

무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 메시지 전송 신뢰도 보장 라우팅 알고리즘

정회원 백 장 운*, 남 영 진**°, 종신회원 서 대 화*

Energy-Efficient Routing Algorithm with Guaranteed Message Transmission Reliability for Wireless Sensor Networks

Jang Woon Baek*, Young Jin Nam**° *Regular Members*,
Dae-Wha Seo* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적이고 신뢰성 있는 메시지 전송을 제공하는 k-독립경로 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 중요한 이벤트가 발생하지 않는 경우에는 단일 경로를 통해서 메시지를 전송하여 에너지 효율을 높인다. 하지만, 중요한 이벤트가 발생한 경우에는 k개의 독립경로를 통해서 메시지를 전송함으로써 요구되는 메시지 전송 신뢰도를 보장한다. 수집되는 데이터의 패킷을 관찰함으로써 중요한 이벤트의 발생 유무를 감지하고, 타겟 전송률과 검증된 고장 모델을 통하여 독립경로의 수(k)를 산출한다. 시뮬레이션 결과에서 제안하는 알고리즘은 기존 라우팅 알고리즘에 비해 노드 고장에 견고하였고 다중 경로 및 경로 복구 알고리즘보다 에너지 소모를 줄이고 평균 지연을 감소시켰음을 보여주었다.

Key Words : Wireless sensor networks, Disjoint-path routing, Message transmission reliability

ABSTRACT

This paper proposes a k-disjoint-path routing algorithm that provides energy efficient and reliable message transmission in wireless sensor networks. The proposed algorithm sends messages through a single path without the occurrence of critical events. However, it sends through k disjoint paths ($k > 1$) under the occurrence of critical events. The proposed algorithm detects the occurrence of critical events by monitoring changing data patterns, and calculates k from a well-defined fault model and the target-delivery ratio. Our simulations reveal that the proposed algorithm is more resilient to node failure than other routing algorithms, and it also decreases energy consumption and reduces the average delay much more than multi-path and path-repair algorithms.

I. 서 론

MEMS, 무선통신 및 전자 기술의 발전으로 여러 응용 분야에 무선 센서 네트워크가 널리 적용되고 있다^[1]. 일반적으로 무선 센서 네트워크는 다수의

센서노드와 하나 이상의 싱크노드(베이스 스테이션)로 구성된다. 센서노드는 물리적 환경정보를 센싱하고 처리할 수 있으며, 멀티-홉(multi-hop) 통신을 통하여 싱크노드로 데이터를 전송할 수 있다. 싱크노드로 전송된 데이터는 인터넷을 통해서 사용자에게

* 본 연구는 2007년도 경북대학교 BK21사업과 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2006-C1090-0603-0045)

* 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 모바일컴퓨팅 & 임베디드시스템 연구실 ({kutc, dwseo}@ee.knu.ac.kr),

** 대구대학교 컴퓨터·IT공학부 (yjinam@daegu.ac.kr)(°:교신저자)

논문번호 : kics2007-04-707, 접수일자 : 2007년 4월 30일, 최종논문접수일자 : 2007년 8월 2일

전달된다.

센서노드는 제한된 배터리를 장착하고 있기 때문에, 에너지를 효율적으로 사용하여 센서노드의 수명을 늘리는 것이 중요하다²⁾. 센서노드에서 메시지 송수신에 소모되는 에너지는 데이터 처리에 소모되는 에너지에 비해 상대적으로 크다³⁾. 인-네트워크 병합은 송수신 메시지수를 줄임으로써 에너지 소모를 줄일 수 있다⁴⁾. 인-네트워크 병합을 수행하는 센서노드는 자식노드로부터 받은 메시지의 데이터와 자신의 수집 데이터를 결합하여 단일 메시지로 전송한다. 일반적으로 센서 네트워크는 에너지 절약을 위해 트리 토폴로지 내에서 단일 경로 라우팅을 사용한다⁴⁾. 하지만, 단일 경로 상의 어떤 노드에 고장이 발생하면, 메시지가 싱크노드로 전달될 수 없다. 실제로, 센서노드는 배터리 소진, 외부 충격 등에 의해 고장이 발생하기 쉽기 때문에 단일 경로 라우팅은 센서 네트워크 환경에 적합하지 않다⁵⁾.

무선 센서 네트워크에서 신뢰성 있는 이벤트 전달을 제공하기위해 여러 가지 라우팅 알고리즘이 제안되었다⁶⁻¹⁰⁾. 첫 번째 방법은 m개의 독립경로를 통해서 메시지를 전달하는 다중 경로 라우팅 알고리즘이다⁶⁻⁸⁾. 다중 경로 라우팅 알고리즘은 메시지 전달률은 높일 수 있지만, 많은 노드가 메시지 전송에 참여하기 때문에 전체적인 트래픽이 증가하고 에너지 소모가 단일 경로 라우팅에 비해 상대적으로 크다⁹⁾. 두 번째 방법은 단일 경로를 통해 메시지를 전송하고 노드 고장이 있을 경우에 다른 노드를 찾아 경로를 복구하여 메시지를 전송하는 방법이다^{9,10)}. 경로 복구(path-repair) 알고리즘은 대안 경로(alternative path)를 찾는데 부가적인 에너지와 지연이 발생한다. 인-네트워크(in-network) 병합을 수행하는 센서 노드는 타임아웃 후에 도착하는 메시지는 손실된 것으로 간주한다¹¹⁾. 중요 이벤트 정보를 포함한 메시지의 손실은 센서 애플리케이션에 심각한 문제를 야기할 수 있다.

