

# 위치 인식 노드 클러스터 기반 무선 센서 네트워크의 결함 허용 기법

박수용, 김성수  
아주대학교 정보통신전문대학원  
e-mail: {cslab03, sskim}@ajou.ac.kr

## Geography-aware Node Clustering in Wireless Sensor Network with Fault Tolerance Method

Suyong Park, Sungsoo Kim  
Graduate School of Information and Communication, Ajou University

### 요 약

무선 센서 네트워크는 컴퓨팅 용량 및 전력 자원이 매우 제약적인 특징을 가지고 있으며, 이로 인하여 동작시 실패하려는 경향(Error-prone)을 지닌다. 이를 해결하기 위하여 센서 네트워크에 적용 가능한 결함 허용 기법이 요구되며, 현재 노드의 참가(Join), 삭제(Delete), 사망(Death) 및 상태 오염(State Corruption)으로 인하여 발생하는 결함을 처리하기 위하여 노드의 물리적 위치를 기반으로 클러스터를 구성한 후 발생 결함을 지역화하여 처리하는 기법이 제안되었다[1]. 본 논문에서는 결함을 처리하기 위한 기존의 위치 인식 노드 클러스터 시스템에서 발생할 수 있는 헤드 노드의 결함을 효율적으로 처리하기 위한 개선된 기법을 제안하여 전체 센서 네트워크 시스템의 실질적인 가용도(Availability)를 높이고자 하며, 이를 위한 간단한 분석을 수행한 후 효용성을 검증한다.

### 1. 서론

임베디드 기술과 무선 네트워크 기술의 발전은 주위 환경에 대한 감지 및 근거리 데이터 전송이 가능한 저비용, 저전력, 초소형의 센서 노드의 개발을 가능하게 하고 있다. 일반적으로 센서 노드들은 센서, 데이터 프로세서 및 통신용 모듈로 이루어지며, 현재 기술 수준에서는 노드 크기와 계산 능력, 가용 메모리 및 배터리 용량 등에서 큰 제약을 가진다. 센서 네트워크는 RFID 기술과 더불어 차세대 유비쿼터스 환경에서 주위 환경에 대한 컨텍스트 정보 수집 및 활용을 위한 하부구조로서의 핵심적인 역할을 수행할 것으로 보인다[2].

1950년대부터 기존 컴퓨터 및 통신 시스템의 신뢰성 향상을 위한 결함 허용 기법들이 연구되어 왔

으며 이와 관련하여 학계 및 산업계에서 많은 성과를 이루어 왔다. 그러나 비교적 새로운 분야인 센서 네트워크에서는 각각의 노드 및 전체 시스템의 신뢰성을 보장하기 위한 관련 연구가 거의 이루어지지 않은 상태이다. 일반적으로 센서 네트워크는 통제가 불가능하거나 가혹한 환경에 배치가 되며 복잡한 구조를 가지기 때문에 현재 센서 네트워크 어플리케이션들은 기본적으로 동작 시에 실패하려는 경향을 가지며, 이러한 경향은 앞으로도 크게 변하지 않을 것으로 예상된다. 기존 네트워크 시스템의 경우처럼 동작 시 발생할 수 있는 다양한 결함에 대처하기 위하여 관리자가 일일이 처리한다는 것은 수백개에서 수백만개의 노드를 가지는 센서 네트워크의 특징상 매우 비현실적이다. 또한 기존 시스템에서 사용되는 대표적인 결함 허용 기법인 이중화(Duplexing), 삼중화(Triplexing) 그리고 n-version 프로그래밍을 적용하기에는 각 센서 노드들의 컴퓨팅 용량 및 전력 자원이 매우 제한적이기 때문에 큰 효용을 가지지 못한다[3]. 그러므로 이러한 문제점을 해결하기 위해

이 논문은 2005년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음  
본 연구는 정보통신부 21세기프론티어연구개발사업의 일환으로 추진되고 있는 유비쿼터스컴퓨팅네트워크원천기술개발사업의 지원에 의한 것임

선 센서 네트워크를 위한 새로운 결함 감지 및 처리 기법이 요구된다.

