

논문 2007-44TC-1-19

무선 센서 네트워크에서 링크 에러율을 고려한 실시간 데이터 전달 기법

(A Real-Time Data Transfer Mechanism Considering Link Error Rates
in Wireless Sensor Networks)

최재원*, 이광휘**

(Jae-Won Choi and Kwang-Hui Lee)

요약

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 지연시간에 민감한 데이터를 실시간으로 전달하는 기법을 제안하였다. 실시간 전송을 위한 기존의 방식들은 단순히 전달 지연이 짧은 경로 혹은 홉 수가 작은 경로를 선택한다. 하지만, 이러한 방식들은 링크 에러율을 고려하지 않았으므로, 전송 오류가 발생하는 경우에는 재전송으로 인하여 실시간 전송을 보장하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 링크 에러율을 고려하여 실시간 전송 경로를 선정하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 기법은 이웃 노드들 간의 링크 에러율에 기반하여 홉 간의 전송 지연시간을 추정함으로써 종단 간 기대되는 지연시간을 계산한다. 소스 노드는 가장 짧은 전달 지연시간을 가진 경로를 실시간 경로로 선택하고 데이터를 전송한다. 링크의 에러율에 따른 다양한 실험을 통하여 제안 방식이 데이터 전달 속도를 향상시키고 지연 지터를 감소시킨다는 사실을 확인하였다. 또한, 전송 오류와 재전송의 상대적인 감소로 인하여 에너지 소비가 줄어들고 네트워크 수명이 연장된다는 사실을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, we have presented a real-time transfer mechanism for the delay-sensitive data in WSNs (Wireless Sensor Networks). The existing methods for real-time data transfer select a path whose latency is shortest or the number of hops is least. Although the approaches of these methods are acceptable, they do not always work as efficiently as they can because they had no consideration for the link error rates. In the case of transmission failures on links, they can not guarantee the end-to-end real-time transfer due to retransmissions. Therefore, we have proposed an algorithm to select a real-time transfer path in consideration of the link error rates. Our mechanism estimates the 1-hop delay based on the link error rate between two neighboring nodes, which in turn enables the calculation of the expected end-to-end delay. A source node comes to choose a path with the shortest end-to-end delay as a real-time route, and sends data along the path chosen. We performed various experiments changing the link error rates and discovered that this proposed mechanism improves the speed of event-to-sink data transfer and reduces delay jitter. We also found that this mechanism prevents additional energy consumption and prolongs network lifetime, resulting from the relative reduction of transmission failures and retransmissions.

Keywords : WSNs, Wireless Sensor Networks, Routing, Real-Time, Delay

I. 서론

무선 센서 네트워크는 자가 구성 능력을 가진 네트워

크로서 환경, 군사, 보안, 건강, 스마트 홈 등의 분야에서 광범위하게 활용될 수 있다^[1]. 센서 노드는 일반적으로 악조건의 환경에 무작위로 배치되는 경우가 많으므로 접근하거나 관리하기 어렵다^[1]. 따라서 센서 노드의 배터리는 충전되거나 교체될 수 없다고 가정한다. 이러한 이유로 인하여 무선 센서 네트워크 분야에서의 많은 연구들은 개별 센서 노드들의 에너지 효율을 향상시키는데 초점이 맞추어져 있다^[2, 3]. 또한, 무선 센서 네트

* 학생회원, ** 정회원, 창원대학교 컴퓨터공학과
(Dept. of Computer Engineering, Changwon
National University)

※ 본 논문은 정보통신부의 정보통신기술연구지원
사업(B1220-0601-0040)으로 수행된 결과의 일부임.
접수일자: 2006년10월19일, 수정완료일: 2007년1월14일