본 논문은 신뢰성 있는 무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 k-독립경로 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 데이터 변동률을 이용하여 지진, 화재 및 유독가스누출과 같은 중요 이벤트의 발생을 감지한다. 그리고 중요한 이벤트가 발생하면 타깃 전달률을 보장하기 위해 k-독립경로를 통해 메시지를 전송한다. 제안 알고리즘은 로컬 혹은 자식노드로부터 수집된 데이터의 변동률이 기준값보다 적으면 중요 이벤트 발생이 없는 것으로 간주하고 단일 경로(k=1)로 메시지를 전송한다. 반대

로, 데이터 변동률이 기준값보다 크면 중요 이벤트가 발생한 것으로 간주하고 k-독립경로(k>1)로 메시지를 전송한다. 여기서 k값은 센서 애플리케이션의 타깃 전달률과 노드의 흡수에 의해 결정된다. 중요 이벤트가 발생하는 경우가 드물기 때문에 제안 알고리즘은 대부분 단일 경로로 동작한다. 따라서 다중 경로 라우팅 알고리즘보다 훨씬 적은 에너지를 소모한다. 또한, 중요한 이벤트를 감지하면, k-독립 경로를 통해 메시지를 전송함으로써 신뢰성 있는 데이터 전송을 보장한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 관련 연구에 대해 살펴보고 문제점을 분석한다. III장에서는 제안하는 k-독립경로 라우팅 알고리즘을 자세히 설명한다. IV장에서는 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하고, 마지막으로 V장에서는 결론을 맺고 향후 과제를 알아본다.

II. 배경

무선 센서 네트워크는 에너지 효율적인 통신을 위해 트리 토폴로지 상에서 단일 경로 라우팅 알고리즘을 사용한다^{4,10)}. 센서노드는 상대적으로 짧은 라디오 전파 범위를 가지고 지리적으로 넓은 지역을 감시하는데 적용되므로, 많은 수의 센서노드가 밀집되어 센싱 지역에 배치된다. 따라서 소스 노드에서 전송한 메시지가 싱크 노드에 도착하기 위해서는 중간에 많은 홉을 거쳐야한다. 하지만, 메시지를 중개하는 센서 노드의 고장 확률이 높기 때문에 단일 경로 라우팅의 메시지 전달률은 매우 낮다. 이러한 센서 네트워크에서의 노드 고장에 대응하기 위해 제안된 라우팅 알고리즘은 두 종류로 나눌 수 있다.

첫 번째 방법은 다중 경로 라우팅 알고리즘이다⁶⁻⁸⁾. 다중 경로 라우팅 알고리즘은 단일 경로 라우팅 알고리즘에 비해 이론 및 실험에서 노드 고장에 훨씬 견고함을 보여주었다²⁾. 다중 경로는 소스와 싱크의 메시지 교환으로 생성된다⁷⁾. 이 기법에서는 다수의 데이터 복사본이 여러 개의 경로를 통해 전송되므로, 다중 경로 중의 일부 경로에 노드 고장이 발생하더라도 메시지 전달은 영향을 받지 않는다. 예를 들어, m개의 독립경로를 이용한 메시지 전송은 단일 경로에 비해 메시지 전달률을 m에 비례하여 향상시킬 수 있다. m 값이 작을수록 에너지 소모를 줄일 수 있지만, 메시지 전달률이 떨어진다. 반면에, m 값이 클수록 메시지 전달률은 향상되지

만, 에너지 소모가 커지고 네트워크 내에 트래픽이 증가한다. 트래픽 증가하면 무선 채널의 충돌을 가능성이 높아지므로 전송 시에 백오프 지연이 길어진다.

두 번째 방법은 다중 경로 라우팅 알고리즘의 문제를 해결하기 위해 제안된 경로 복구 라우팅 알고리즘이다^{8,9)}. 경로 복구 라우팅 알고리즘은 단일 경로를 통해 메시지를 전송하고 노드 고장이 있을 경우에 다른 경로를 찾아서 메시지를 전송한다. 센서노드가 메시지 전송 중에 라우팅 경로 상에 있는 노드의 고장을 감지하면, 소스 노드에게 노드 고장을 알린다. 고장 알림 메시지를 받은 소스 노드는 새로운 대안 경로를 찾아서 메시지를 재전송한다. 하지만, 노드 고장이 소스에서 멀리 떨어진 곳에서 발생할 경우에 소스 노드에서 경로를 복구하는 방법은 비효율적이다. 고장 노드와 소스 노드의 거리가 멀면 경로를 복구하는데 시간이 오래 걸리고, 고장 알림 메시지를 전달하고 경로 탐색 메시지를 중개하는 노드의 에너지 소모가 증가하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 로컬 노드 기반의 경로 복구 알고리즘이 제안되었다⁹⁾. 이 알고리즘은 암묵적 응답(implicit acknowledgement)을 이용하여 노드 고장을 감지한다. 라우팅 트리의 부모노드 고장이 감지되면, 소스 노드로 고장 알림 메시지를 보내지 않고 이웃 노드들 중에서 새로운 부모노드를 선택하고 로컬 캐시에 저장된 데이터를 새로운 부모노드로 바로 전송한다. 이 알고리즘은 경로 복구시간을 단축시키고 부가적인 메시지 송수신으로 인해 발생하는 에너지 소모를 줄인다. 하지만, 대안 경로를 탐색하는데 여전히 부가적인 지연 및 에너지 소모가 발생한다.

다중 경로 라우팅 알고리즘과 경로 복구 라우팅 알고리즘의 문제점을 해결하기 위해, 본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적이고 신뢰성이 높은 k-독립경로 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘에 대한 세부적인 설명은 다음 절에서 설명한다.

III. 제안 알고리즘

본 논문은 중요이벤트의 타깃 전달률을 만족하면서 에너지 소모를 줄이기 위해 라우팅 경로의 수를 적응적으로 조절하는 k-독립경로 라우팅 알고리즘을 제안한다. 무선 센서 네트워크에서 데이터 병합이 주기적으로 수행되고, 라우팅 알고리즘은 각 센서노

드에 탑재 되어 동작한다고 가정한다.

제안 알고리즘은 지진이나 산불과 같은 중요 이벤트의 발생을 감지하기위해 센서 네트워크에서 수집되는 데이터의 세 가지 특성을 이용한다. 첫째, 시간 변화에 따른 센싱 데이터의 변화량은 크지 않다. 둘째, 지리적으로 인접한 노드들의 데이터 값은 유사하다. 셋째, 중요 이벤트가 발생할 경우, 데이터의 변동률이 크다. 데이터 변동률은 센서노드의 로컬 수집 데이터 혹은 자식노드로부터 받은 데이터의 시간적 변화량을 의미한다. 앞의 두 가지 특성으로부터, 데이터 변동률이 미리 정의된 기준값보다 작을 때에는 중요 이벤트의 발생이 없음을 유추할 수 있다. 데이터 변동률이 작을 때에는 메시지가 반드시 싱크노드에 전송되어야하는 것은 아니므로, 제안 알고리즘은 단일 경로(k=1)를 유지한다. 하지만, 데이터 변동률이 기준값보다 크게 되면 중요 이벤트의 타깃 전달률을 만족시키기 위해 k개의 독립경로(k≥1)를 통해 메시지를 전달한다.