## 2. 관련 연구 및 문제점

현재 센서 네트워크와 같은 대규모의 분산 시스템에서 결함을 처리하기 위한 이상적인 접근법은 가능한 한 결함의 영향을 전체 시스템으로 전파시키지 않도록 지역화하는 것이다. 이러한 접근법은 경계가 있는(Bounded) 시간 및 공간 구역에서 발생하는 제한된 결함에서부터 특별한 경계가 존재하지 않는 비잔틴 결함(Byzantine Fault)에 이르기까지 적용이 가능하다[4].

그러나 실제 센서 네트워크에서 결함을 지역화하기 위해서는 고려해야 할 사항이 존재한다. 예를 들면 그림 1과 같은 경우를 들 수 있는데, 다중 홉(Multi Hop) 라우팅을 사용하는 센서 네트워크에서 특정 노드에 발생한 결함의 영향이 네트워크의 구성에 따라 인근 노드로 전파되는 경우가 발생할 수 있다. 그림에서 보면 BS(Base Station)에 인접한 노드 1에 결함이 발생하여 정상적으로 데이터 전송을 수행하지 못하게 되고, 이 때문에 노드 1을 통하여 BS에 데이터를 전송하던 노드 2에서 노드 7은 실제로 결함이 발생하지 않았음에도 정상 동작을 수행할 수 없게 된다. 즉 네트워크의 특정 부분의 실패로 인하여 전체 네트워크가 실패할 경우가 존재하게 되며, 이러한 단일 실패 지점의 존재는 결함을 지역화하기 위해선 반드시 해결되어야 한다.

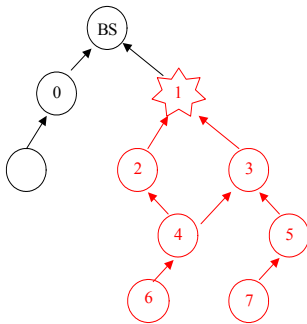


그림 1 단일 실패 지점(Single Point of Failure)의 예

이러한 단일 실패 지점의 존재 가능성을 감소시키고 실제 발생 결함의 영향을 지역화하기 위하여 생각할 수 있는 기법은 각 센서 노드의 클러스터를 구성하는 방식이다. LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[5]와 같은 클러스터 기반 라우팅 기법은 실제 데이터 전송이 BS까지 센싱 노드 간 다중 홉으로 중계(Relay)되지 않고 각 클러스터

의 헤드 노드로 집중하여 이루어지므로 단일 실패 지점이 존재할 확률이 비교적 적다.

그러나 이러한 클러스터 기반의 기법들은 기본적으로 센서 네트워크 시스템의 신뢰성 및 결함 허용을 위한 부분에 초점을 둔 것이 아니기 때문에, 일반적으로 클러스터 헤드에 결함이 발생하는 경우 전체 네트워크의 재구성(Re-clustering)이 수행되기 전까지 해당 클러스터의 노드 전체가 정상적으로 동작할 수 없다는 문제점이 존재한다. 즉 특정 헤드 노드 하나의 결함을 처리하기 위하여 전체 시스템의 재설정이 요구되는 역할 재분담을 하거나 혹은 중복된 하드웨어를 사용한 교체를 수행하여야 한다. 이는 실제 성능상의 심각한 저하를 야기하므로 전체 시스템의 에너지 효율을 위하여 각각의 노드 혹은 클러스터 단계에서 결함을 감지하고 처리하기 위한 알고리즘이 요구된다.

