

무선 센서 망에서 신뢰적 실시간 데이터 전송 프로토콜

양 태 훈*, 임 용 빈*, 정 관 수°

Reliable Real-Time Data Dissemination Protocol in Wireless Sensor Networks

Taehun Yang*, Yongbin Yim*, Kwansoo Jung°

요 약

본 논문은 실시간 전송을 위한 신뢰적 실시간 데이터 전송 프로토콜을 제안한다. 재전송은 전송 장애를 복구하는 방법으로 알려져 있지만, 딜레이로 인해 실시간 전송 요구사항에 위배될 수 있다. 제안하는 프로토콜은 브로드캐스팅과 시간적 기회 배분 방법을 이용한다. 센서노드의 전송범위 내에는 실시간 전송 요구사항을 만족하는 다수의 이웃노드가 존재할 수 있다. 모든 이웃노드들은 한 센서노드로부터 브로드캐스팅된 데이터를 수신할 수 있고, 각 이웃노드는 시간적 기회 배분 방법을 이용하여 배정된 전송 시간슬롯에 다음 홉 노드에게 데이터를 전달한다. 시간적 기회 배분 방법은 데이터 전송이 가능한 시간슬롯과 실시간 전송 요구사항을 만족시키는 전송 허용시간을 이용한다. 송신노드는 전송 제한시간을 전송 허용시간으로 나누어 다수의 시간슬롯을 생성하며, 각 이웃노드의 전송 허용시간에 따라 하나의 시간슬롯에 다수의 센서노드가 포함 될 수 있다. 각 시간슬롯에서 전송 허용시간이 가장 짧은 노드부터 전송 우선권을 부여해 가능한 많은 노드에게 데이터 전달 기회를 제공한다.

Key Words : sensor networks, wireless networks, reliability, real-time, data dissemination

ABSTRACT

This paper proposes a reliable real-time data dissemination protocol for mitigating transmission failure of real-time data in WSNs. The re-transmission is well-known for recovery of transmission failure, but this may violate the real-time requirement by transmission delay. To solve this problem, the proposed protocol exploits broadcasting nature and temporal opportunity allocation. In a radio-range of sending node, there may be neighbors satisfying the real-time requirement. The neighbors of specific node could receive data simultaneously by broadcasting, and decide their priority using temporal opportunity allocation method. The method uses time slot and tolerable time. The time slot specifies the priority and transmission deadline for each neighbors, and the tolerable time is the real-time requirement at the sending node. By giving the priority to the node with shorter tolerable time in each slot, we may get more opportunities to forward toward the destination. In other words, even if a node have the longer tolerable time, it still has a chance to forward with the real-time requirement. Simulation results show that the proposed protocol is superior to the existing protocols.

* 이 논문은 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference에서 "An opportunistic routing for real-time data in Wireless Sensor Networks"의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임.^[18]

* 본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2012R1A1A2044460)

◆ First Author : Chungnam National University Department of Computer Engineering, thyang@cclab.cnu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Chungnam National University Department of Computer Engineering, ksjung79@cnu.ac.kr, 정회원

* Chungnam National University Department of Computer Engineering, ybyim@cclab.cnu.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2015-04-110, Received April 2, 2015; Revised July 4, 2015; Accepted August 11, 2015

I. 서 론

본 무선 센서 망은 많은 수의 센서노드들로 구성되어 있으며, 센서노드는 제한된 에너지, 계산 능력과 통신 기능 등을 갖는다.^[1] 센서노드는 감지된 이벤트에 대한 데이터를 생성하고, 다중 홉 통신을 통해서 데이터를 싱크에게 전달한다.^[2] 무선 센서 망에서 군사지역 감지와 지진 대응 시스템과 같은 많은 응용들은 빠르게 변화하는 이벤트들과 상호작용하도록 맞춰져야만 하고, 응용에서 요구되는 제한시간 내에 이벤트 데이터를 수집해야만 한다. 지리적 실시간 데이터 전송 프로토콜들은^[3-5] 일반적으로 소스노드에서 목적지 노드까지 요구되는 전달 속도를 유지하고자 한다. 그 프로토콜들은 데이터 전달을 위한 노드로서 요구되는 전달 속도보다 더 빠른 전달 속도를 갖는 노드를 선택하지만, 정해진 시간 내에 데이터를 보내는 데에만 초점을 맞추었을 뿐 신뢰적 통신은 고려하지 않았다.

열악한 무선 환경의 센서 망에서 신뢰적 통신을 위해 개발된 라우팅 프로토콜들이 있다. 이들 중 일부는 신뢰적 데이터 전송 방법으로 소스노드나 전달노드가 패킷 손실을 감지하고 오류를 복구하기 위한 재전송 방식을 기반으로 하는 프로토콜들이^[6-8] 있다. 이 프로토콜들은 다음 홉 노드로서 오직 하나의 센서노드를 선택하고 선택된 노드에게 데이터를 전송한다. 선택된 노드에게 데이터 전송을 실패한 경우, 신뢰성 향상을 위해서 이웃노드에게 데이터 재전송을 요구해야만 한다. 다른 방법으로는 다중경로 라우팅 방식을 이용하는 프로토콜들이^[9,10] 있다. 이 프로토콜들은 패킷을 여러 개로 복사하고 다수의 경로를 통해서 데이터를 전달한다. 데이터 중복성은 높은 신뢰성을 갖는 통신을 제공할 수 있다.

하지만, 위에서 언급한 신뢰적 데이터 전송 프로토콜들은 여전히 몇 가지 문제를 갖고 있다. 재전송 프로토콜들은 전송 장애를 복구하는 방법으로 잘 알려져 있지만, 실시간 전송 요구사항에 위배될 수 있는 딜레이를 발생시킨다. 딜레이로 인해 선택되지 못한 센서노드들은 데이터를 전달하기 위한 기회를 잃을 수도 있다. 그리고 다중경로 라우팅 프로토콜들은 데이터 전달 확률을 증가시키지만, 모든 패킷이 목적지 노드에 도착할 것이라고 장담할 수 없다. 또한 과도한 에너지 소모로 인한 네트워크의 수명을 단축시킬 수 있고, 트래픽 혼잡을 발생시킬 수 있다.

