

# 클러스터 기반 라우팅 프로토콜을 위한 결함허용기법 (A Fault-tolerant Scheme for Clustering Routing Protocols)

민 흥<sup>†</sup>                    김봉재<sup>†</sup>  
(Hong Min)                (Bongjae Kim)

정진만<sup>†</sup>                   김석현<sup>†</sup>  
(Jinman Jung)            (Seukhyun Kim)

윤진혁<sup>\*\*</sup>                   조유근<sup>\*\*\*</sup>  
(Jinhyuk Yoon)            (Yookun Cho)

허준영<sup>\*\*\*\*</sup>                이상호<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
(Junyoung Heo)            (Sangho Yi)

홍지만<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
(Jiman Hong)

· 본 연구는 2009년도 한성대학교 교내연구비와 서울대학교 컴퓨터연구소의 지원과제임

· 이 논문은 제36회 추계학술발표회에서 '클러스터 기반 라우팅 프로토콜을 위한 결함허용기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

<sup>†</sup> 학생회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부  
hmin@os.snu.ac.kr

bjkim@os.snu.ac.kr

jmjung@os.snu.ac.kr

shkim@os.snu.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 비회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부  
jhyoon@os.snu.ac.kr

<sup>\*\*\*</sup> 종신회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부 교수  
ykcho@os.snu.ac.kr

<sup>\*\*\*\*</sup> 정회원 : 한성대학교 컴퓨터공학과 교수  
jyheo@hansung.ac.kr

<sup>\*\*\*\*\*</sup> 정회원 : INRIA  
sangho.yi@inrialpes.fr

<sup>\*\*\*\*\*</sup> 종신회원 : 숭실대학교 컴퓨터공학과 교수  
jiman@ssu.ac.kr

(Corresponding author)

논문접수 : 2009년 12월 23일

심사완료 : 2010년 3월 28일

Copyright©2010 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제16권 제6호(2010.6)

**요약** 무선 센서 네트워크에서의 결함 허용은 센서 노드의 취약성 보완과 신뢰성 높은 정보 제공을 위해 필요하다. 센서 노드들의 자원 제약적인 특성 때문에 오류에 노출되기 쉬우며, 기존의 체크포인팅 기법들은 센서 네트워크의 특성을 고려하지 않고 설계되었기 때문에 이를 적용하기 어렵다. 본 논문에서는 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜에 체크포인팅 기법을 적용하여 헤드 노드의 결함 시 발생할 수 있는 정보 손실과 높은 복구 비용 문제를 해결하는 방법을 제안한다.

**키워드** : 무선 센서 네트워크, 결함허용 기법, 클러스터 기반 라우팅 프로토콜

**Abstract** In wireless sensor networks, a fault-tolerant scheme that detects the failure of sensor nodes and improves the reliability of collected information must be considered. Resource-constraint sensor nodes expose vulnerability and cannot use existing checkpointing schemes that do not consider a feature of sensor networks. In this paper, we propose a fault-tolerant scheme for clustering routing protocols that support the recovery of a head node.

**Key words** : Sensor operating system, Fault-tolerant scheme, Clustering routing protocols

## 1. 서론

수 많은 노드들이 특정 지역에 배포되어 자의적으로 네트워크를 구성하고, 환경 데이터를 수집하는 기반을 제공하는 것이 무선 센서 네트워크의 목적이다. 최소한의 비용으로 대규모의 센서 네트워크를 구성하기 위해서 센서 노드들은 낮은 성능의 프로세서, 작은 용량의 메모리와 저장공간이 탑재된다. 또한 배터리를 통해 전원을 공급 받는 등 제한된 자원 내에서 동작해야 하는 제약을 받는다[1]. 현재 대부분의 연구들은 이러한 자원 제약적인 특성을 고려하면서, 센서 응용에서 요구하는 실시간성, 결함허용, 확장성, 에너지 효율성 등을 만족하는 기법을 개발하는데 초점을 맞추고 있다[2].

무선 센서 네트워크에서 통신에 사용되는 비용은 일반적인 연산을 처리하는데 드는 비용에 비해 많은 양의 에너지를 소모한다. 따라서 수집된 정보를 효율적으로 BS(Base Station)에 전달하기 위한 라우팅 알고리즘들이 많이 연구되고 있다. 특히 클러스터링(Clustering)과 데이터 병합에 기반한 알고리즘들은 BS에 전달해야 할 패킷의 양을 최소화함으로써 노드의 배터리 소모와 무선 통신의 혼잡으로 인한 간섭을 효과적으로 줄일 수 있다[3]. 그러나 이러한 기법을 사용할 경우, 각 클러스터의 헤드 노드가 클러스터에 포함된 모든 노드의 정보를 통합하여 가지고 있기 때문에, 한 번의 오류에도 모든 정보를 잃어버리는 문제가 발생한다. 특히 센서 노드는 자원 제약성과 무선 통신이라는 특성 때문에 오류

발생 빈도가 높다[4].