워크는 비교적 많은 수의 노드들로 구성되며 이들의 메모리 용량은 매우 작다고 알려져 있다. 이로 인하여 개별 센서 노드들이 네트워크 전체에 대한 정보를 모두 유지하기는 어렵다^[1]. 센서 노드들은 단지 자신의 이웃에 관한 정보만 유지할 수 있으며, 이러한 제약은 QoS(Quality of Service) 보장이나 효율적인 전송을 어렵게 하는 요인이 된다^[4, 5]. 그럼에도 불구하고, 최근에는 무선 센서 네트워크의 응용 분야가 더욱 다양해지고 있다. 또한, 적용 분야에 따라 정확성, 신뢰성, 실시간 등에 대한 요구사항이 다르다. 따라서 무선 센서 네트워크를 위한 프로토콜은 에너지 고려사항 외에도 데이터의 특성에 따라 다른 종류의 QoS를 제공할 필요가 있다^[6].

본 논문에서는 지연시간에 민감한 데이터를 실시간으로 전달하는 기법을 제안한다. 기존의 연구들은 실시간 전송을 위하여 단순히 지연시간이 짧은 경로 혹은 홉 수가 적은 경로를 선택한다. 하지만, 이러한 방식들은 링크의 상태를 고려하지 않고 있으므로 기대하는 지연시간 내에 데이터를 전달하지 못할 수도 있다. 이와 관련한 사항은 II장 1절에서 다룬다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 Directed Diffusion^[7-9]이라는 데이터 전파 메커니즘을 이용하며, II장 2절에서 이를 간략하게 설명한다. 제안하는 기법의 구체적인 알고리즘은 III장에서 기술하고, IV장에서 실험 결과를 분석한다. 그리고 마지막으로 V장에서 결론을 맺고 향후 연구 과제를 언급한다.

II. 관련 연구

본 장에서는 무선 센서 네트워크에서의 실시간 데이터 전송과 관련된 몇몇 기존 연구들을 소개하고 문제점을 분석하고자 한다. 그리고 본 알고리즘을 적용할 Directed Diffusion의 동작 방식에 대하여 설명한다.

1. 실시간 전송에 관한 연구

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서의 실시간 데이터 전송 방식을 제어에 의한 방식과 경로 선택에 의한 방식으로 구분한다. 제어에 의한 방식은 데이터 전송 속도를 향상시키기 위하여 스케줄링, 전력, 토폴로지 등을 관리 및 조정하는 방식이다^[10-15]. 경로 선택에 의한 방식은 지연시간이 짧은 경로를 실시간 전송 경로로 선정하는 방식이다. 본 논문에서 제안하는 기법은 후자에 해당하므로 이에 관한 문제점을 분석하며, 전자

구체적인 기법들에 대해서는 언급하지 않도록 한다.

기존의 SPEED^[16] 또는 MMSPEED^[17]와 같은 지역적 경로 선택 방식들은 이웃 노드에 대한 정보를 기반으로 하여 싱크 노드까지의 전달 지연시간을 추정함으로써 경로를 선택한다. 이들은 자신과 이웃한 노드 및 싱크 노드의 위치를 알고 있으며, 피드백 제어 신호를 통하여 이웃 노드까지의 지연시간을 알 수 있다고 가정하고 있다. 그리하여 이웃 노드까지의 지연시간을 이용하여 싱크 노드까지의 지연시간을 거리에 비례하도록 추정하는 방식이다. 이러한 방식들은 자신과 이웃한 다음 홉의 노드로부터 싱크 노드까지의 링크 상태를 전혀 고려하지 못하고 있다. 즉, 지역적 추정에 의한 불확실성으로 인하여 기대하는 시간 내에 데이터 전달이 이루어지지 않을 수 있으며, 최악의 경우에는 링크의 단절조차 예측하지 못한다.