## 3. 위치 인식 노드 클러스터링

H. Zhang에 의해 제안된 GS<sup>3</sup> 알고리즘은 이러한 문제들을 해결하며 센서 네트워크를 위한 새로운 결함 허용 기법을 제시하기 위한 것이다. 이 알고리즘은 기본적으로 센서 네트워크에서 노드의 참가, 삭제, 사망, 이동 및 상태 오염과 같은 다양한 변동(Perturbation)으로 인하여 발생하는 결함을 처리하기 위한 자가 설정(Self-configuration) 및 자가 치유(Self-healing) 특성을 구현하기 위한 것이다. 이를 위하여 그림 2와 같이 실제 노드들의 배치 위치를 이용한 셀 기반 육각 구조(Cellular Hexagonal)의 노드 클러스터를 구성하고, 클러스터 내의 인근 노드들의 정보만을 이용하여 결함을 지역화하여 처리할 수 있다.

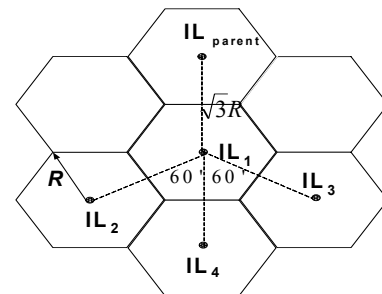


그림 2 셀 기반 육각 구조 노드 클러스터 구성

그림 2에서  $IL_x$ 는 각 클러스터의 이상적인 중심(Ideal Location)으로써 각 클러스터의 헤드 노드가 위치해 있는 특정 범위를 의미한다. 이 범위의 반지름  $R_c$ 가 주어지면  $\pi R_c^2$  내에 존재하는 모든 노드들의

순위가 매겨지며 순위에 따라 클러스터 헤드 H를 선출한다. 클러스터를 구성할 때 논리적인 위치를 사용하는 것이 아니라 실제 노드가 배치된 위치를 사용하기 때문에, 각 클러스터의 셀 반지름을 R로 가정하면 삼각 함수에 따라 각 IL 간의 거리는  $\sqrt{3}$ 으로 주어지며 하위 클러스터의 IL 사이의 각은 60°로 정해진다. 이를 이용하여 실제 네트워크 클러스터를 구성하는 모듈은 표 1과 같으며 생성된 네트워크의 구조는 그림 3과 같다. 네트워크 내 노드의 숫자를 n으로 놓는다면 알고리즘의 시간복잡도는  $\theta(|n-1|)$ 로 주어질 수 있다.

표 1 위치 기반 노드 클러스터 구성 단계

```

ProgramBig_node (Base Station)
var q: {bootup, work}; //node status
/* Big node boots up and organizes the 1-band cells */
q = bootup → HEAD_ORG(0°, 360° R, R/4)
//transit to status work

ProgramSmall_node (Nodes)
var q: {bootup, head, work, associate}; //node status
/* Small nodes boot up, listen to nearby HEAD_ORG */
q = bootup → ASSOCIATE_ORG_RESP
//transit to status head or associate

q = head → HEAD_ORG(-60°-α, +60°+α, R, R/4)
//transit to status work: α = Sin⁻¹(Rt/ 3 R)
[]

q = work → HEAD_ORG_RESP
[]

/* Associates respond to HEAD_ORG */
q = associate → ASSOCIATE_ORG_RESP
//remain status associate
    
```

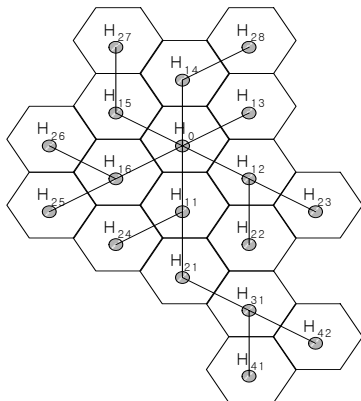


그림 3 위치 인식 노드 클러스터의 연결

4. 클러스터 헤드 결함 감지 및 복구

GS<sup>3</sup> 알고리즘은 각 헤드 노드에 결함이 발생했

을 때 전체 네트워크의 재구성이 아닌 각 클러스터 수준에서 이를 복구할 수 있다. 즉 현재의 헤드 노드인 H<sub>present</sub>에 결함이 발생한 경우 클러스터 구성시에 매겨진  $\pi R_t^2$  내의 가장 높은 후순위 노드가 헤드 노드의 역할을 부여받아 H<sub>new</sub>로써 동작하게 된다. 이러한 방식은 헤드 노드 등의 하드웨어를 중복하거나 전체 시스템을 재구성하는 방식에 비해 비용이 저렴하고 간단하게 구현 가능하며 각 노드에서 발생한 결함의 영향이 셀 외부로 전파되는 것을 막을 수 있다. 이를 도식화하면 그림 4와 같이 표현된다.