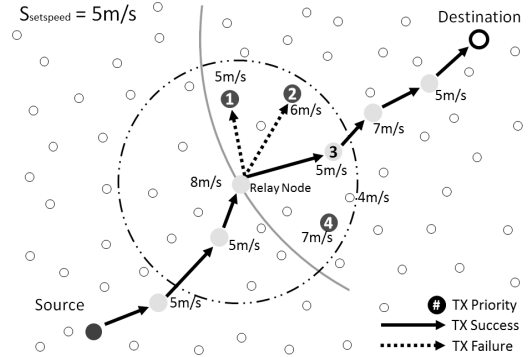


그림 1. 제안 방안에서의 신뢰적 실시간 전송
Fig. 1. The reliable real-time dissemination in proposed protocol

위와 같은 문제들을 해결하기 위해, 본 논문에서는 브로드캐스팅 특성과 시간적 기회 배분 방법을 이용하여 신뢰성을 증가시키기 위한 신뢰적 실시간 데이터 전송 프로토콜을 제안한다. 무선 통신의 특성에 의해 송신노드의 모든 이웃노드들은 송신노드가 브로드캐스팅된 데이터를 동시에 수신할 수 있다. 그림 1과 같이, 송신노드의 이웃노드들 중에는 실시간 전송 요구사항을 만족시킬 수 있는 다수의 센서노드들이 존재할 수 있고, 각 센서노드는 시간적 기회 배분 방법에 의해서 결정되는 우선순위에 따라 전송을 성공할 때까지 순차적으로 데이터 전송을 수행한다. 즉, 실시간 전송 요구사항을 만족시키는 노드들에게 다음 홉 전송노드가 될 수 있는 기회를 부여한다. 시간적 기회 배분 방법은 데이터 전송이 가능한 시간슬롯과 실시간 전송 요구사항을 만족시키는 전송 허용 시간을 이용한다. 송신노드가 전송 제한시간을 전송 허용 시간으로 나누어 다수의 시간슬롯을 생성하며, 각 이웃노드의 전송 허용 시간에 따라 하나의 시간슬롯에 다수의 센서노드가 포함 될 수 있다. 각 시간슬롯에서 전송이 가능한 노드들 중 가장 짧은 전송 허용 시간을 갖는 센서노드에게 우선순위를 부여함으로써, 소스노드는 데이터를 목적지 노드에게 전달하는 데 더 많은 기회를 가질 수 있다. 즉, 긴 전송 허용 시간을 갖는 센서노드가 오랜 시간 동안 기다린다고 할지라도, 여전히 실시간 전송 요구사항에 위배되지 않고 전달할 수 있는 기회를 갖고 있다. 더 나아가, 본 논문에서 제안하는 프로토콜은 오직 하나의 경로만을 생성하기 때문에 망 전체 에너지 소모를 감소시킬 수 있다. 시뮬레이션을 통해서 제안하는 프로토콜이 실시간 데이터 전송과 에너지 소비의 관점에서 기존의 실시간 프로토콜들보다 우수하다는 것을 보여준다.

II. 관련 연구

본 장에서는 실시간 전송 보장을 기반으로 데이터 전송의 신뢰성 향상에 대한 관점에서 관련연구들을 살펴본다. 실시간 데이터 전송의 신뢰성은 소스노드에서 송신한 데이터 패킷의 수 대비 목적지 노드에 도달한 패킷의 수를 말한다.

SPEED^[3]는 시공간적 접근법을 통해 실시간 전송을 보장하는 방안을 제안한다. SPEED는 지리적 라우팅을 기반으로 단일 홉 내의 정보만을 이용한다. 소스노드는 싱크노드까지 거리와 실시간 응용에서 요구하는 제한시간을 통해 데이터 전송을 위한 요구 전달 속도를 계산한다. 매 홉마다 요구 전달 속도보다 높은 전달 속도를 보장하는 센서노드를 선택해서 전송한다. 그리고 전송 과정에서 음영지역을 만나면 이전 노드에게 음영지역의 존재를 알림으로써 다른 경로로 전송하도록 한다. 따라서 다음 전송되는 데이터의 전송 실패를 방지하여, 전체적인 데이터 전송의 신뢰성을 보장한다. 그러나 SPEED에서는 데이터 각각에 대한 전송 신뢰성은 보장하지 못하는 문제가 있다.

MMSPEED^[4]는 데이터 전송의 신뢰성과 실시간 전송의 QoS를 보장하기 위해 다중경로 및 다중속도를 활용하는 방안을 제안한다. SPEED처럼 센서노드가 하나의 전달 속도를 보장하는 데 반해 MMSPEED는 센서노드가 가상의 다중 속도 계층을 갖는다. 노드 간 데이터 전달 과정에서 노드의 처리 속도에 따라서 감소되는 데이터의 실제 전달 속도를 보완하는 방법으로, 높은 전달 속도의 속도 계층을 이용해 해당 데이터의 실시간 전송을 보장해준다. 그리고 노드 간 전송 성공 확률을 계산하여, 응용에서 요구하는 데이터 전송의 신뢰성에 미치지 못하면 다중 경로를 생성하여 전송한다. MMSPEED는 실시간 전송과 데이터 전송의 신뢰성을 모두 보장하는 것처럼 보이지만, 센서노드가 보장할 수 있는 최고 전달 속도가 실시간 전송을 보장하지 못한다면 데이터 각각의 신뢰성은 보장하지 못한다. 그리고 다중 경로를 생성하기 때문에 데이터 전송 과정에서 에너지 소모가 크다.

ORRP^[18]는 실시간 전송을 보장하며 기회적 라우팅을 통해 데이터 전송의 신뢰성을 향상시키는 방안을 제안한다. 매 홉마다 실시간 요구사항을 만족하는 센서노드 하나만을 선택해서 전송하는 SPEED와 달리, ORRP는 단일 홉 내 실시간 요구사항을 만족하는 센서노드들을 전송 후보 노드로 활용한다. 각 노드의 전송 가능한 시간에 따라 전송 우선순위가 정해지며, 우선순위가 가장 높은 노드부터 순차적으로 전송을

시도한다. 하나의 노드가 전송을 성공하면, 전송 기회를 갖고 있던 나머지 노드들은 전송을 중지한다. 이를 통하여 소스노드와 목적지 노드 사이에 단일 경로가 구성되며, MMSPEED에 비해 에너지 소모량도 적다. 그러나 단일 홉 내 전송 후보 노드가 없거나 후보 노드가 전송을 모두 실패한 경우 데이터 전송에 실패한다.