Directed Diffusion이라는 데이터 중심적 라우팅 패러다임은 Interest 패킷의 전파 과정을 이용하여 경사(gradient)를 설정함으로써 경로가 선택된다. 기본적으로 선호하는 경사는 Interest 패킷의 전파 지연시간이 가장 짧은 경로이다. EDDD^[18] 방식은 Directed Diffusion 프로토콜 패밀리 중에서 One-Phase Pull Diffusion^[9] 방식을 이용하여 종단 간의 홉 수가 가장 적은 경로를 선택한다. 이와 같은 방식들은 링크 상에서 전송 오류가 발생하는 상황을 반영하지 못하고 있다. 부연하여 설명하면, 무선 센서 네트워크의 일반적인 특징들 중의 하나는 링크의 채널 오류가 다른 네트워크에 비해 상대적으로 매우 높다는 것이다^[1, 4, 5]. 링크 오류가 발생하면 MAC 계층에서의 재전송이 수반된다. 하지만, 위와 같은 방식들은 재전송으로 인한 추가적인 지연시간을 고려하지 않고 있다. 따라서, 본 논문에서는 링크의 에러율을 반영하여 전송 지연시간을 추정함으로써 실시간 전송 경로를 선택하고자 하는 것이다. 이에 대한 구체적인 사항은 III장에서 설명하도록 한다.

2. Directed Diffusion의 동작

본 논문에서 제안하는 실시간 데이터 전달 기법은 데이터 전파를 위하여 One-Phase Pull Diffusion을 이용한다.

Directed Diffusion은 무선 센서 네트워크를 위한 대표적인 데이터 중심적 라우팅 기법이다. 최근에 다양한 응용들을 만족시킬 수 있도록 하기 위하여 Directed Diffusion을 확장한 프로토콜 패밀리가 발표되었다^[9]. 기존 방식인 Two-Phase Pull Diffusion 이외에 Push

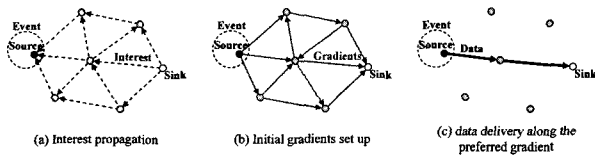


그림 1. One-Phase Pull Diffusion의 동작 개요
 Fig. 1. Simplified schematic for One-Phase Pull Diffusion.

Diffusion과 One-Phase Pull Diffusion이 추가되었다. 그 중에서 One-Phase Pull Diffusion은 그림 1과 같이 싱크 노드가 Interest를 플러딩하고, 이를 수신한 소스 노드가 선호하는 경사 방향으로 데이터를 바로 전송하는 방식이다. 여기서 선호하는 경사란 지연시간이 가장 짧은 경로를 가리킨다. 이러한 구조는 본래의 Directed Diffusion에 비하여 플러딩을 줄일 수 있고, 강화(reinforcement) 메시지의 필요 없이도 지연이 작은 경로가 선택된다는 장점이 있으므로 QoS를 제공하기에 더욱 적합하다. 또한, IEEE 802.11과 같은 많은 프로토콜들도 링크의 대칭성을 요구하기 때문에 링크가 대칭적이어야 한다는 One-Phase Pull Diffusion의 가정도 적절하다고 할 수 있다^[9].

III. 제안 알고리즘

본 장에서는 지연시간에 민감한 데이터를 실시간으로 전송하기 위한 경로 선택 알고리즘을 제안한다. 그림 2를 이용하여 무선 센서 네트워크에서의 실시간 경로 선택에 관한 기존 방식들의 문제점을 분석하고 제안 기법의 특징을 설명하도록 한다.