타깃 전달률을 만족하는 소스 노드와 싱크 노드 간의 독립경로의 수를 계산하기위해 다음과 같은 고장 모델을 사용한다. 무선 센서 네트워크에서 배터리 소진이나 노드 내부 문제로 인해 통상적으로 야기되는 노드 고장률이 비슷하므로 각 센서노드는 동일한 고장률(f)을 가진다고 가정한다. 소스 노드는 싱크 노드로부터 N 홉 떨어진 곳에 위치하고 소스 노드와 싱크 노드 사이에 k 개의 독립경로가 존재한다고 가정한다. 이때, k-독립경로를 통해 전송한 메시지의 전달이 실패할 확률, $P_{fail}(N) = (1 - (1 - f)^N)^k$ 이므로 적어도 한 개의 메시지가 싱크 노드로 전달될 확률, $P_{succ}(N) = 1 - P_{fail}(N)$ 이다. 응용 애플리케이션이 요구하는 타깃 전송률, $P_{succ}(N) = a$ ($0 \leq a \leq 1$)일 때, 이를 만족하기 위한 최소 독립경로의 수, k'은 다음 식(1)과 같다:

$$k' = \log(1 - a) / \log(1 - (1 - f)^N) \quad (1)$$

그림 1은 제안 알고리즘의 동작과정을 보여준다. 첫 번째 단계(PATH_INITIALIZATION)에서는 타깃 전달률을 보장하는 최소의 독립경로를 생성한다. 센서노드(node_n)가 쿼리를 받으면 자신의 홉 카운트보다 한 홉 작은 노드들을 부모노드(node_{par}(n))로 정하고 부모 리스트(P_n)를 초기화 한다. 쿼리 메시지는 타깃 전달률(a), 기준 데이터 변동률(DV)과 홉 수를 포함하고 있다. node_n은 타깃 전달률을 만족하는 최소 독립경로의 수(k)을 식 (1)을 이용하여 계

산하고 $node_n$ 과 싱크노드를 연결하는 k-독립경로를 생성한다. k-독립경로를 생성하는 과정은 다음과 같다. $node_n$ 은 소스 ID, 송신자 ID, 흡수, 요청 ID의 정보를 포함하는 경로 요청 메시지를 부모 리스트 중에서 선택된 k개의 부모노드로 전송한다. 경로 요청 메시지가 싱크노드로 전달되는 동안 요청 ID는 유일하다. 요청을 받은 센서노드는 송신자의 흡수가 자신의 흡수보다 크고 이전에 동일한 ID의 메시지를 받지 않았다면 그 메시지의 경로 정보를 라우팅 테이블에 저장한다. 그렇지 않으면, 요청 송신자에게 NACK 메시지를 돌려보낸다. 그러면 NACK 메시지를 받은 송신자는 다른 부모노드로 선택하여 요청메시지를 다시 전송한다. 센서 네트워크내의 각 노드가 이러한 과정을 반복함으로써, 싱크노드는 서로 다른 경로를 통해서 k개의 요청 메시지를 받을 수 있다. 싱크 노드는 경로가 생성되었음을 알리기 위해 역경로(reverse-path)를 이용해서 $node_n$ 으로 응답메시지를 보낸다. 마지막으로, 응답메시지로 소스 노드는 k개의 부모노드를 고르고, k개의 부모노드들 중에서 주 부모노드(primary parent)를 선택한다.

제안 알고리즘의 다음 단계(DATA_TRANSMISSION)는 싱크노드로 센싱한 데이터를 전송하는 것이다. $noden$ 은 타임아웃(T_n) 동안 자식 노드로부터 메시지($messagechild(n)$)를 수신하고 기준 데이터 변동률(DV)의 조건을 검사한다. 타임아웃 값은 적응적 타임아웃 스케줄링 기법에 의해 설정된다^[12]. $noden$ 의 데이터 변동률(dvn)이 DV보다 작을 때, 즉, 중요 이벤트의 발생이 없을 경우에는 주 부모노드(단일 경로 라우팅)로 메시지를 전송한다. 데이터 변동률이 DV보다 크면, 즉 중요 이벤트가 발생했을 경우에는 부모 리스트 중에서 k개의 부모노드(k-독립경로 라우팅)로 메시지를 전송한다. 전송을 완료하면, 다음 주기까지 슬립한다.

IV. 알고리즘 적용 예

그림 2는 각 라우팅 알고리즘의 적용 예를 보여 준다. 그림 2 (가)의 단일 경로 라우팅 알고리즘은 라우팅 경로 상에 노드고장이 생기면 더 이상 메시지 전송이 이루어지지 않는다. 그림 2 (나)의 경로 복구 라우팅 알고리즘은 초기에 단일 라우팅 경로를 생성한다. 노드 고장이 없을 경우에는 단일 경로 라우팅을 통해 메시지를 전송함으로써 센서 노드의 소모 에너지 소모를 줄이고, 노드 고장이 발생할 경우 경로 복구 메커니즘을 통해 새로운 경로를 찾아

```

procedure PATH_INITIALIZATION()
    //  $N = \{n \mid node(n)\}$ , all sensor nodes
    //  $P_n = \{p_i \mid i=1, \dots, M\}$ , parent list of  $node(n)$ 

    input :  $Q_n = \{q_i \mid i=1, \dots, M\}$ , queries from  $P_n$ 
    output:  $P_{(n,k)} = \{p_j \mid j=1, \dots, k\}$ ,  $1 \leq k \leq M$ , k parent list for k disjoint path

    foreach sensor  $node(n) \in N$  do
        receive queries from its parents;
        initialize a parent list  $P_n$ ;
        compute the number of disjoint path k
            to meet the target delivery ratio( $a$ );
        construct k disjoint paths to the base station;
        pick k parents and its primary parent;
    end

end PATH_INITIALIZATION

procedure DATA_TRANSMISSION()
    n ← node_id;
    message_n ← sensing critical
                or non-critical events;

    repeat
        message_child(n) ← receive(node_child(n));
        message_n ← data_aggregation(message_n,
                                     message_child(n));
        update data variation( $dv_n$ ) at node_n;
        check threshold conditions
            and update  $Timeout_n$ ;
    until  $Timeout_n$  has expired

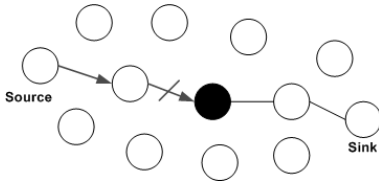
    if (critical event occurred) then
        send message_n to each of the k parents;
    else
        send message_n to the primary parent;
    endif

    sleep until the next period;
end DATA_TRANSMISSION
    
```