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 클러스터링에 기반한 라우팅 알고리즘 적용 시 발생할 수 있는 헤드 노드의 일시적인 오류로 인한 데이터 손실을 막기 위해 체크포인팅(Check-pointing) 기법을 적용하여 손실된 데이터를 복구하는 기법을 제안한다. 헤드 노드는 클러스터 내에 속한 모든 노드의 정보와 데이터 센싱 주기마다 수집된 데이터를 백업 노드에게 저장한다. 백업 노드는 헤드 노드가 일시적인 동작 불능 상태가 됐을 때, 헤드 노드의 이상을 감지하고, 그 역할을 대신하여 수집된 정보를 BS에게 전달한다. 이를 통해 헤드 노드를 재선정하고 센싱 정보를 재전송하는 비용뿐만 아니라, 이로 인한 지연 시간을 줄임으로써 무선 센서 네트워크의 보다 빠른 응답성을 제공한다. 또한 신뢰도와 비용 분석 모델을 통해 지금까지 고려되지 않았던 체크포인팅 주기에 대한 최적의 값을 도출한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구에 대해 살펴보고, 3장에서는 클러스터 기반 라우팅 프로토콜의 신뢰성을 높이기 위한 결합 허용 기법에 대해 제안한다. 4장에서는 제안한 기법의 성능 결과를 보이고 이를 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 내리고 향후 연구 방향을 제시한다.

## 2. 관련 연구

무선 센서 네트워크의 특징을 고려하여 제안된 결합 허용 기법들은 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

### 2.1 싱크 노드에 대한 결합 허용

싱크(Sink) 노드는 네트워크 내에 있는 모든 데이터를 수집하여 BS로 전달하는 게이트웨이 역할을 수행한다. 따라서 싱크 노드가 동작을 멈추면 네트워크와 BS 사이에 정보와 제어 메시지가 전달되지 못한다. [5]에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 싱크 노드 주위에 체크포인트 센서를 선정하여 주기적으로 싱크 노드의 메모리 상태와 저장된 데이터를 체크포인트한다. 만약 싱크 노드의 에너지 잔량이 일정 기준치 미만으로 떨어지면 싱크 노드는 이를 체크포인트 노드에게 알리고, 체크포인트 노드는 싱크 노드의 역할을 대신하고, 또 다른 체크포인트 노드를 선정하여 체크포인트를 저장한다.

### 2.2 노드 단위의 결합 허용

네트워크를 구성하고 있는 각 센서 노드들도 다양한 소프트웨어 및 하드웨어 오류가 발생할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해, 노드 단에서 적용할 수 있는 결합 허용 기법들이 제안되었다. [6]에서는 각 노드가 일정 주기마다 자신의 체크포인트 정보를 1홉 통신이 가능한 이웃 노드들에게 브로드캐스팅(Broadcasting) 한다. 이때 이웃 노드들은 체크포인트 정보의 과도한 중복 저장

을 막기 위해, 노드의 밀집도(Density)에 따라 저장 또는 삭제 여부를 결정한다. [7]에서는 객체 단위로 메모리를 할당/해제하는 메모리 관리 기법과 센서 노드에 탑재된 플래시 메모리를 가상 메모리 영역으로 할당하는 기법을 통해 센서 네트워크에 적합한 메모리 관리 구조를 제안한다. 자주 변경된 데이터는 RAM에 저장하고, 체크포인트와 수집된 정보는 플래시에 객체 형태로 저장함으로써 플래시 메모리의 비휘발성을 이용한 효율적인 결합 허용 기법을 제안했다.