THVR^[19]은 실시간 데이터 전송의 신뢰성을 높이기 위해서 2-홉 속도의 정보를 이용하는 방안을 제안한다. 모든 센서노드들은 2-홉의 이웃노드까지 속도 정보를 수집한다. 수집된 정보를 이용하여, 각 경로당 실시간 데이터 전송의 성공률을 예측한다. 더 높은 전송 성공률을 갖는 경로를 선택하여 데이터를 전송함으로써 데이터의 신뢰성은 증가한다. 그러나 다중 홉 정보를 수집한다는 것은 에너지 소모가 심하기 때문에 자원이 제한적인 센서노드 망에 치명적이다. 즉, 센서노드가 에너지를 소진한다면 네트워크의 수명에 직접적인 영향을 주게 되며 데이터 전송의 신뢰성에도 문제가 발생한다.

III. 제안 방안

3.1 제안하는 프로토콜 설계

본 절에서는 시스템 가정, 시공간적 접근법과 제안하는 프로토콜(Reliable Real-time Routing Protocol; RRRP)의 패킷 헤더를 정의한다.

3.1.1 가정

제안하는 프로토콜은 다음과 같이 무선 센서 망에서 실시간 라우팅과 지리적 라우팅 프로토콜들에^[11] 대한 연구들에서 이용된 가정을 사용한다.

(1) 다수의 센서노드들은 넓은 지역에 균등하게 분포 되어있다. 노드들은 애드 혹 망을 자가 구성하며, 장거리 데이터 전달은 다중 홉으로 전달된다.

(2) 이벤트가 발생하면 센서노드들은 이벤트 주변에 있는 정보를 수집하고, 그 센서노드들 중 한 노드는 데이터를 생성하는 소스노드가 된다.^[12]

(3) 소스노드들은 싱크노드의 위치 서비스 중 하나로 싱크노드의 위치를 제공할 수 있다.^[12,13]

(4) 센서노드는 GPS 신호나^[14] 위치 측정 기술들을^[15] 사용함으로써 자신의 위치를 인지한다.

(5) 센서노드는 이웃노드와 주기적인 비콘 신호 교환을 하여 수집된 각 이웃노드의 홉 딜레이와 지리적 좌표가 포함된 테이블을 갖는다.^[13,4]

(6) 기본적으로 센서노드는 같은 세기로 전파를 송출하지만 필요에 따라 전파의 세기를 동적으로 조절

할 수 있다.^[17]

3.1.2 시공간적 접근법

기존 실시간 데이터 전송 프로토콜들^{[3][4]} 응용에서 요구하는 시간 $T_{deadline}$ 내에 소스노드에서 싱크노드까지 패킷을 전달하기 위해서 시공간적 접근법을 이용한다. 다중 홉 통신에서 종단 간 딜레이는 단일 홉 딜레이(시간)뿐만 아니라 데이터 전송 거리(공간)에도 영향을 받는다. 실시간 데이터 전달을 위해, 소스노드들은 식(1)과 같이 요구되는 시간 $T_{deadline}$ 과 종단 간 거리 $D_{src,dst}$ 를 이용하여 요구되는 전달 속도를 계산한다.

$$S_{setspeed} = \frac{D_{src,dst}}{T_{deadline}} \quad (1)$$

전송 경로 상의 각 노드는 자신의 다음 홉 노드로써 요구되는 전달 속도 $S_{setspeed}$ 보다 더 빠른 전달 속도를 제공할 수 있는 노드를 선택한다. 전달 속도 $S_{setspeed}$ 는 각 노드에서의 지리적 진보를 각 노드의 패킷 전달 딜레이로 나누어 구할 수 있다. 종단 간 실시간 데이터 전송은 소스노드에서 싱크노드까지 요구되는 전달 속도를 유지함으로써 이루어진다.

Source Node (4bytes)	Destination Node (4bytes)	
Previous Node (4bytes)	Delivery Speed (2bytes)	Sequence Number (2bytes)
Time slot of node # (4bytes)	Coordinates of node # (4bytes)	
.	

그림 2. 패킷 헤더
Fig. 2. Packet header

3.1.3 패킷 헤더 정의

RRRP에 대한 정보는 실시간 패킷의 헤더에 포함되어 있다. 패킷 헤더의 메시지 포맷은 그림 2와 같이 구성되며, 다음과 같이 정의된다.

(1) 소스노드와 목적지 노드의 좌표 (Source Node, Destination Node): 소스노드와 목적지(싱크)노드의 좌표는 지리적 라우팅을 위해 필요하며, 패킷이 전달되는 동안 변경되지 않는다.

(2) 이전 전달노드(송신노드)의 좌표(Previous Node): 목적지까지의 진행 경로를 확인할 수 있다.

(3) 요구되는 전달 속도 (Delivery Speed): 소스노드에 의해 계산되고 목적지노드에 도착하기까지 만족되어야 하며, 변경되지 않는다.

(4) 패킷 연속 번호 (Sequence Number): 패킷의 중복 수신을 검사한다.

(5) 시간슬롯과 지리적 좌표 (Time slot, Coordinates): 전달 후보 노드 목록으로써 시간슬롯과 지리적 좌표를 한 쌍으로 한다. 시간슬롯은 센서노드의 데이터 전달을 위한 시간대를 가리키며, 지리적 좌표는 센서노드의 위치를 가리킨다.

3.2 제안하는 프로토콜 동작

본 절에서는 신뢰적 실시간 라우팅 프로토콜 (RRRP)의 동작과정 설명과 그림을 보여준다.