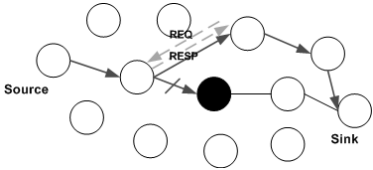
그림 1. k-독립경로 라우팅 알고리즘

패킷을 재전송함으로써 메시지 전달을 보장할 수 있다. 하지만, 새로운 경로를 요청하고 응답을 받아 메시지를 재전송하는 시간이 센서 노드의 데이터 병합의 타임아웃보다 클 수 있다. 타임아웃 이후에 도착한 메시지는 손실 된 것으로 간주되므로 싱크 노드로 메시지 전달이 될 수 없다.

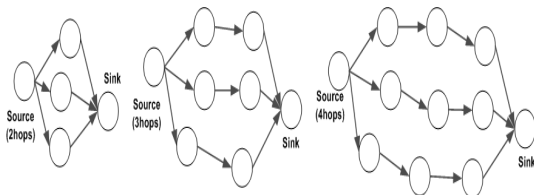
그림 2 (다)의 다중 경로 라우팅 알고리즘은 소스 노드와 싱크 노드간의 3개의 독립 라우팅 경로를 통해 메시지를 전송하기 때문에 두 개 이하의 독립경로에 노드고장이 발생하더라도 싱크노드로 메시지 전달이 이루어진다. 하지만, 단일 경로 라우팅 알고리즘에 비해 네트워크에 트래픽이 증가하여 센서 노드의 메시지 전송 횟수가 많아지므로 에너지 소모가 증가하고, 채널 충돌이 자주 발생하여 전송 지연이 길어질 수 있다. 그리고 다중 경로 라우팅 알고리즘은 사용하는 경로의 수가 결정이 힘들다.



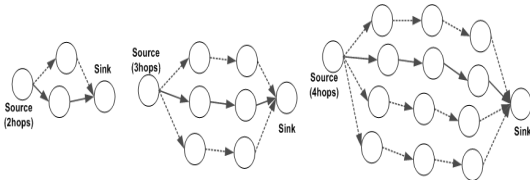
(가) 단일 경로 라우팅 알고리즘



(나) 경로 복구 라우팅 알고리즘



(다) 다중 경로 라우팅 알고리즘



(라) k-독립경로 라우팅 알고리즘

그림 2. 각 라우팅 알고리즘의 예제: (가)단일 경로 라우팅 알고리즘, (나)다중 경로 라우팅 알고리즘, (다)경로 복구 라우팅 알고리즘, (라)k-독립경로 라우팅 알고리즘

최악의 경우를 가정하여 싱크 노드로부터 가장 멀리 떨어진 소스 노드의 메시지 전송이 타깃 전달률을 만족하도록 경로의 수를 정하면, 싱크 노드에 가까운 노드는 불필요하게 많은 경로로 메시지를 전송하여 센서 네트워크의 전체적 성능이 저하된다. 평균적인 거리를 고려하여 다중 경로 수를 결정할 경우에는 평균 이상 되는 거리에 위치한 소스 노드의 메시지 전송은 타깃 전달률을 만족할 수 없다.

그림 2 (라)의 k-독립경로 라우팅 알고리즘에서 각 센서 노드는 자신의 흡수와 타깃 전달률에 따라 k개의 독립경로를 생성한다. 평상시에는 단일 경로 라우팅 경로를 통해서 메시지를 전달한다. 라우팅 경로상의 센서 노드가 중요 이벤트를 감지하면, 그 노드에 미리 생성된 k-독립경로를 통해서 메시지 전

달이 이루어진다. 따라서 k-독립경로 라우팅 알고리즘은 중요한 이벤트를 포함한 메시지의 신뢰성 있는 전달을 보장할 수 있다. 다중 경로 라우팅 알고리즘은 항상 여러 개의 라우팅 경로를 통해 메시지를 전송하는데 반해, k-독립경로 라우팅 알고리즘은 보통 단일 경로를 통해 메시지를 전송하기 때문에 센서 노드의 에너지 소모가 훨씬 적다. 그리고 중요한 이벤트가 발생하여 k-독립경로를 통해 메시지를 전송하더라도 다중 경로 라우팅 알고리즘보다 트래픽 증가량이 크지 않다. 다중 경로 라우팅 알고리즘은 모든 소스 노드가 항상 동일한 다중 경로를 통해 메시지를 전송하지만, k-독립경로 라우팅 알고리즘은 중요이벤트를 감지한 소스 노드만 k-독립경로로 메시지를 전송한다.

그림 2 (다)에서 다중 경로 라우팅 알고리즘은 항상 3개 독립경로를 통해 메시지를 전송하지만, 제안하는 k-독립경로 라우팅 알고리즘은 소스 노드의 흡수에 따라 타깃 전달률을 보장하도록 독립경로의 수(k)를 결정한다. 그림 2 (라)에서 k-독립경로 라우팅 알고리즘은 흡수가 4일 때는 독립경로의 수가 4개, 흡수가 3일 때는 3개, 그리고 흡수가 2일 때는 2개의 독립경로를 통해 메시지를 전송한다. 따라서 k-독립경로 라우팅 알고리즘은 싱크 노드로부터의 거리에 상관없이 메시지 전송의 신뢰도를 보장하고 불필요한 메시지 전송을 없앤다.