### 2.3 프로그래밍 언어를 통한 결합 허용

[4]에서는 기존의 노드 단위의 결합 허용이 아닌 네트워크 전체를 하나의 프로그래밍 단위로 보고 수행 과정을 작성하는 매크로프로그래밍(Macroprogramming) 기반의 체크포인트 기법을 제안하고 있다. Kairos라는 개발 시스템을 활용하여, 작성된 프로그램을 컴파일 하면 싱크 노드와 각 개별 노드에서 실행 가능한 바이너리 이미지들이 생성된다. 노드의 관점이 아닌 네트워크의 관점에서 체크포인트 기법을 설계했기 때문에 노드들 간의 동기화 및 의존성 문제를 해결할 수 있지만, 모든 노드의 동작이 일치해야 하기 때문에 체크포인트 설정 및 복구 과정의 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

## 3. 클러스터 기반 라우팅 프로토콜을 위한 결합허용기법

본 논문에서는 클러스터링에 기반한 라우팅 프로토콜에서 적용할 수 있는 결합 허용 기법을 제안한다. 제안된 기법에 대해 설명하기에 앞서, 클러스터링 기법을 통한 라우팅 프로토콜에 대해 대략적인 개념을 살펴보고 시스템 모델링과 최적화 기법에 대해 자세히 설명한다.

### 3.1 클러스터 기반 라우팅 프로토콜

무선 센서 네트워크를 위한 라우팅 기법들의 가장 큰 목표는 통신으로 인한 비용을 최소화하여 센서 노드의 생존 시간을 늘리는 것이다. 이를 위해서 계층적 라우팅 알고리즘은 모든 노드가 수집된 정보를 BS로 전송하는 것이 아니라 인접한 노드들끼리 클러스터를 구성하고, 수집된 정보를 헤드 노드에게 전달함으로써 BS의와의 통신을 위임한다. 헤드 노드는 데이터 병합을 통해 여러 번의 불필요한 패킷 전달을 줄인다[3]. 그림 1은 클러스터 기반 라우팅 프로토콜의 동작방식을 보여주고 있다. 이러한 기법에서 일반 노드에서의 오류 발생은 큰 문제를 발생 시키지 않지만 헤드 노드에서의 오류 발생 시, 클러스터의 모든 정보가 손실되는 문제를 초래할 수 있다. 따라서 네트워크에서 수집된 정보의 질과 신뢰성을 높이기 위해 헤드 노드에 대한 결합 허용 기법이 필요하다.

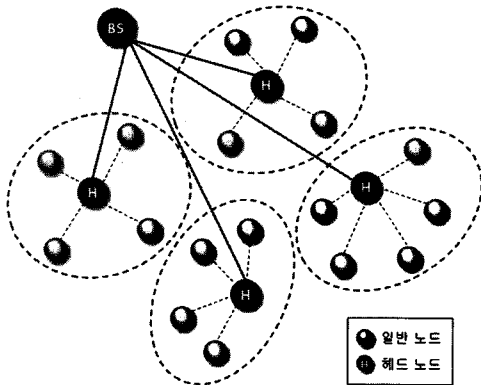


그림 1 클러스터 기반 라우팅 프로토콜

3.2 제안 기법의 개요

헤드 노드의 오류 발생 시 피해를 최소화하기 위해 본 논문에서는 체크포인팅 기법을 적용한다. 클러스터에서 헤드 노드를 선정할 때, 헤드 노드의 상태를 저장할 수 있는 백업 노드를 추가로 선정한다. 헤드 노드는 일반 노드들로부터 수집된 센싱 정보를 주기적으로 백업 노드에 저장하며, 백업 노드는 헤드 노드의 오류 발생 여부를 감시하고, 헤드 노드가 일시적으로 동작하지 못할 경우 저장된 체크포인팅 정보를 바탕으로 그 역할을 대신해서 수행한다. 그림 2는 클러스터 기반 라우팅 프로토콜에 제안된 기법을 적용했을 때의 동작방식을 보여주고 있다. 헤드 노드가 정상적으로 동작할 때는 (a, c, d) 백업 노드에 주기적으로 체크포인트 정보가 저장되고, 백업 노드는 헤드 노드가 정상적으로 동작하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 헤더 노드가 일시적인 오류로 인해 동작이 멈췄을 때는 (b) 백업 노드가 이를 감지하고 헤드 노드의 역할을 대신 수행할 수 있다. 이러한 기법을 통해 헤드 노드의 오류로 인한 정보손실을

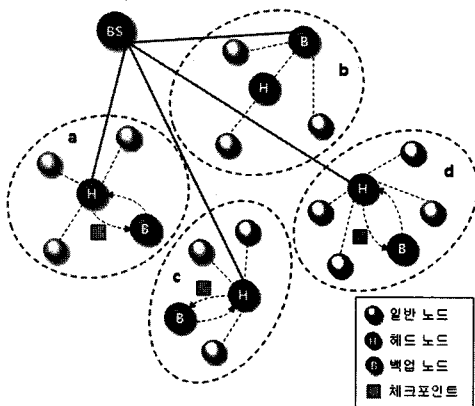


그림 2 결합 허용 기법이 적용된 라우팅 프로토콜

막을 수 있을 뿐만 아니라, 복구를 위한 지연 시간도 줄일 수 있다.

