많으나, SPAN의 에너지 소비보다 17.9% 더 적다. 제안된 프로토콜은 전반적으로 SPAN과 MORCDS와 거의 비슷한 에너지 소비율을 보이고 있다. 제안된 프로토콜은 연결성과 감지도를 유지하기 위해, 지리 정보를 사용하지 않기 때문에 적은 비용으로 사용이 가능하여 실용적이다.

참 고 문 헌

- [1] L. Wang and Y. Xiao, "A survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks," *Mob. Netw. Appl.*, Vol. 11, No. 5, pp. 723-740, 2006.
- [2] X. Wang, G. Xing, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, and C. Gill, "Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks," *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys '03)*, pp. 28-39, 2003.
- [3] H. Zhang and J. C. Hou, "Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks," *Proceedings of NSF International Workshop on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks*, 2004.
- [4] H. Zhang and J. C. Hou, "Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks," *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, Vol.1, pp.89-124, 2005.

- [5] H. M. Ammari, and S. K. Das, "Fault tolerance measures for large-scale wireless sensor networks," *ACM Trans. Auton. Adapt. Syst.*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-28, 2009.
- [6] N. Li, J. C. Hou, "Localized Fault-Tolerant Topology Control in Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 307-320, 2006.
- [7] C.-F. Huang and Y.-C. Tseng, "The coverage problem in a wireless sensor network," *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA '03)*, pp. 115-121, 2003.
- [8] C.-F. Huang and Y.-C. Tseng, "The coverage problem in a wireless sensor network," *ACM Mobile Networks and Applications (MONET), special issue on Wireless Sensor Networks*, Vol. 10, No. 4, pp. 519-528, 2005.
- [9] M. Lu, J. Wu, M. Cardei, and M. Li, "Energy-efficient connected coverage of discrete targets in wireless sensor networks," *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, Vol. 4, No.3/4, pp. 137-147, 2009.
- [10] P.R. Scheeper, B. Nordstrand, J.O. Gullov, B. Liu, T. Clausen, L. Midjord, and T. Storgaard-Larsen, "A new measurement microphone based on MEMS technology," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 12, No. 6, pp. 880-891, 2003.
- [11] R.F. Wolffenbuttel, "State-of-the-art in integrated optical microspectrometers," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 53, No.1, pp. 197-202, 2004.
- [12] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris, "Span: an energyefficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks," *Wireless Networks*, Vol. 8, No. 5, pp. 481-494, 2002.
- [13] V. Shnayder, M. Hempstead, B. Chen, G. W. Allen, and M. Welsh, "Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications," *Proceedings of the 2nd international Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '04)*, ACM, New York, NY, pp. 188-200, 2004.
- [14] A. Cerpa and D. Estrin, "Ascent: Adaptive self-configuring sensor networks topologies," *Proceedings of IEEE INFOCOM 2002*, New York, NY, June 2002.
- [15] Jae-Hyun Park, "Distributed construction of the multiple-ring topology of the connected dominating set for the mobile ad hoc networks: Boltzmann machine approach," *Journal of KISS: Information Networking*, Vol. 34, No. 3, pp. 226-238, 2007 (In Korean).
- [16] Duracell, (1998) "Performance characteristics," [On-Line]. Available: www.duracell.com/oem/primary/lithium/performance.asp.

박재현 (Jae-Hyun Park)

정회원



1988년 2월 중앙대학교 전자계산학과 졸업

1991년 2월 한국과학기술원 전산학과 석사

1995년 8월 한국과학기술원 전산학과 박사

1995년 8월~2000년 2월 삼성전자 정보통신본부 데이터네트워크개발팀 MPLS/ATM 개발

2000년3월~2002년8월 영남대학교 전자정보공학부 정보통신전공 교수

2002년9월~현재 중앙대학교 컴퓨터공학부 교수, 중앙대학교 정보대학원 컴퓨터소프트웨어학과 교수

<관심 분야> ATM Switch Arch., Multiprotocol Label Switching System, Routing Protocols, Ad Hoc Networking, Peer-to-Peer Networking, Grid Computing.