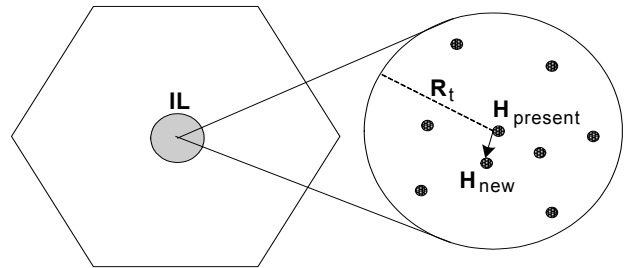


그림 4 헤드 노드 결함 발생시 결함 처리

그러나 이러한 알고리즘은 클러스터 수준의 결함 처리만을 고려하고 있으며, 헤드 노드의 결함을 실시간으로 감지하기 위한 기법은 단순히 BS 수준에서 이루어지는 모니터링에 의존하고 있다. 이는 헤드 노드에 결함이 발생한 특정 클러스터의 센서 노드들의 실시간 회복을 방해하는 요소가 된다. 즉 결함 탐지와 결함 처리 사이의 간격을 특정 상수값으로 보장해주지 못하므로 전체 시스템의 가용성 및 신뢰성을 저하시키는 요인이 된다. 식(1)에서 보듯이 평균고장시간(MTTF, Mean Time To Failure)과 평균유지보수시간(MTTR, Mean Time To Repair)으로 표현되는 가용성(Availability)을 보장하기 위해선 분모의 평균유지보수시간을 감소시키거나 분자의 평균고장시간을 증가시켜야 한다. 일반적으로 평균고장시간을 증가시키는 것은 어려운 문제이므로 평균유지보수시간을 감소시키기 위한 에너지 효율적인 고속의 결함 탐지 및 처리 기법이 요구된다.

$$Availability = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \dots\dots\dots(1)$$

이러한 문제점을 해결하고 각 클러스터별 헤드 노드의 결함 발생을 실시간적으로 감지 및 처리하기 위하여 연결된 헤드 노드간에 Consensus 메커니즘을 적용하는 방안을 고려할 수 있다. 즉 각 헤드 노드 간에 주기적인 상태 업데이트를 수행하고 상태 정보를 각각 테이블에 저장해둠으로써 추후 이를 통

하여 결함 발생 여부를 실시간 체크하게 된다. 이러한 상태 업데이트는 추가적인 통신을 수행하여 얻기 보다는 그림 5와 같이 매 전송 사이클마다 TDMA MAC 프로토콜 상에서 특정 슬롯을 미리 할당하여 사용하는 방식을 사용할 수 있다[6]. 위치 인식 노드 클러스터 기법에서는 각 클러스터 간의 통신이 정해진 헤드 노드 사이에서만 일어나므로 연결된 헤드 노드의 상태를 테이블에 저장하여 관리하는데 추가적인 비용이 발생하지 않는다.

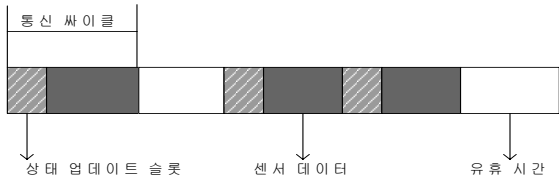


그림 5 헤드 노드간 결함 감지를 위한 슬롯 할당

그림 2와 같은 클러스터가 구성되어 있는 경우 결함 발생에 따른 각 헤드 노드간 연결 모델을 나타내면 그림 6과 같다. 그림에서 각 클러스터의  $\Pi_x$ 에 존재하는 헤드 노드는  $H_x$ 로 나타나며  $H_p$ 는  $\Pi_{parent}$ 의 헤드노드, 양방향 화살표는 각 노드간의 연결을 나타낸다. 그림에서 왼쪽은 결함이 발생하지 않아서 모든 헤드 노드간 연결이 이루어지는 경우이며, 오른쪽은  $H_2, H_3$ 에 결함이 발생하여 노드간 연결이 사라진 경우이다.