3.2.1 신뢰적 실시간 라우팅 프로토콜 (RRRP)

RRRP는 다수의 센서노드 간의 상호작용으로 동작한다. 무선 센서 망에서 데이터는 전형적으로 다중 홉 통신으로 전달된다. 소스노드는 전달할 데이터가 생성되면 이웃노드 중 패킷을 수신할 다음 홉 노드를 결정한다. 송신노드와 단일 홉 내 수신 후보 노드의 관점에서 이 프로토콜을 설명한다.

모든 센서노드는 비콘 신호를 교환하며 이웃노드 정보를 수집한다. 이웃노드들의 정보는 각 센서노드들의 지리적 좌표와 단일 홉 딜레이로 구성된다.^[3] 센서노드는 그 정보를 이용하여 자신의 이웃노드가 실시간 전송 요구사항을 만족하는지 판단하여 수신 후보노드를 결정한다. 만약 초기 전송 범위 내에 전송 요구사항을 만족하는 노드가 없는 경우, 전송 범위를 넓혀 추가적인 이웃노드의 정보를 통해서 수신 후보노드를 결정한다. 송신노드는 전송 제한시간을 다수의 시간슬롯들로 나누고 이웃노드들을 각각 배정한다. 패킷은 배정된 시간슬롯 테이블을 포함하여 모든 이웃노드에게 단일 홉 브로드캐스팅을 통해 전달된다. 송신노드로부터 패킷을 받은 각 수신 노드는 패킷 헤더의 정보를 통해 자신에게 배정된 시간슬롯을 계산하고 그 시간으로 타이머를 설정한다. 이 타이머를 통해서 각 노드의 전달 순서가 정해지며, 타이머가 만료된 후 자신의 모든 이웃노드들에게 데이터를 전달한다. 중복 전송이나 충돌을 피하기 위해 동일한 데이터를 수신하면 타이머를 취소한다. 하지만 전송에 성공한 센서노드의 범위 내에 후보 노드 전부가 포함될 수 없다. 그래서 송신노드가 자신이 송신한 것과 동일한 데이터를 수신하면 다른 이웃노드들의 타이머 해제를 위한 제어 패킷을 보낸다.

3.2.2 신뢰적 라우팅을 위한 다음 홉 노드 선택

비콘 신호를 통해 교환하는 정보는 센서노드의 지리적 위치와 단일 홉 딜레이이다. 다른 실시간 데이터 전송 프로토콜들과 유사하게, 각 센서노드는 이웃노드의 정보가 저장된 테이블을 갖는다. 패킷을 전달하기 전에 센서노드는 (소스노드를 포함) 자신의 테이블 정보를 통해서 패킷을 수신할 후보 노드들을 선택한다. 이웃노드 집합 NS_i 는 센서노드 i 의 무선 범위 내에 다수의 이웃노드를 포함한다. 센서노드 i 는 NS_i 에 포함되어있는 센서노드들의 지리적 좌표와 단일 홉 딜레이를 저장한다. NS_i 는 전달 집합과 비전달 집합으로 구분된다. 전달 후보 집합에 대해서, RRRP는 지리적 좌표로 송신노드보다 목적지 노드에 더 가까운 노드들을 선택한다. 송신노드는 각 노드 j 의 전달 속도 $S_{reqspeed}^j$ 를 식(2)에 따라서 계산한다.

$$S_{reqspeed}^j = \frac{D_{i,dst} - D_{j,dst}}{hopdelay_i^j} \quad (2)$$

$D_{n,dst}$ 는 노드 n 과 목적지 노드간의 거리이고 $hopdelay_i^j$ 는 노드 i 에서 노드 j 까지 단일 홉 딜레이이다. 전달 후보 집합에는 오직 요구되는 전달 속도 $S_{setspeed}$ 보다 더 빠른 전달 속도를 갖는 이웃노드들만 포함된다. 요구되는 단일 홉 딜레이 $T_{hopdeadline}^j$ 는 노드 i 와 j 사이의 거리를 이용하여 식(3)에 따라서 계산한다.

$$T_{hopdeadline}^j = \frac{D_{i,sink} - D_{j,sink}}{S_{setspeed}} \quad (3)$$

$S_{setspeed}$ 는 소스노드에 의해 계산된 요구되는 전달 속도이고 패킷 헤더에 포함된다. 다수의 후보 노드들 중에서 $hopdelay_i^j < T_{hopdeadline}^j$ 을 만족하는 노드들만 최종 전달 후보 노드로서 선택된다. 각 센서노드 j 에서는 $hopdelay_i^j$ 부터 $T_{hopdeadline}^j$ 의 사이 시간이 실시간 전송 요구사항을 만족하는 데이터 전달 시간이 되며, 실시간 전송 허용 시간이라 한다.

3.2.3 센서노드의 전송 범위 확장

기존 ORRP^[18]는 이웃노드들 중 실시간 요구사항을 만족하는 노드가 없거나 전달 후보 노드들이 모두 전송을 실패한 경우 데이터 전달 신뢰성을 떨어뜨리는 문제가 있다. RRRP는 기회적 라우팅 방식의 문제

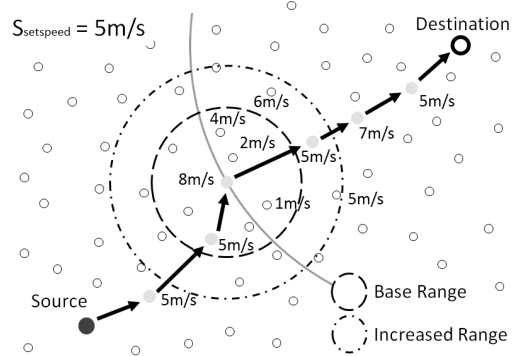


그림 3. 전송 범위의 동적 확장
Fig. 3. Dynamic expansion of the transmission range

점을 보완하기 위한 방법을 제안한다. 제안방법은 그림 3과 같이, 초기 전송 범위 내 실시간 요구사항을 만족하는 노드가 없는 경우 전송 범위를 넓혀 실시간 요구사항을 만족하는 노드를 찾는다. 전송 범위는 센서노드의 전파 송출 세기에 따라 조절된다.^[17]