그림 2에서 노드 Src가 노드 Sink로 데이터를 전송하기 위한 경로는 3개, 즉 $P_A(Src - A_1 - Sink)$, $P_B(Src - B_2 - B_1 - Sink)$, $P_C(Src - C_3 - C_2 - C_1 - Sink)$ 가 존재한다. 설명을 위하여 본 연구에서 사용한 몇 가지 가정들을 먼저 기술하도록 한다. 각 노드에서의 대기시간이나 처리지연 등은 모두 동일하다고 가정

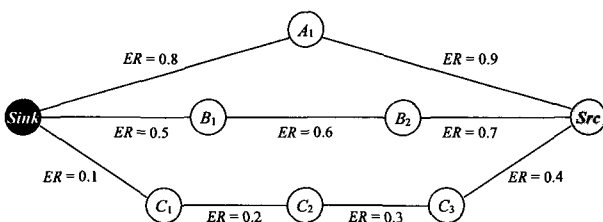


그림 2. 실시간 전송 경로 선택을 위한 예제
 Fig. 2. Example for real-time path selection.

한다. 또한, 임의의 링크에서 전송 오류가 발생할 수 있으며, 각 링크의 에러율은 동적으로 변한다고 가정한다. 그리고 각각의 노드들은 자신과 이웃하는 노드들까지의 링크 에러율 정보만을 유지한다고 가정한다. 환경적인 요인 등의 문제로 인하여 링크에서 전송 오류가 발생하면, MAC 계층에서 타이머를 이용하여 이를 판별하고 재전송을 수행하며, 이는 상위 계층에 즉시 통보되는 것으로 가정한다.

먼저, 홉 수를 기준으로 하여 실시간 경로를 선택하는 방식^[18]을 고찰해 보자. 이 방식에서는 홉 수가 가장 적은 경로인 P_A 가 선택된다. 하지만, 경로 P_A 는 그림에서 보는 것처럼 가장 짧은 거리의 경로가 아니므로, 가장 짧은 거리의 경로인 P_B 보다 전파 지연시간은 더 길게 된다. 따라서 다른 요인들을 배제한다면, 경로 P_A 는 종단 간의 지연시간을 최소화하고 데이터를 실시간으로 전달하기 위한 경로로 부적절하다. 다음으로, 지연시간을 기준으로 하여 실시간 경로를 선택하는 방식^[16, 17]을 살펴보자. 이 방식에서는 가장 짧은 거리의 경로인 P_B 가 실시간 전송 경로로 선택된다. 하지만, 경로 P_B 상의 특정한 링크에서 전송 오류가 발생하게 된다면, 경로 P_A 를 통하여 데이터를 전송하는 것보다 더 늦어질 수 있다. 왜냐하면, 일반적으로 전송 오류를 판별하기 위해서는 최소한 단방향 전파 지연시간의 2배 이상에 해당되는 시간이 필요하고, 그 시간이 경과된 후에 다시 재전송이 수행되기 때문이다. 따라서, 종단 간의 전달 지연시간이 가장 짧은 경로를 선택하는 문제는 단순한 전파 지연시간보다는 링크 상에서의 전송 오류에 더욱 큰 영향을 받게 된다. 이는 경로 P_A 의 경우에도 마찬가지이다. 결론적으로, 링크 상의 에러율을 반영하면, 앞에서 설명한 기존의 방식들에서는 오류를 판별하기 위한 시간과 재전송을 수행하기 위한 시간의 소비로 인하여 알고리즘이 사전에 고려하지 못한 추가적인 지연이 발생할 수 있다. 또한, 전송 오류 발생, 패킷 손실 판별, 재전송 수행 과정이 수차례 연속해서 반복적으로 나타날 수도 있다. 즉, 링크의 상태를 고려하지 않고 단순히 홉 수나 전파 지연시간만을 계산하여 경로를 설정하는 것은 실시간 전송의 실패를 초래할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 링크의 에러율이 다른 네트워크에 비하여 높다고 알려져 있는 무선 센서 네트워크의 특징을 반영하여 실시간 전송 경로를 선택하고자 한다.