또한, k-독립경로 라우팅 알고리즘은 중요 이벤트가 발생하면 미리 생성된 k-독립경로를 통해 메시지를 전송하므로, 경로복구라우팅 알고리즘에서 문제가 되는 새로운 경로 탐색 및 패킷 재전송으로 인한 지연이 발생하지 않는다. 따라서 센서 노드의 타임아웃으로 인해 생기는 메시지 손실이 막을 수 있다.

V. 성능 평가

본 절에서는 시뮬레이션을 통해서 제안 알고리즘의 성능을 평가한다. 제안한 k-독립경로 라우팅 알고리즘을 NS-2 네트워크 시뮬레이터에 구현하였다^[13]. 성능 평가를 위해 단일 경로 라우팅 알고리즘^[4], 다중 경로 라우팅 알고리즘^[7] 및 경로 복구 알고리즘^[9]과 비교 분석하였다.

5.1 시뮬레이션 환경

표 1은 실험에 사용된 변수를 보여준다. 네트워크 내에 센서노드의 수는 50, 100, 150, 200 및 250개에 대해 실험을 수행하였다. 센서노드는 센싱

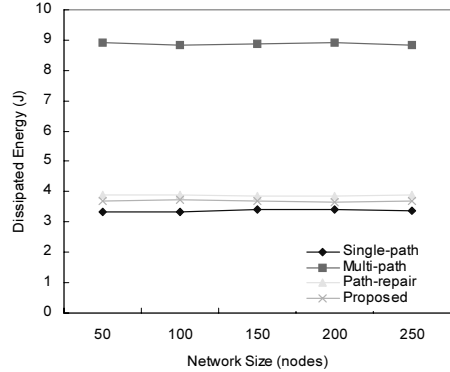
지역 내에 랜덤하게 배치되고 고정되어있다. 센서노드의 밀도를 일정하게 유지하기 위해 센서노드의 수에 따라 네트워크 크기를 조절하였다. 센서 네트워크의 연결성(connectivity)은 센서노드의 밀도에 따라 달라진다. 본 실험에서는 연결성이 센서노드의 수에 상관없이 유지되도록 하였다. 각 센서노드의 라디오 전파 범위는 20미터이고, 물리 링크의 대역폭은 250kbps이다. 이는 MICAz 모터의 데이터 시트를 참조하였다^[14]. MAC 프로토콜은 무선 센서 네트워크의 특성을 고려한 저전력 MAC 프로토콜인 S-MAC을 사용하였다^[15]. 전송 및 수신 파워는 각각 14.88, 12.50mW로 설정하였다. 그리고 대기모드와 슬립모드에서 소모되는 파워는 각각 12.36, 0.016mW이다. 각 시뮬레이션은 1000초 동안 수행하였고 센서 네트워크로부터 수집된 데이터는 매 초마다 주기적으로 싱크노드로 전송된다. 중요 이벤트는 임의의 지역에서 발생하고 발생주기는 50초로 정하였다. 데이터 변동률의 기준값을 5퍼센트로 설정했다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

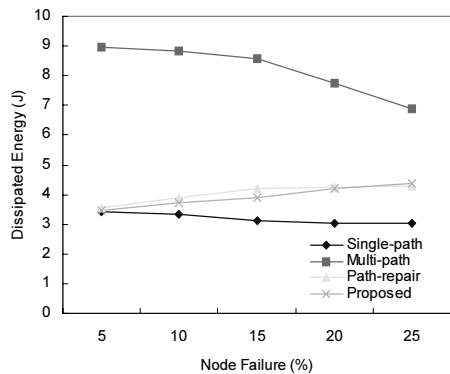
파라미터	값
노드의 수(N)	50, 100, 150, 200, 250
라디오 전송 범위	20m
링크 대역폭	250kbps
송신 전력	14.88mW
수신 전력	12.50mW
대기 전력	12.36mW
슬립 전력	0.016mW
데이터 수집 주기	1sec
중요 이벤트 발생 주기	50sec
데이터 변동률 기준	5%
노드 고장 확률(f)	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25
타깃 전달률(α)	0.9

5.2 에너지 소모 비교

평균 소모 에너지는 시뮬레이션이 종료되었을 때 각 노드의 전체 소모 에너지를 나타낸다. 그림 3은 각 라우팅 알고리즘의 평균 소모 에너지를 보여준다. 그림 3 (가)는 네트워크 사이즈에 따른 평균 소모 에너지를 보여준다. 각 노드의 고장 확률이 0.1 이고 센서 애플리케이션의 타깃 전달률은 0.9로 설정하였다. 제안 알고리즘의 독립경로의 수(k')은 식 (1)에 의해 산출된다. 다중 경로 라우팅 알고리즘의 경로 수는 3으로 정하였다. 3개의 독립경로는 평균 네트워크 사이즈($N=100$, 6홉)에서 타깃 전달률을 만족한다. 제안 알고리즘은 단일 경로 라우팅 알고



(가) 네트워크 사이즈에 따른 평균 에너지 소모량 (f=0.1)



(나) 노드 고장률에 따른 평균 에너지 소모량(N=100)

그림 3. 각 라우팅 알고리즘의 평균 에너지 소모량 비교: 단일 경로 라우팅 알고리즘, 다중 경로(3-disjoint path) 라우팅 알고리즘, 경로복구 라우팅 알고리즘, 제안 라우팅 알고리즘.