센서노드의 전송 범위 내에 존재하는 이웃노드의 수는 네트워크의 크기 $A_{network}$ 와 배치된 노드의 수 N 그리고 전송 범위의 크기 $A_{transmission}$ 를 이용하여 식(4)에 따라 계산된다.^[11]

$$N_{neighbornodes} = \frac{N * A_{transmission}}{A_{network}} \quad (4)$$

식(4)에 따라 센서노드의 전송 범위가 증가할수록 이웃노드의 수가 증가함을 알 수 있다. 실시간 요구사항을 만족하는 노드를 찾을 때까지 초기 전송 범위에서 일정 단위로 거리를 늘려나간다. 발견된 노드는 데이터 전달을 위한 후보 노드로 사용된다. 전달 후보 노드가 모두 전송을 실패한 경우 전송 범위를 확장하지 않는다. 각 홉에서 전송을 성공할 때까지 전송 범위를 확장하도록 한다면, 새로운 전달노드를 찾기 위해 추가적인 에너지 소모가 발생하게 되어 네트워크의 수명이 줄어들게 된다.

3.2.4 데이터 전달 시간슬롯 배정

앞서 언급된 것처럼, 수신 노드 j 는 $hopdelay_i^j$ 에서 $T_{hopdeadline}^j$ 까지 패킷을 전달 할 수 있다. 하지만, 각 수신 노드가 스스로 패킷을 전달할 것을 결정한다면, 중복 전송이나 패킷 충돌이 빈번하게 일어나고 데이터 전송 성공률을 감소시킨다. 이 문제를 예방하기 위해서, 송신노드는 요구되는 전송 제한시간을 실시간

전송 허용 시간으로 나누어 다수의 시간슬롯을 생성하고, 실시간 요구사항을 만족하는 후보 노드들을 각각 배정한다. 그림 4처럼, 각 후보 노드는 패킷 전달이 가능한 다수의 시간슬롯을 가질 수 있다. RRRP는 실시간 전송 허용 시간의 배정을 위해 다음과 같은 규칙을 적용한다.

- (1) 각 슬롯에 노드가 단 하나 일 때, 각 슬롯은 그 노드에게 배정된다.
 - (2) 각 슬롯에 노드가 두 개 이상일 때, 각 슬롯은 배정되지 않은 시간슬롯의 수가 가장 작은 노드에게 배정된다.
 - (3) 각 슬롯에 노드가 두 개 이상일 때, 노드가 배정되지 않은 시간슬롯은 목적지(싱크) 노드에 가장 가까운 노드에게 배정된다.
 - (4) 슬롯에 배정이 확정된 노드는 각 슬롯에서 배정 후보에서 제외된다.
 - (5) 각 슬롯에는 하나의 노드만 배정된다. 배정되지 못한 노드는 전달 후보 노드에서 제외된다.
- 위 규칙은 실시간 통신을 위한 데이터를 전달하기

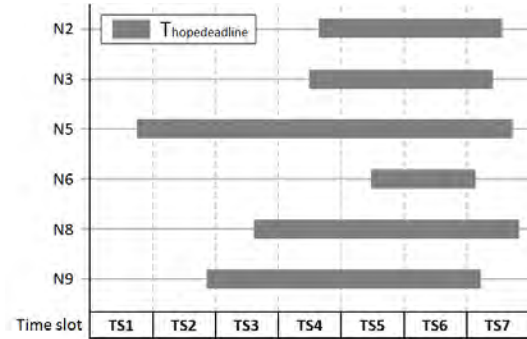


그림 4. 다음 홉 노드들의 시간슬롯 구성
Fig. 4. The time slots of next-hop node candidates

	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7
Stage 1		N5(0/5) N9(0/4)	N5(0/5) N9(0/4)	N5(0/5) N8(0/3) N9(0/4)	N2(0/3) N3(0/3) N5(0/5) N8(0/3) N9(0/4)	N2(0/3) N3(0/3) N5(0/5) N6(0/1) N8(0/3) N9(0/4)	
Stage 2		N5(1/4)	N5(1/4) N9(1/3)	N5(1/4) N9(1/3) N8(1/2)	N5(1/4) N9(1/3) N8(1/2) N3(0/3) N2(0/3)	N5(1/4) N9(1/3) N8(1/2) N6(1/0) N3(0/3) N2(0/3)	
Stage 3		N5(1/4)	N5(1/4) N9(1/3)	N5(1/4) N9(1/3) N8(1/2)	N5(1/4) N9(1/3) N8(1/2) N3(1/2) N2(0/3)	N5(1/4) N9(1/3) N8(1/2) N6(1/0) N3(1/2) N2(0/3)	

Node # (The number of assigned time slot / The number of unassigned time slot)

그림 5. 시간슬롯에 이웃노드를 배정하는 과정
Fig. 5. The stages for assigning the time slot to neighbors

위해서 더 많은 기회들을 제공할 수 있기 때문에 신뢰성을 증가시킬 수 있다. 예를 들어, 그림 5처럼, TS2에서 TS6까지 각 시간슬롯들은 다수의 후보 이웃노드를 갖는다. 첫 번째 규칙에 의해서 노드 N5는 시간슬롯 TS2에 배정된다. 두 번째 규칙에 의해서 N6, N8, N9는 각각 TS6, TS4, TS3에 배정된다. 마지막으로, 세 번째 규칙에 의해서 N3은 시간슬롯 TS5에 각각 배정된다. 배정된 시간슬롯 테이블은 다음 홉 후보 노드들의 데이터 전달을 결정하기 위해서 패킷 헤더에 포함된다. 패킷에는 시간슬롯 정보와 배정된 노드의 좌표가 한 쌍으로 하나 이상 존재한다.