제안 알고리즘의 설명을 위하여 그림 2의 각 링크에는 특정한 에러율(ER)이 할당되어 있다. 그림 2의 링크 에러율은 제안 알고리즘을 설명하기 위한 것으로서, 실

제로는 임의의 값을 가지게 될 것이다. 링크 에러율을 개별적인 하나의 패킷 전송 측면에서 보면, 비율이 높거나 낮거나에 관계없이 전송 오류는 발생할 수도 있고 발생하지 않을 수도 있다. 즉, 에러율은 전송이 실패할 가능성을 나타내는 확률값이기 때문에 개별적인 패킷의 전송 실패 유무는 비결정적이다. 그러므로 링크의 에러율 정보에만 의존하여 종단 간의 전달 신뢰성이 높은 경로를 실시간 전송 경로라고 단정하기는 어렵다. 이러한 이유로 인하여, 본 논문에서는 에러율과 지연시간을 동시에 고려하여 실시간 전송 경로를 선정하고자 한다.

제안 알고리즘에서는 특정한 노드가 자신과 이웃한 다른 하나의 노드로 데이터를 송신할 때 기대할 수 있는 전송 지연시간을 식 1과 같이 계산한다. 식 1은 전송에 소요될 것으로 기대되는 시간과 오류가 발생하여 이를 판별하는데 소요될 것으로 기대되는 시간의 합을 의미한다. 즉, 식 1의 값은 하나의 홉에서 하나의 패킷을 송신할 때, 에러율에 따른 전송 오류의 판별과 재전송을 수행하는데 소요되는 일련의 지연시간들을 오류 발생 횟수에 비례하도록 추정하는 값이다.

$$DLY_{ij} = \frac{1}{1 - ER_{ij}} \times DL_{ij} + \frac{ER_{ij}}{1 - ER_{ij}} \times DT_{ij} \quad (1)$$

DLY_{ij} : 두 노드 i 와 j 사이에서 기대되는 전송 지연시간

ER_{ij} : 두 노드 i 와 j 사이의 링크 에러율

DL_{ij} : 두 노드 i 와 j 사이의 전파 지연시간

DT_{ij} : 두 노드 i 와 j 사이에서 전송 오류를 판별하는데 소요되는 시간

식 1에 의하여 전송 지연시간을 계산하는 것은 네트워크를 구성하는 각각의 노드들이 자신으로부터 이웃한 다른 노드들까지의 링크 에러율을 모두 알고 있다는 가정^[6, 17]에 기반한다. 이러한 방법으로 계산된 값은 식 2에 의하여 홉을 거칠 때마다 더해지면서 Interest 패킷에 포함되어 전파된다. 결국, Interest 패킷을 수신하는 특정한 노드는 자신으로부터 싱크 노드까지의 종단 간 전송 지연시간을 식 1과 식 2에 의하여 추정하게 된다.

$$DLY_{n,0} = \sum_{i=1}^n DLY_{i,i-1} \quad (2)$$

싱크 노드가 플러딩한 Interest 패킷 내의 질의에 부합하는 데이터를 감지한 센서 노드는 소스 노드가 된다. 이 때 자신이 유지하고 있는 여러 방향의 경사들 중에서 DLY 값이 가장 작은, 즉 기대되는 지연시간이 가

장 짧은 경로를 실시간 전송 경로로 선택한다. 만약 이 값이 동일한 경로들이 존재한다면, 에너지 소비를 줄이기 위하여 홉 수가 적은 경로를 선택한다. 설명을 돕기 위하여 그림 2에 있는 모든 링크 상에서의 전파 지연시간(DL)은 1, 하나의 홉에서 전송 오류를 판별하는데 소요되는 시간(DT)은 4라고 가정하였다. 물론, 실제 환경에서 이것은 전송 거리에 비례하는 다른 값을 가질 수 있다. 식 1과 식 2에 의하면, 그림 2에 있는 3개의 경로에 대하여 기대되는 종단 간의 전달 지연시간은 각각 $DLY_{P_A} = 67$, $DLY_{P_B} \approx 27.16$, $DLY_{P_C} \approx 11.28$ 이다. 기존의 다른 방식들과는 달리, 제안 알고리즘에 의하면 경로 P_C 가 실시간 전송 경로로 선택된다. 그림 2에서 보는 것과 같이, 경로 P_C 는 3개의 경로들 중에서 홉 수도 가장 많고 전파 지연시간도 가장 길다. 하지만, 경로 P_C 의 기대되는 종단 간의 전달 지연시간(DLY_{P_C})은 가장 짧은 값을 나타내고 있다.