3.3 에너지 소모 및 지연 시간 분석을 위한 모델링

결함 허용 기법이 적용된 클러스터 기반 라우팅 프로토콜이 기존의 프로토콜에 비해 어떠한 성능을 보이는지 알아보기 위해 비용 분석 모델을 사용하였다. 다음 표는 비용 분석 모델에서 사용하는 기호들을 보여준다.

표 1 표기법과 의미

표기법	의미
$\lambda_e$	헤드 노드의 오류 발생 확률
$n$	클러스터 내의 노드 개수
$k$	헤드 노드에 수집된 데이터의 개수
$M_s$	메시지의 길이
$E_{elec}$	헤드노드 재전송 비용
$E_{rf}$	두 노드간 통신 비용
$I_{ckpt}$	체크 포인팅 주기
$t_{pre}$	체크 포인팅 이후에 경과된 시간
$R_{user}$	사용자가 기대하는 신뢰도
$T$	클러스터 내의 모든 노드의 정보를 수집하는데 필요한 시간
$t$	하나의 노드로부터 정보를 수집하는 데 필요한 시간 ( $t = T / (n-1)$ )
$E_{woc}$	기존의 기법을 사용할 때 클러스터 내에서 소비되는 에너지
$E_{ckpt}$	결함 허용 기법을 적용했을 때 클러스터 내에서 소비되는 에너지
$D_{sched}$	통신 스케줄링에 필요한 지연 시간
$D_{woc}$	기존의 기법을 사용할 때 복구 시간
$D_{ckpt}$	결함 허용 기법을 적용했을 때 복구 시간

다음과 같은 가정에 기반하여 네트워크 및 비용분석 모델을 단순화 했다.

- [8]에서 가정한 네트워크 모델을 참조
- 모든 노드는 자신의 에너지 잔량을 알고 있음
- 두 노드간의 통신 오류는 없음
- 하나의 클러스터에서 도출된 결과를 바탕으로 네트워크 전체의 결과를 예상할 수 있음
- 헤드 노드의 오류 확률은 포아송 분포를 따름
- 헤드 노드에서 데이터를 수집하는 동안(T) 오류는 한번만 발생

헤드 노드는 다음과 같은 주기에 따라 일반 노드들로부터 정보를 수집한다.

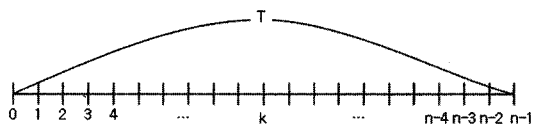


그림 3 헤드 노드의 정보 수집 주기

헤드 노드의 오류 발생 확률을  $\lambda_e$  라고 할 때 T 시간 내에 오류가 발생하지 않을 확률은  $e^{-\lambda_e T}$  라고 정의할 수 있다. 또한 각각의 노드로부터 정보를 수집할 때 k번째 노드로부터 정보를 수집하는 동안 오류가 발생할 확률은  $P_k = (e^{-\lambda_e t})^{k-1} (1 - e^{-\lambda_e t})$ 이다.

두 기법 사이의 에너지 소모량을 비교하기 위해 오류 발생 여부에 따라 다음과 같이 식을 정리할 수 있다.

$$E_{w\text{ock}} = \sum \{ (1 - P_k) \cdot M_s \cdot E_{rf} + P_k \cdot (E_{elec} + M_s \cdot E_{rf}) \}$$

기존의 알고리즘을 사용할 경우 오류가 발생했을 때 헤드 노드를 재선출하고, 다시 클러스터내의 정보를 수집하는 추가적인 비용이 발생한다. 헤드 노드의 선출 과정은 시작 메시지 전송, 모든 노드가 자신의 에너지 잔량을 다른 노드에게 전달, 새로 선출된 헤드 노드가 자신의 ID전송의 순서로 이루어진다[8].

$$E_{elec} = \{ (n-1)^2 + 2(n-1) \} \cdot M_s \cdot E_{rf}$$

본 논문에서 제안하는 결합 허용 기법이 적용된 라우팅 프로토콜을 다음과 같은 알고리즘을 통해 체크포인팅 및 복원작업이 진행된다.