3.2.5 수신 노드의 데이터 전달 결정

패킷을 수신한 센서노드는 헤더에 포함된 전달 후보 노드 목록을 통해 전달 여부를 결정한다. 먼저, 패킷을 브로드캐스팅하면 모든 이웃노드들은 그 패킷을 수신할 수 있으며, 각 노드들은 자신이 전달 후보 노드 목록에 포함되어 있는지 확인한다. 그림 6처럼, 전달 후보 노드들(C1, C2, C3)은 한 송신노드로부터 패킷을 수신한 후 타이머를 시작한다. 그러나 C1노드는 패킷을 성공적으로 수신하지 못했기 때문에 타이머를 시작할 수 없다. 후보 노드들이 패킷을 동시에 전송하기 때문에 발생할 수 있는 충돌 문제로 인해 전송이 실패 될 수 있다. 패킷을 수신한 C2노드는 타이머가 정상적으로 종료되면 다음 홉 노드에게 패킷을 전달한다. 이때 C3노드는 C2노드가 전송한 패킷을 수신하여 자신의 타이머를 취소하고 패킷을 버린다. C2노드의 단일 홉 전송 범위 내에 존재하지 않는 다른 후보 노드들의 중복 전송 문제를 해결하기 위해서, 송신노드는 자신이 송신한 것과 동일한 데이터를 수신하면 다른 후보 노드들의 타이머 해제를 위한 제어 패킷을 보낸다.

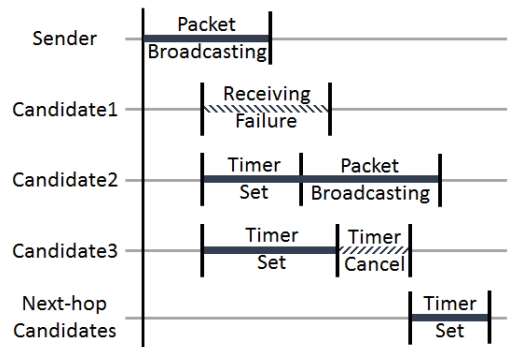


그림 6. 데이터 전송 시간 다이어그램
Fig. 6. Time diagram for data delivery

IV. 성능 평가

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 실시간 데이터 전송 확률과 에너지 소모에 대한 RRRP의 성능을 실험한다.

4.1 시뮬레이션 환경

QualNet 4.0^[16]을 이용하여 각 프로토콜을 구현했다. 본 장에서는 이웃노드의 전달 속도 정보를 기반으로 하는 실시간 프로토콜인 SPEED^[3], MMSPEED^[4], ORRP^[18], THVR^[19] 그리고 RRRP를 비교했다. 네트워크 환경은 500개의 센서노드로 구성되어 있으며, 500m*500m의 지역에 균등히 분포된다. 각 센서노드의 무선 범위는 약 50m이다. 소스노드는 30bytes 패킷을 0.5초 간격으로 생성한다. 시뮬레이션 시간은 50초이며, 요구되는 신뢰성은 85%이다. 각 그래프는 시뮬레이션을 100회 수행한 결과의 평균값이다.

4.2 성능 평가 요소

1) 제한시간 내 성공률 (Time Deadline Success Ratio; TDSR): 소스노드로부터 생성된 모든 패킷들에 대해 제한시간 이내에 성공적으로 수신된 패킷들의 비율을 가리키며, 패킷전달의 신뢰성을 의미한다.

2) 에너지 소모 (Energy Consumption; EC): 실시간 데이터 전송을 위한 센서노드들이 소모한 에너지 총량을 의미한다. 센서노드의 전송 범위는 에너지 소모량에 영향을 주며, 송신과 수신의 에너지 소모량은 MICA2 사양을 참고했다.^[17]

4.3 종단 간 거리의 영향

그림 7과 8은 종단 간 거리의 영향을 보여준다. 종단 간 거리는 100-500m이다. 그림 7에서, SPEED는 종단 간 거리가 길수록 제한시간 내 성공률은 줄어들었다. SPEED는 패킷 신뢰성을 고려하지 않아서 수많은 패킷들이 손실되었기 때문이다. MMSPEED는 계산된 신뢰도가 요구되는 신뢰도에 미달될 때 다중 경로를 사용함으로써 TDSR이 증가하기 때문에 요구되는 신뢰성과 비슷해진다. THVR은 2-홉 정보를 이용하여 전송이 불가능한 음영지역을 회피함으로써 TDSR을 높이지만, 패킷 신뢰성은 고려하지 않아 SPEED와 마찬가지로 성공률은 줄어든다. ORRP는 요구되는 신뢰도를 보장하기 위해서 다수의 노드를 전달 후보 노드로 활용함으로써 TDSR이 증가한다. RRRP는 전송 범위 확장을 통해 ORRP에 비해 더 많은 노드를 활용하기 때문에 ORRP보다 높은 TDSR을

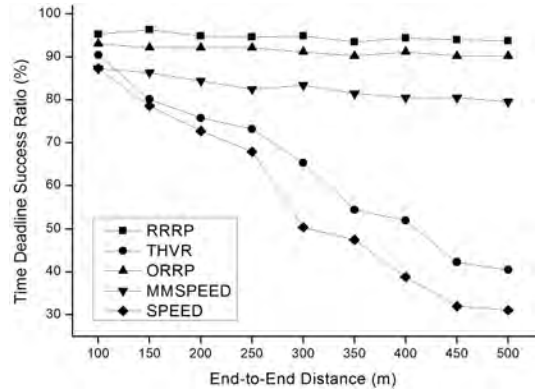


그림 7. 종단 간 거리에 따른 TDSR 영향
Fig. 7. Time Deadline Success Ratio impacted by End-to-end Distance

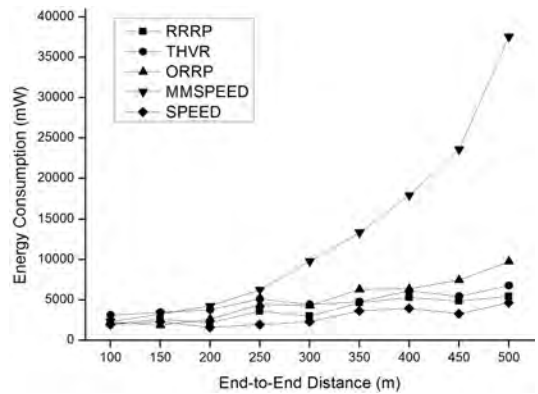


그림 8. 종단 간 거리에 따른 에너지 소모 영향
Fig. 8. Energy Consumption impacted by End-to-end Distance

보인다.