따라서, 제안 알고리즘은 전파 지연시간이 짧고 전송 오류가 발생할 가능성은 낮은 경로를 선택하도록 함으로써 지연시간과 에러율을 동시에 고려한 확률적 추정 기법이라고 할 수 있다. 이는 제안 기법이 다른 방식들보다 더 느린 경로를 선택할 가능성도 배제할 수 없다는 의미를 내포하고 있다. 에러율이 높더라도 특정한 패킷의 전송 시에는 오류가 발생하지 않을 수도 있기 때문이다. 하지만, 링크의 에러율을 가정하고 실험을 수행하면, 전송 오류의 발생 가능성을 전혀 고려하지 못하고 있는 기존의 방식들에 비하여 제안 기법은 종단 간의 전달 지연시간이 가장 짧은 경로를 훨씬 더 높은 비율로 선택한다는 것을 알 수 있다. 이와 관련한 구체적인 실험 결과는 IV장 3절에서 언급하도록 한다.

IV. 실험 결과 분석

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 기존의 방식들처럼 단순히 지연시간이나 홉 수만을 고려하는 것이 아니라, 링크의 에러율을 지연시간과 함께 고려하여 실시간 전송 경로를 선택하고 데이터를 전달하는 기법이다. 본 장에서는 선택된 경로 상으로 데이터를 전송하는 실험을 통하여 종단 간의 지연시간 및 지터를 다른 방식들과 비교한다. 또한, 제안 기법이 네트워크 수명에 미치는 영향도 분석한다.

성능 분석을 위한 비교 대상은 지역적 선택 방식과 기존의 Directed Diffusion이다. 지역적 선택 방식에 해당하는 예로는 본 논문의 II장에서 언급한 SPEED와

표 1. 실험 파라미터 설정

Table 1. Configuration of experiment parameters.

Item	Value
Network topology	10×10 grid
Number of nodes	100
Initial energy of each node	1 J
Transmitting power	0.175 W
Receiving power	0.175 W
Packet size	1024 bits
Interarrival time	10 ms
Bandwidth	2 Mbps

MMSPEED가 있다. 이 기법들은 이웃 노드까지의 지연시간과 위치 정보에 기반하여 종단 간 지연시간을 추정한다. 그런데, 본 논문에서 각각의 노드들은 자신의 이웃 노드들에 대한 링크 에러율 정보만을 유지한다고 가정하였다. 따라서, SPEED 및 MMSPEED와의 직접적인 비교는 어려우므로, 본 장에서의 지역적 선택 방식은 링크 에러율 정보만을 이용하여 홉 단위로 신뢰성이 높은 방향으로 데이터를 전달하는 방식이다. 한편, 기존의 Directed Diffusion은 종단 간 지연시간이 가장 짧은 경로를 선택하는 방식이다. 본 논문의 가정들과 실험 환경에 의하면, EDDD가 Directed Diffusion의 데이터 전파 메커니즘을 이용하여 선택하는 종단 간의 홉 수가 가장 적은 경로는 기존의 Directed Diffusion이 선택하는 경로와 동일하게 된다. 따라서, 지연시간 및 홉 수를 기반으로 하는 방식들과의 성능 비교는 기존의 Directed Diffusion을 이용한 실험을 통하여 이루어진다.