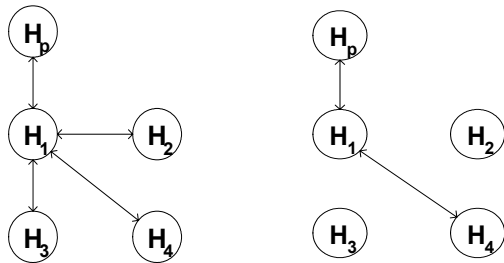


그림 6 결함 발생에 따른 헤드 노드간 연결 모델

**5. 분석 및 성능평가**

그림 6과 같은 헤드 노드간 연결 모델이 임의의 그래프(Random Graph)  $G(n, p)$ 의 성질을 따른다고 가정하면, 이를 적용하여 노드간 연결 확률을 통한 대략적인 시스템의 가용성을 계산해 낼 수 있다. 식 (2),(3)과 같은 임의의 그래프의 공식에서  $n$ 을 그래프 내 노드의 수, 임의의 두 노드가 연결될 확률인  $p$ 를 결함 발생에 따른 노드간 연결 확률로 둔다면 시스템이 요구하는 노드간 연결 확률인  $P_c$ 는 실제 가용도를 나타낸다.

$$P_c = \lim Pr [G(n, p) \text{ is connected}] \dots \dots \dots (2)$$

$$p = \frac{\ln(n) - \ln(-\ln(P_c))}{n} \dots \dots \dots (3)$$

**6. 결론**

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 전체 네트워크 수준의 재구성을 사용하지 않으며 높은 가용성을 보장하기 위한 결함 허용 기법을 제시하였다. 특히 결함을 처리하기 위한 기존의 위치 인식 노드 클러스터 시스템에서, 발생할 수 있는 헤드 노드의 결함을 효율적으로 감지 및 처리하기 위한 Consensus 기법을 적용하면 평균유지보수시간인 MTTR을 감소시킬 수 있어 전체 시스템의 가용도를 높일 수 있다. 추후 연구로 좀 더 깊은 수준의 수학적 분석이 요구되며, 분석된 결과에 따라 ns2 등의 시뮬레이터를 이용하여 제안된 기법의 실제적인 결함 허용 성능을 평가할 예정이다.

**참고문헌**

- [1] H. Zhang and A. Arora, "GS<sup>3</sup>: Scalable Self-Configuration and Self-Healing in Wireless Sensor Networks," Proceedings of Elsevier Computer Networks, Vol. 43, No. 4, pp. 459-480, Nov. 2003
- [2] C. Chong and S. Kumar, "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges," Proceedings of IEEE, Vol. 91, No. 8, pp. 1247-1256, Aug. 2003
- [3] F. Koushanfar, et al., "Fault Tolerance Techniques for Wireless Ad Hoc Sensor Networks," Proceedings of IEEE Sensors, Vol. 2, pp. 1491-1496, June 2002
- [4] M. Nesterenko et al., "Local Tolerance to Unbounded Byzantine Faults," Proceedings of IEEE Symposium on Reliable Distributed Systems, pp. 22-29, Oct. 2002
- [5] W. Heinzelman, et al., "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," Proceedings of Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 10-19, Jan. 2000
- [6] G. Gupta and M. Younis, "Fault-Tolerant Clustering of Wireless Sensor Networks," Proceedings of IEEE Conference on Wireless Communications and Networking, Vol. 3, pp. 1579-1584, Mar. 2003