표 2 체크포인트 및 복원 알고리즘

```

if Normal operation then // 헤드 노드 정상 동작
  if t_pre >= I_ckpt then
    check-pointing in back up node
  else
    collecting data from normal nodes
  end if
else // 헤드 노드 오류
  back up node plays role of head node
  if k >= (n * R_user) then
    no additional operation
  else
    collecting additional data from normal nodes until meeting the R_user
  end if
end if
    
```

앞서 언급한 알고리즘에 따라 결합 허용 기법을 적용했을 때의 에너지 소모량을 다음과 같이 정의할 수 있다.

- R<sub>user</sub> 만족할 경우
$$E_{ckpt} = \sum \{ (1 - P_k) \cdot M_s \cdot E_{rf} + P_k \cdot M_s \cdot E_{rf} \} + M_s \cdot E_{rf} \cdot [k / I_{ckpt}]$$
- R<sub>user</sub> 만족 못할 경우
$$E_{ckpt} = \sum \{ (1 - P_k) \cdot M_s \cdot E_{rf} + P_k \cdot M_s \cdot E_{rf} \} + M_s \cdot E_{rf} \cdot [k / I_{ckpt}] + (n \cdot R_{user} - C) \cdot M_s \cdot E_{rf}$$

체크 포인팅 주기의 경우 주기가 짧을수록 잃어버리는 데이터의 양이 줄어들어 안정성이 높아지지만 이로 인한 비용이 증가하게 된다. 따라서 에너지 소모 측면에서는 기존의 기법과 유사하면서 안정성을 최대한 높일 수 있는 체크포인팅 주기를 다음과 같이 정의할 수 있다.

- 체크포인팅 비용 <= 기존 알고리즘의 복구비용
$$M_s \cdot E_{rf} \{ (T / I_{ckpt}) + (n \cdot R_{user} - C) \} \leq E_{elec}$$

$$I_{ckpt} \geq T / \{ (n-1)^2 + 2(n-1) - (n \cdot R_{user} - C) \}$$

헤드 노드의 오류로 인한 복구 시간은 클러스터 내에서 전달되는 메시지의 개수에 비례하기 때문에 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D_{w\text{ock}} = \{ (n-1)^2 + 2(n-1) \} \cdot D_{sched}$$

- R<sub>user</sub> 만족할 경우
$$D_{ckpt} = I_{ckpt} + (n-1) \cdot D_{sched}$$
- R<sub>user</sub> 만족 못할 경우
$$D_{ckpt} = I_{ckpt} + \{ (n-1) + (n \cdot R_{user} - C) \} \cdot D_{sched}$$

#### 4. 성능 평가

기존의 클러스터 기반 라우팅 프로토콜과 결합 허용 기법이 적용된 라우팅 프로토콜 간의 에너지 소비량과 지연시간 비교하기 위해 시뮬레이션 수행하였다. 시뮬레이션을 위해서 [8], [9]에서 측정된 값을 바탕으로 파라미터들을 설정하였고, 이를 앞서 정의한 수식에 대입하여 결과를 도출 하였다.

표 3 시뮬레이션을 위한 파라미터 설정

파라미터	값
$\lambda_e$	$0 < \lambda_e < 1.0$
$M_s$	64 bytes
$E_{rf}$	80 nJ
$R_{user}$	$0 < R_{user} < 1.0$
$D_{sched}$	17 ms
T	$(n-1) \cdot D_{sched}$

그림 4는 오류 확률에 따른 에너지 소모량을 보여주고 있다. 그래프 상에서 Pre는 기존기법을, Our는 제안 기법을 의미하며, ‘\_’ 뒤의 숫자는 노드의 개수를 나타낸다. 기존 기법은 오류 확률이 높아짐에 따라 에너지 소모량이 증가 할 뿐만 아니라 클러스터내의 노드에 개수가 많아지면서 에너지 소비량이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