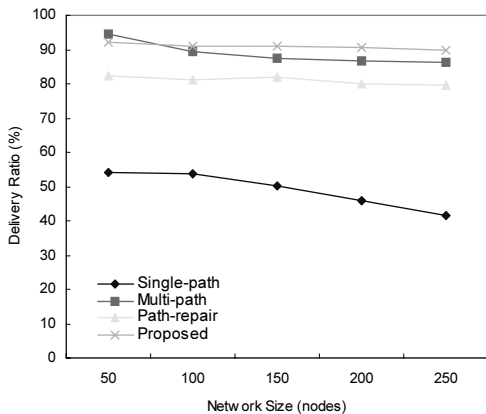
리즘 보다 13% 많은 에너지를 소모했다. 하지만 다중 경로 라우팅 알고리즘에 보다 128% 작은 에너지를 소모했고, 경로 복구 라우팅보다도 5% 작은 에너지를 소모하였다. 다중 경로 라우팅 알고리즘에서는 각 노드의 메시지 전송 횟수가 많아지므로 에너지 소모가 증가하고, 경로 복구 알고리즘은 상위 노드의 고장 시에 새로운 대안 경로를 찾기 위한 추가적인 메시지 송수신으로 에너지 소모가 증가한다. 이에 반해, 제안하는 알고리즘은 중요이벤트가 자주 발생하지 않으므로 대부분을 단일 경로로 동작하기 때문에 에너지 소모가 증가량이 크지 않다.

그림 3 (나)는 독립 노드의 고장 발생률에 따른 에너지 소모량을 보여준다. 센서 네트워크의 노드수가 100개이고 센서 애플리케이션의 타깃 전달률은 0.9로 설정하였다. 노드 고장 발생률이 클수록 노드의 송수신 메시지의 수가 줄어들므로 단일 경로와

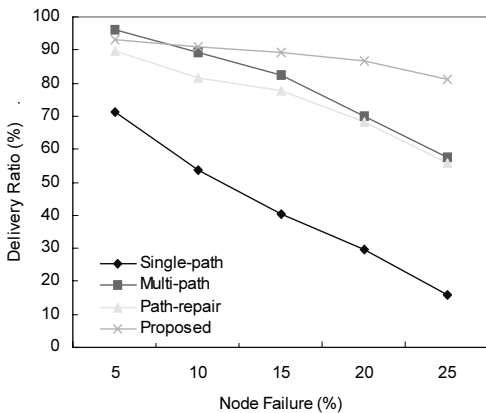
다중 경로 라우팅 알고리즘의 에너지 소모가 감소한다. 하지만, 경로 복구 알고리즘과 제안 알고리즘은 노드 고장 발생률이 클수록 에너지 소모가 증가한다. 경로 복구 알고리즘은 전송 경로 상에 고장난 노드가 많으면 새로운 대안 경로를 찾는 과정을 자주 수행해야하고, 제안 알고리즘은 노드 고장 발생률이 클수록 독립경로의 수가 증가하므로 에너지 소모가 더 증가한다.

5.3 중요 이벤트의 평균 전달률 비교

중요 이벤트의 이벤트 전달률은 전체 중요 이벤트의 수와 싱크노드에서 수신한 중요 이벤트의 수의 비를 의미한다. 시뮬레이션에서 중요 이벤트는 매 50초 마다 센서 네트워크의 임의의 지역에서 발생한다. 그림 4은 각 라우팅 알고리즘에 대해 중요 이벤트의 전달률을 비교한 것이다.



(가) 네트워크 사이즈에 따른 이벤트 전달률(f=0.1)



(나) 노드 고장률에 따른 이벤트 전달률(N=100)

그림 4. 각 라우팅 알고리즘의 중요이벤트의 이벤트 전달률 비교: 단일 경로 라우팅 알고리즘, 다중 경로(3 독립경로) 라우팅 알고리즘, 경로복구 라우팅 알고리즘, 제안 라우팅 알고리즘.

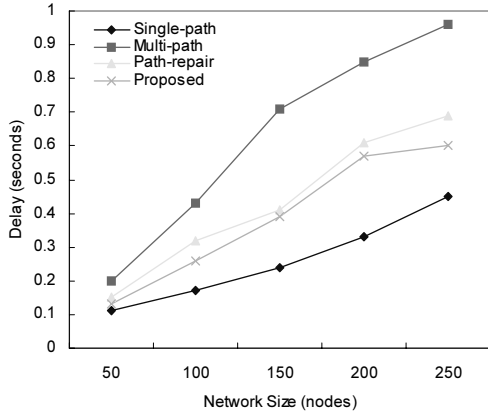
그림 4 (가)는 네트워크 사이즈에 따른 중요 이벤트의 전달률을 보여준다. 단일 경로 라우팅 알고리즘은 타깃 전달률($\alpha=0.9$)을 전혀 보장하지 못한다. 다중 경로 라우팅 알고리즘은 네트워크의 사이즈가 작을 때에는 타깃 전달률을 보장하지만, 네트워크 사이즈가 커짐에 따라 타깃 전달률을 만족하지 못한다. 네트워크 사이즈가 커짐에 따라 센서노드와 싱크노드의 홉수가 증가하지만, 다중 경로 알고리즘의 경로의 수는 고정되어 있으므로 네트워크 사이즈가 커질수록 이벤트 전달률이 떨어진다. 제안 알고리즘은 센서 애플리케이션의 타깃 전송률을 거의 대부분 만족한다. 제안 알고리즘에서 센서노드는 자신의 홉수에 따라 동적으로 k-독립경로를 생성하기 때문에 네트워크 사이즈에 상관없이 이벤트 전송률을 유지한다. 경로 복구 라우팅 알고리즘은 타깃-전달률($\alpha=0.9, 90\%$)보다 작은 81%의 전달률을 보였다. 경로 복구 라우팅 알고리즘은 일반적으로 대안 경로를 찾는데 부가적인 지연으로 인해 데이터 병합의 타임아웃 내에 메시지가 도착하지 않는 경우가 발생한다.

그림 4 (나)는 노드 고장률에 따른 중요 이벤트의 전달률을 보여준다. 노드 손실이 증가함에 따라, 이벤트 전달률은 감소한다. 하지만, 제안하는 알고리즘은 노드 고장률이 증가하더라도 적절한 수준의 이벤트 전달률을 유지함을 알 수 있다. 다중 경로 알고리즘은 노드 고장률에 상관없이 경로의 수가 고정되어있으므로 노드 고장률 증가에 따른 성능저하가 크다. 경로 복구 라우팅 알고리즘에서는 노드 고장률이 클수록 경로 상의 노드 고장이 빈번해지고 이웃 노드를 통해 새로운 경로를 찾기가 힘들어지므로 데이터 전달률이 많이 감소한다. 제안 알고리즘은 노드 고장률에 따라서 독립경로의 수가 결정되므로 다른 알고리즘에 비해 훨씬 견고하다.