앞에서도 언급한 것처럼 본 논문에서 제안하는 실시간 경로 선택 기법은 One-Phase Pull Diffusion에 적용되었으며, 데이터 전파 메커니즘을 프로그래밍으로 직접 구현하여 실험하였다. 시뮬레이션 환경과 파라미터 설정은 표 1과 같으며, 10×10개의 노드들을 이용하여 그리드 형태로 실험 네트워크를 구성하였다. 그리고 에러율은 매회 패킷 전송 시마다 랜덤한 값을 생성하여 각각의 링크에 할당하였다. 또한, 이웃한 두 노드 사이의 지연시간으로 아래와 같은 시간 단위를 할당하였다.

- (a) 상하/좌우에 위치하는 노드 사이의 전파 지연시간 = 1.00
- (b) 대각선으로 위치하는 노드 사이의 전파 지연시간 = 1.41

이웃하는 두 노드 사이에서 전송 오류가 발생할 경우, 송신 노드가 이를 판별하기 위해서는 최소한 단방향 전파 지연시간의 2배 이상에 해당되는 시간이 필요하며, 이 값은 프로토콜의 구현이나 응용에 따라 가변적이다.

본 논문에서는 전파 지연시간의 4배수에 해당되는 시간을 필요로 하는 것으로 설정하였다. 즉, 전송 오류를 판별하는데 소요되는 시간으로는, 상하 또는 좌우에 위치하는 노드들의 경우에는 4.00, 대각선 방향으로 위치하는 노드들의 경우에는 5.64라는 시간 단위를 할당하였다. 그리드 형태의 실험 네트워크에서 싱크 노드는 왼쪽 가장 위의 노드로 고정하고, 소스 노드는 오른쪽 가장 아래의 노드로 선택하였다.

1. 종단 간 전달 지연시간 분석

기존의 방식들에 의하여 경로를 선택하고 데이터를 전송했을 때와 제안 기법을 통하여 경로를 선택하고 데이터를 전송했을 때의 종단 간 전달 지연시간을 분석하였다.

그림 3과 그림 4는 실제 패킷 전송에 따른 실험 결과들의 일부를 그래프로 가시화한 것이다. 그림 3은 링크의 에러율이 10% 미만에서 랜덤하게 나타날 때의 패킷 전송 결과이고, 그림 4는 링크의 에러율이 90% 미만에서 랜덤하게 나타날 때의 패킷 전송 결과이다. 그래프의 각 점은 특정한 에러율이 할당된 상태에서 패킷을 100번 전송하여 지연시간을 측정한 후 이들의 평균값을 표시한 것이다. 즉, 그림 3과 그림 4는 링크 에러율을 변화시켜가면서 이와 같은 실험을 100번 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림 3에서 보는 것처럼 에러율이 낮을 경우, 제안 기법의 종단 간 지연시간은 다른 방식들과 비하여 비슷하거나 조금 낮은 수준이다. 하지만, 에러율이 아주 높은 경우인 그림 4를 보면, 제안 기법의 종단 간 지연시간은 다른 방식들에 비하여 아주 낮게 나타난다는 사실을 확인할 수 있다. 또한, 제안 기법이 나타내고 있는 그래프의 상하 변화폭이 다른 방식들에 비하여 작으므로 지연 지터 또한 작다는 것을 추측할 수 있다. 지연 지터에 대해서는 다음 절에서 분석할 것이다.

그림 5는 링크 에러율을 증가시켜가면서 위와 같은 과정의 실험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 즉, 그래프의 각 점은 그림 3 또는 그림 4와 같은 실험을 통한 결과값들을 평균하여 표시한 것이다. 그림 5를 통하여 알 수 있는 것처럼 제안 기법은 링크 에러율이 높을수록 다른 방식들에 비하여 종단 간 지연시간이 상대적으로 짧다. 본 실험 환경에서는 지역적 선택 방식보다 최대 29%, 기존의 Directed Diffusion보다 최대 62% 정도의 속도 향상을 보였다. 일반적으로, 에러율이 높으면 재전송이 자주 발생하여 종단 간 지연시간은 증가하게 된다. 하지만, 다른 방식들에 비하여 제안 기법의 지연