그림 8에서, SPEED, ORRP, RRRP는 소스노드와 목적지 노드 사이에 단일 경로를 생성하기 때문에 비슷한 양의 에너지를 소모한다. THVR은 전송 초기 단계에서 2-홉의 정보를 수집하기 때문에 에너지 소모가 크지만, 전송과정에서는 단일 경로를 생성하기 때문에 위의 프로토콜들과 에너지 소모량은 유사하다. 반면, MMSPEED는 종단 간 거리가 길어질수록 많은 수의 다중 경로를 생성하므로, 나머지 프로토콜보다 많은 양의 에너지를 소모한다. RRRP는 전송 범위를 확장하기 위해 추가적인 에너지 소모를 발생시킨다. 그럼에도 ORRP와 큰 차이가 없는 이유는 전송 범위가 확장된 만큼 종단 간 전송 거리의 홉 수가 줄어들었기 때문이다.

4.4 센서노드 수의 영향

센서노드 수가 증가할수록 센서노드의 밀집도도 증

가되기 때문에 각 센서노드의 이웃노드 수도 증가한다. 그림 9와 그림 10은 센서노드 수의 영향을 보여준다. 센서노드 수는 200-700개이다. 그림 9에서, SPEED와 THVR은 다음 홉 노드로서 하나의 노드를 선택하기 때문에 센서노드 수가 증가하더라도 TDSR이 증가하지 않는다. 반면, MMSPEED, ORRP, RRRP는 데이터 전송을 위해 다수의 이웃노드들을 활용하기 때문에 높은 TDSR을 보인다. 또 RRRP는 전송 범위를 확장함에 따라 더 많은 이웃노드들을 활용할 수 있기 때문에 ORRP보다 높은 TDSR을 보인다.

그림 10에서, SPEED, ORRP, THVR, RRRP는 소스노드와 목적지 노드 사이에 하나의 경로만을 생성하기 때문에 비슷한 양의 에너지를 소모한다. MMSPEED는 다중 경로를 생성하므로 다른 프로토콜보다 많은 양의 에너지를 소모한다.

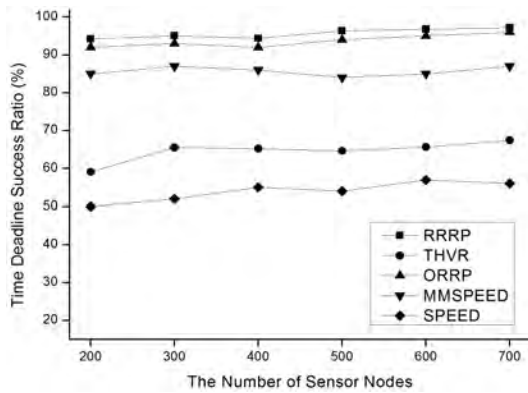


그림 9. 센서노드 수에 따른 TDSR 영향
Fig. 9. Time Deadline Success Ratio impacted by the Number of Sensor Nodes

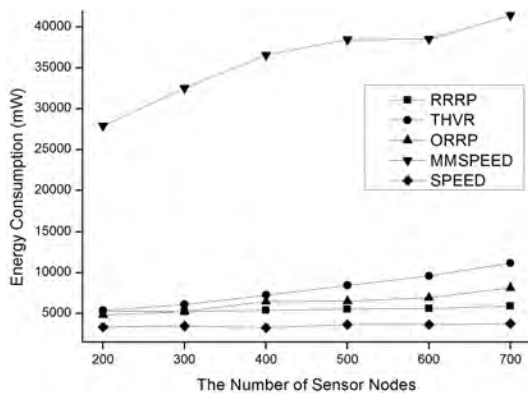


그림 10. 센서노드 수에 따른 에너지 소모 영향
Fig. 10. Energy Consumption impacted by the Number of Sensor Nodes

4.5 종단 간 제한시간의 영향

그림 11과 12는 종단 간 제한시간의 영향을 보여준다. 종단 간 제한시간은 500-1500ms이다. 그림 11에서, RRRP는 다수의 센서노드들에게 더 많은 데이터 전달 기회를 제공하며, 후보 노드의 추가 확보 방안을 제공하기 때문에 다른 프로토콜들 보다 더 높은 TDSR을 갖는다. 다른 프로토콜들은 모두 실시간 전송을 보장하기 때문에, TDSR은 종단 간 제한시간의 영향을 거의 받지 않는다.

종단 간 제한시간이 늘어남에 따라, 요구되는 전송 속도는 낮아지게 된다. 즉, 매 홉마다 전달 후보 노드로 활용되는 노드들이 증가하게 된다. 그림 12에서, MMSPEED는 경로 생성이 빈번하게 발생하고 데이터 전송에 많은 센서노드들이 사용되기 때문에 많은 양의 에너지를 소모한다. THVR은 2-홉 정보를 수집하며, 수집된 정보를 통해 경로 예측기법을 사용하여 데이터를 전송한다. 그리고 ORRP는 데이터 전달에

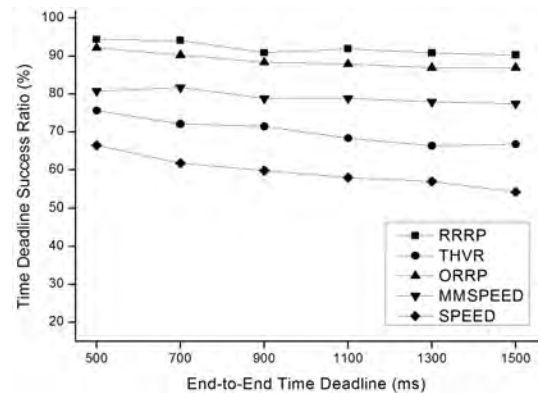


그림 11. 종단 간 제한시간에 따른 TDSR 영향
Fig. 11. Time Deadline Success Ratio impacted by the End-to-end Time Deadline