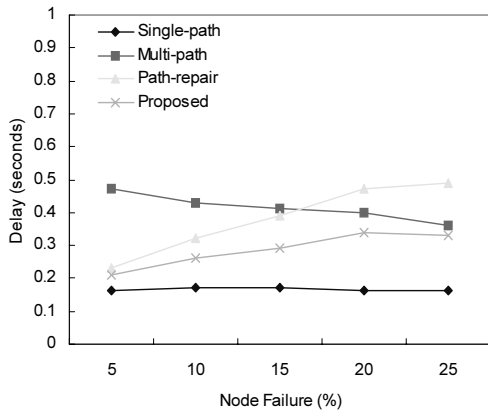
5.4 평균 전송지연 비교

평균 전송지연은 소스 노드로부터 싱크 노드까지 이벤트가 전달되는데 걸리는 평균 지연을 의미한다. 그림 5는 각 라우팅 알고리즘에 대해 측정된 평균 지연을 비교한 것이다.

그림 5 (가)는 네트워크 사이즈에 따른 평균 지연을 보여준다. 네트워크 사이즈가 증가함에 따라, 경로 상에 통과해야하는 노드의 수가 많아지므로 전송 지연이 커진다. 제안 알고리즘은 단일 경로 라우팅 알고리즘에 비해 15% 정도 전송지연이 늘어난다. 하지만, 경로 복구 알고리즘과 다중 경로 라



(가) 네트워크 사이즈에 따른 평균 전송지연(f=0.1)



(나) 노드 고장률에 따른 평균 전송지연(N=100)

그림 5. 각 라우팅 알고리즘의 평균 전송지연 비교: 단일 경로 라우팅 알고리즘, 다중 경로(3 독립경로) 라우팅 알고리즘, 경로복구 라우팅 알고리즘, 제안 라우팅 알고리즘.

우팅 알고리즘에 비해 각각 20%와 37% 정도의 전송지연을 줄일 수 있었다. 경로 복구 라우팅 알고리즘은 노드 고장이 있을 경우에 새로운 대안 경로를 찾고 메시지를 재전송하는데 부가적인 시간이 요구된다. 다중 경로 라우팅 알고리즘은 다수의 메시지 복사본을 다중 경로를 통해 전송하므로 전체적인 트래픽이 증가하여 무선 채널 상에 충돌이 자주 발생하여 백오프 지연이 더 길어진다. 제안 알고리즘은 중요한 이벤트를 감지한 노드에서만 k-독립경로를 통해 메시지를 전송하기 때문에 다중 경로 라우팅 알고리즘에 비해 트래픽 증가량이 작으므로 충돌로 인한 백오프 지연이 크지 않다. 제안 알고리즘에서 중요이벤트가 싱크에 가까운 지역에서 발생하면 k-독립경로의 수가 작고 단일 경로 라우팅에 비해 트래픽 증가량이 크지 않다. 싱크에서 멀리 떨어진

지역에서 중요 이벤트가 발생하면 k-독립경로의 수도 크고 트래픽 증가량이 많아진다.

그림 5 (나)는 노드 고장률에 따른 각 라우팅 알고리즘의 평균 전송지연을 보여준다. 다중 경로 라우팅 알고리즘의 전송지연은 노드 고장률이 클수록 감소한다. 노드 고장률이 클수록 네트워크 내의 트래픽이 감소하므로, 무선 채널 상에 충돌이 줄어들어 백오프 지연이 짧다. 하지만, 경로 복구 알고리즘과 제안 알고리즘의 전송지연은 노드 고장률이 클수록 증가한다. 노드 고장률이 높을수록 주위 노드의 고장이 자주 발생하므로 경로 복구 라우팅 알고리즘은 새로운 경로를 찾아서 메시지를 재전송하는데 걸리는 시간이 길어진다. 그림 5 (나)에서와 같이 15%정도의 노드 고장률부터 경로 복구 라우팅 알고리즘은 다중 경로 라우팅 알고리즘보다 전송지연이 더 길어진다. 노드 고장률이 클수록 제안 알고리즘은 더 많은 독립경로를 통해 메시지를 전송하고, 네트워크 내의 트래픽이 증가한다. 그 결과, 무선 채널의 충돌이 증가하여 백오프 지연이 길어진다. 하지만 제안 알고리즘은 다중 경로 알고리즘과 경로 복구 알고리즘보다 작은 전송지연을 가짐을 볼 수 있다. 제안 알고리즘의 지연이 노드고장률 20%과 25%에서 비슷한 이유는 네트워크 내의 트래픽 감소로 채널 충돌이 줄기 때문으로 예상된다.

5.5 연쇄 고장에 대한 고려

연쇄 고장은 폭발이나 화재 등으로 인해 인접지역 내의 다수 노드가 동시에 고장이 발생하는 것을 의미한다⁷⁾. 본 논문에서는 중요 이벤트 발생 시에 응용 애플리케이션의 타깃 전송률을 보장하기 위해 k-독립경로 알고리즘을 제안하였다. 하지만, k-독립경로 상의 노드가 연쇄 고장 발생지역에 배치되어 있으면, 제안 알고리즘의 이벤트 전달률은 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 독립 노드 고장과 연쇄 고장을 동시에 다루는 고장 모델을 현재 연구하고 있다. 연쇄고장은 센싱 지역 내의 반경(r)에 속하는 노드들의 고장으로 정의하고, 센싱 지역 내에서 랜덤하게 발생한다고 가정한다. 그리고 k-독립경로 상의 노드가 연쇄 고장에 포함될 확률은 연쇄 고장 중심으로 부터의 거리에 따라 정규분포를 따른다고 가정한다. 정의된 고장 모델로부터 독립 노드고장과 연쇄고장에도 타깃 전송률을 보장하는 독립경로의 수(k)를 결정해야 한다. 연쇄 고장에 대응하기 위한 다른 접근 방법으로는 연쇄 고장 지역을 우회하는 방법이 있다⁸⁾. 하지만, 이 방법은 새로운

경로를 탐색하는데 상당한 시간이 걸리므로 데이터 병합을 사용하는 센서 네트워크에 적합하지 않다.