제안 기법의 경우, 신뢰도(Ruser)를 0.75, 체크 포인

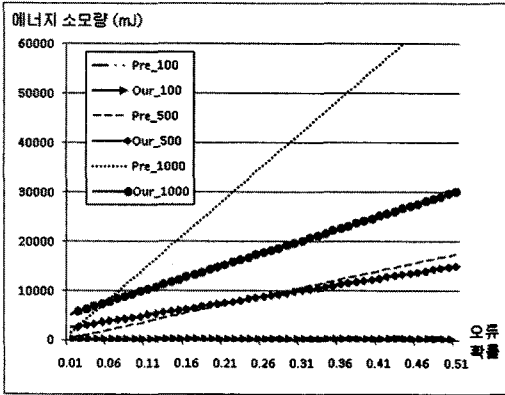


그림 4 에너지 소모량 비교

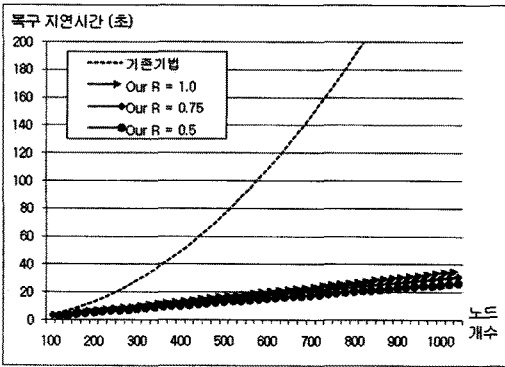


그림 5 노드 수에 따른 복구 지연 시간 비교

팅 주기(Ickpt)를 일반 노드들로부터 메시지를 매번 받을 때마다 했을 경우 에너지 소모량을 보여주고 있다. 기존 기법에 비해 에너지 소모량의 증가가 완만하고, 노드의 개수가 늘어나도 증가율이 크지 않다.

그림 5는 기존 기법과 제안 기법의 복구 지연 시간에 대한 비교 결과를 보여주고 있다. 기존 기법의 경우 노드 개수가 증가함에 따라 지연 시간이 급격하게 증가하는데 반해 제안 기법은 그 정도가 완만하다는 것을 알 수 있다.

**5. 결론 및 향후 연구 방향**

무선 센서네트워크 응용은 제한된 자원을 효율적으로 사용하면서 주어진 작업을 정해진 시간 내에 수행해야 하는 특성을 가지고 있다. 또한 주변 환경 감시와 목표물에 대한 신뢰성 높은 탐지를 위해서 결합 허용 기법에 대한 필요성도 높아지고 있다. 본 논문에서는 기존의 클러스터 기반 라우팅 프로토콜의 문제점인 헤드 노드의 결합으로 인한 데이터 손실과 긴 복원 지연 시간을 해결하기 위해, 체크 포인팅 기법을 적용하였다. 시뮬레

이션 결과 본 논문에서 제안한 기법이 기존의 기법에 비해 에너지 효율성과 지연 시간 측면에서 우수함을 보였다. 향후 일반 노드들의 결합을 고려한 결합 허용 기법에 대한 연구를 진행할 계획이다.

**참고 문헌**

- [1] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, A survey on sensor networks, *IEEE Communications Magazine*, vol.40, Issue 8, pp.102-114, 2002.
- [2] Mokhtar Aboelaze, and Fadi Aloul, Current and future trends in sensor networks: a survey, the 2nd IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, pp.551-555, 2005.
- [3] Kemal Akkaya, and Mohamed Younis, A survey on routing protocols for wireless sensor networks, *Ad Hoc Networks*, pp.325-349, 2005.
- [4] Ramakrishna Gummadi, Todd Millstein, and Ramesh Govindan, Declarative Failure Recovery for Sensor Networks, the 6th international conference on Aspect-oriented software development, pp.173-184, 2007.
- [5] Iman Saleh, Adnan Agbaria, and Mohamed Eltoweissy, In-Network Fault Tolerance in Networked Sensor Systems, the workshop on Dependability issues in wireless ad hoc networks and sensor networks, pp.47-54, 2006.
- [6] Sangho Yi, Junyoung Heo, Yookun Cho, and Jiman Hong, Adaptive Mobile Checkpointing Facility for Wireless Sensor Networks, *ICCSA(LNCS 3981)*, pp.701-709, 2006.
- [7] Gaurav Mathur, Peter Desnoyers, Deepak Ganesan, and Prashant Shenoy, Capsule: an energy-optimized object storage system for memory-constrained sensor devices, the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, pp.195-208, 2006.
- [8] Mao Ye, Chengfa Lil, Guihai Chenl, and Jie Wu, EECS: An Energy Efficient Clustering Scheme in Wireless Sensor Networks, the 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, pp.535-540, 2005.
- [9] Anton Ageev, David Macii, and Dario Petri, Experimental Characterization of Communication Latencies in Wireless Sensor Networks, the 16th IMEKO TC4 International Symposium and 13th International Workshop on ADC Modelling and Testing, pp.258-263, 2008.