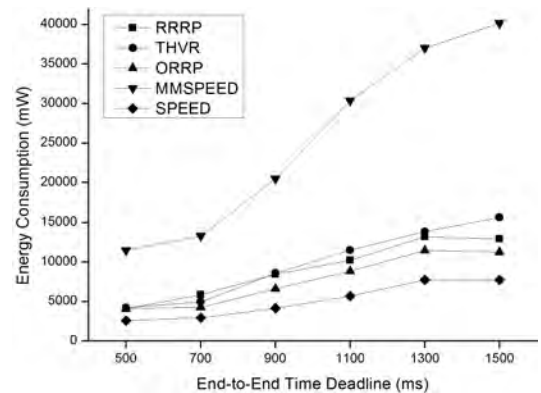


그림 12. 종단 간 제한시간에 따른 에너지 소모 영향
Fig. 12. Energy Consumption impacted by the End-to-end Time Deadline

다수의 센서노드가 참여하지만, 하나의 경로만을 생성하기 때문에 SPEED와 비슷한 양의 에너지를 소모한다. RRRP는 ORRP와 마찬가지로 하나의 경로를 생성하지만, 후보 노드가 존재하지 않는 경우 전송 범위를 확장한다. 따라서 추가적인 에너지 소모가 발생하지만, 홉 수가 줄어들기 때문에 전송에 참여하는 센서 노드의 수가 감소하기 때문에 에너지 소모의 큰 차이는 없다.

V. 결 론

본 논문은 무선 센서 망에서 실시간 데이터 전송의 신뢰성을 증가시키기 위한 신뢰적 실시간 라우팅 프로토콜을 제안한다. 재전송 방식은 딜레이를 발생시키기 때문에 실시간 데이터 전송에 적용될 수 없다. 제안하는 프로토콜은 브로드캐스팅 특성과 시간적 기회 배분 방법을 이용하여, 실시간 전송이 가능한 다수의 이웃노드들에게 데이터 전달 기회를 제공한다. 이웃노드가 존재하지 않는 경우 노드의 전송 범위를 확장함으로써 그 문제를 해결한다. 그 결과, 실시간 전송 환경에서 재전송 방식을 사용하지 않고 보다 신뢰성 높은 라우팅을 할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 제안하는 프로토콜이 제한시간 내 데이터 전송과 에너지 소모 측면에서 기존의 실시간 데이터 전송 프로토콜들 보다 더 우수함을 보였다.

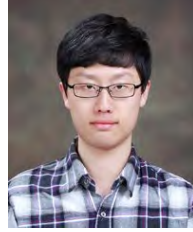
References

- [1] I. F. Akyildiz, et al., "A survey on sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [2] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: A survey," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, Dec. 2004.
- [3] T. He, et al., "A spatiotemporal communication protocol for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 16, no. 10, pp. 995-1006, Oct. 2005.
- [4] E. Felemban, C. Lee, and E. Ekici, "MMSPEED: multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 5, no. 6, pp. 738-754, Jun. 2006.
- [5] S. Lee, et al., "RREM: Multi-hop information based real-time routing protocol to support event mobility in wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 38A, no. 8, pp. 688-696, Aug. 2013.
- [6] Y. Sankarasubramaniam, et al., "ESRT: Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks," in *Proc. 4th ACM Int. Symp. Mob. Ad Hoc Netw. Comput. (MobiHoc '03)*, pp. 177-188, Annapolis, MD, USA, Jun. 2003.
- [7] F. Stann and J. Heidemann, "RMST reliable data transport in sensor networks," in *Proc. IEEE Int. Workshop Sensor Netw. Protocols and Appl.*, pp. 102-112, Anchorage, AK, USA, May 2003.
- [8] B. Cho, et al., "Channel aware reliable routing protocol in wireless multimedia sensor networks," *JKIICE*, vol. 18, no. 2, pp. 459-465, Feb. 2014.
- [9] A. Srinivas and E. Modiano, "Minimum energy disjoint path routing in wireless Ad-hoc networks," in *Proc. 9th Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw. (MobiCom '03)*, pp. 122-133, San Diego, California, USA, Sept. 2003.
- [10] K. Jung, et al., "Flexible disjoint multipath routing protocol using local decision in wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 38B, no. 11, pp. 911-923, Nov. 2013.
- [11] F. Ye, et al., "A Two-Tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks," in *Proc. 8th Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw. (MobiCom '02)*, pp. 148-159, Atlanta, Georgia, USA, Sept. 2002.
- [12] D. Liu, I. Stojmenovic, and X. Jia, "A scalable quorum based location service in ad hoc and sensor networks," *2006 IEEE Int. Conf. MASS*, pp. 489-492, Vancouver, BC, Canada, Oct. 2006.
- [13] F. Yu, et al., "Sink location service for geographic routing in wireless sensor networks," *2008 IEEE WCNC*, pp. 2111-2116, Las Vegas, NV, USA, Mar. 2008.
- [14] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless

networks,” in *Proc. 6th Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw. (MobiCom '00)*, pp. 243-254, Boston, Massachusetts, USA, Aug. 2000.

- [15] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, “GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices,” *IEEE Pers. Commun. Mag.*, vol. 7, no. 5, pp. 28-34, Oct. 2000.
- [16] Scalable Network Technologies, Qualnet, [online] available: <http://www.scalable-networks.com>.
- [17] J. Vales-Alonso, et al., “Performance evaluation of MAC transmission power control in wireless sensor networks,” *Computer Netw.*, vol. 51, no. 6, pp. 1483-1498, Apr. 2007.
- [18] S. Oh, et al., “An opportunistic routing for real-time data in wireless sensor networks,” *2013 IEEE WCNC*, pp. 1157-1162, Shanghai, China, Apr. 2013.
- [19] Y. Li, et al., “Enhancing real-time delivery in wireless sensor networks with two-hop information,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 5, no. 2, pp. 113-122, May 2009.

양 태 훈 (Taehun Yang)



2014년 8월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 졸업
2014년 9월~현재 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> Wireless Sensor Networks, IoT 등

임 용 빈 (Yongbin Yim)



2010년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 졸업
2010년 3월~현재 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석사통합과정
<관심분야> Internet Routing, Wireless Sensor Networks 등

정 관 수 (Kwansoo Jung)



2005년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 졸업
2007년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석사 졸업
2015년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사 졸업
<관심분야> Internet Routing,

Wireless Sensor Networks, D2D, 5G 등