VI. 결론 및 향후 연구과제

본 논문은 에너지 효율적인 k-독립경로 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘은 수집되는 데이터의 변동률을 이용하여 중요 이벤트를 감지하고, 응용 애플리케이션의 타깃 전달률에 따라서 독립경로의 수를 적응적으로 조절한다. 데이터 변동률이 기준값보다 작을 때에는 중요 이벤트가 발생하지 않은 것으로 간주하고 단일 경로(k=1)로 동작한다. 반면에, 데이터 변동률이 기준값보다 클 경우에는 중요 이벤트로 간주하고 타깃 전달률을 보장하기 위해서 k-독립경로(k>1)로 동작한다. k 값은 잘 정의된 고장 모델과 타깃 전달률에 의해 산출된다. 시뮬레이션 결과, 제안 알고리즘은 에너지 소모 측면에서 다중 경로 라우팅과 경로 복구 라우팅 알고리즘에 비해 각각 128%와 5%정도 에너지 소모를 줄였다. 또한, 제안 알고리즘은 다른 알고리즘보다 높은 타깃 전달률을 보였고 노드 고장률이 증가하더라도 이벤트 전달률을 유지하였다. 평균 지연 측면에서 제안 알고리즘은 단일 경로 라우팅 알고리즘에 비해 15% 정도 전송지연이 증가하였지만, 경로 복구 알고리즘과 다중 경로 라우팅 알고리즘에 비해 각각 20%와 37% 정도의 전송지연을 줄일 수 있었다.

향후 연구에서는 정의된 고장 모델로부터 독립 노드고장과 연쇄고장에도 타깃 전송률을 보장하는 독립경로의 수(k)를 결정하고 성능을 평가할 것이다. 또한, k-독립경로 라우팅 알고리즘과 달리, 연쇄 고장 지역을 우회하는 라우팅 경로를 동적으로 생성함으로써 이벤트 전달을 보장하는 새로운 라우팅 알고리즘에 대해 연구할 것이다.

참 고 문 헌

[1] P. Levis, S. Madden, D. Gay, J. Polastre, R. Szewczyk, A. Woo, E. Brewer, and D. Culler, "The Emergence of Networking Abstractions and Techniques in TinyOS," In Proc. USENIX/ACM Symp. Networked Systems Design and Implementation, 2004.
 [2] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A

Survey," Computer Networks, Vol. 38, 2002.
 [3] Y. Yao, and J. Gehrke, "Query Processing for Sensor Networks," In Proc. Conf. Innovative Data Systems Research, 2003.
 [4] S. Madden, R. Szewczyk, M. Franklin, and D. Cullera, "Supporting Aggregate Queries Over Ad-Hoc Wireless Sensor Networks," In Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 2002.
 [5] J. Deng, R. Han, and S. Mishra, "A Robust and Light-Weight Routing Mechanism for Wireless Sensor Networks ", In Proc. Workshop on Dependability Issues in Wireless Ad Hoc Networks and Sensor Networks, 2004.
 [6] F. Ye, G. Zhong, S. Lu, and L. Zhang, "GRAdient Broadcast: A Robust Data Delivery Protocol for Large Scale Sensor Networks," Wireless Networks, 2005.
 [7] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, and D. Estrin, "Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks," Mobile Computing and Communication Review, Vol 4, No. 5, 2001.
 [8] C. Karlof, Y. Li, and J. Polastre, "ARRIVE: Algorithm for Robust Routing in Volatile Environments," Report No. UCB//CSD-03-1233, Mar. 2003.
 [9] M. Ortolani, L. Gatani, and G. Re, "Robust Data Gathering for Wireless Sensor Networks," In Proc. IEEE International Conference on Networks, Nov. 2005.
 [10] D. Tian and N. Georganas, "Energy Efficient Routing with Guaranteed Delivery in Wireless Sensor Networks," In Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Mar. 2003.
 [11] A. Tolstikov, J. Biswas, C. Tham, "Data Loss Regulation to Ensure Information Quality in Sensor Networks" In Proc. Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information, Dec. 2005.
 [12] J. Baek, Y. Nam, and D. Seo, "ATS-DA: Adaptive Timeout Scheduling for Data Aggregation in Wireless Sensor Networks," In Proc. Int. Conf. Information Networking, Jan. 2007.

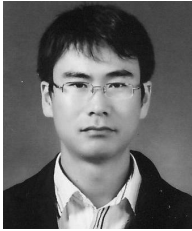
[13] VINT, "The Network Simulator NS-2," <http://www.isi.edu/nsnam>, Nov. 2005.

[14] Crossbow Technology Inc. Wireless Sensor Networks, http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAz_Datasheet.pdf

[15] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," In Proc. IEEE Conf. Computer Communications, Jun. 2002.

백 장 운 (Jang Woon Baek)

정회원



2002년 2월 : 경북대학교 전자전기공학부 졸업
 2004년 2월 : 경북대학교 전자공학 석사
 2007년 3월 ~현재 : 경북대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 센서네트워크, 모바일 컴퓨팅, 임베디드 시스템

일 컴퓨팅, 임베디드 시스템

남 영 진 (Young Jin Nam)

정회원



1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업
 1994년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석사
 2004년 3월 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 박사
 1994년~1998년 : 한국전자통신연

구원 컴퓨터연구단

2004년~현재 : 대구대학교 컴퓨터IT공학부 조교수

<관심분야> 네트워크 스토리지, 임베디드 SW, 무선네트워크

서 대 화 (Dae-Wha Seo)

중신회원



1981년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업
 1983년 2월 : 한국과학기술원 전산학과 석사
 1993년 2월 : 한국과학기술원 전산학과 박사
 1983년~1995년 : 한국전자통신

연구원 시스템S/W연구실

2004년~현재 : 경북대학교 임베디드소프트웨어연구센터장

1998년~현재 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수

<관심분야> 임베디드 SW, 병렬처리, 분산운영체제