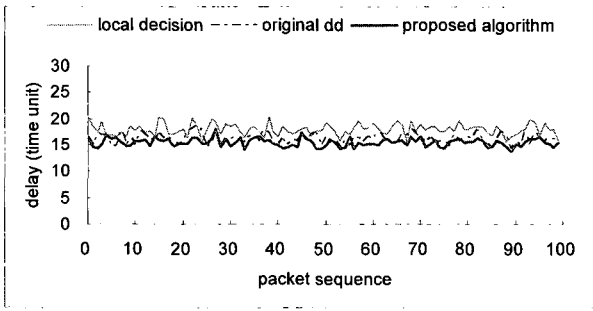


그림 3. 링크 에러율이 10% 미만일 때의 종단 간 지연 시간
Fig. 3. End-to-end delay when link error rates are less than 10%.

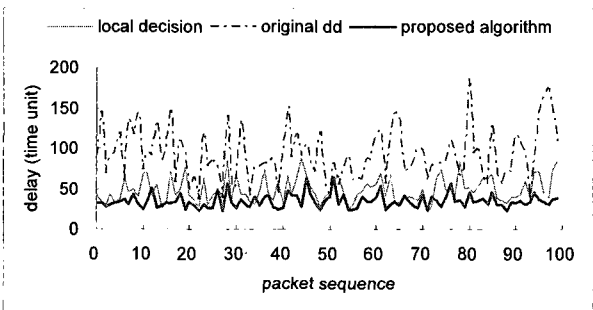


그림 4. 링크 에러율이 90% 미만일 때의 종단 간 지연 시간
Fig. 4. End-to-end delay when link error rates are less than 90%.

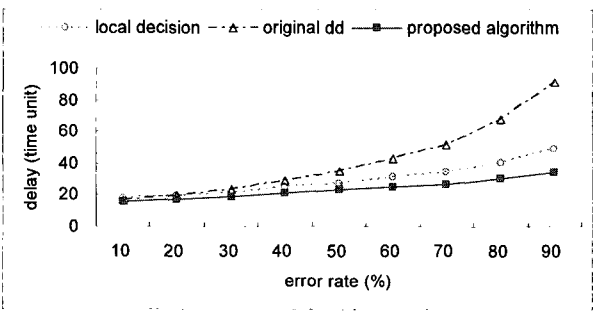


그림 5. 링크 에러율에 따른 종단 간 지연시간
Fig. 5. End-to-end delay under the different link error rate.

시간은 증가폭이 훨씬 작다는 것을 추가적으로 확인할 수 있다. 이러한 결과들은 네트워크의 전송 품질이 낮은 환경일수록 제안 기법의 성능이 더욱 우수하게 나타난다는 사실을 의미한다.

2. 지연 지터 분석

시간에 민감한 실시간 데이터의 경우에 종단 간의 전달 지연시간은 물론 지터(jitter)도 중요한 요소가 된다. 여기서, 지터란 연속된 전송에 대한 지연시간의 변동폭

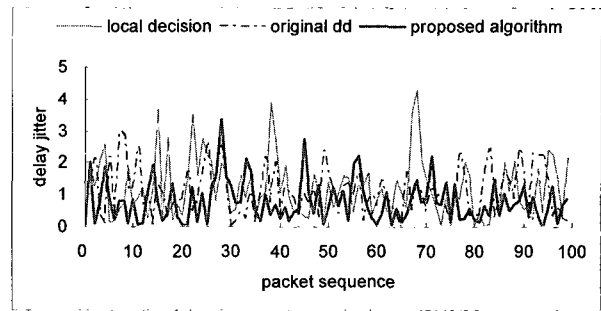


그림 6. 링크 에러율이 10% 미만일 때의 지터
Fig. 6. Jitter when link error rates are less than 10%.

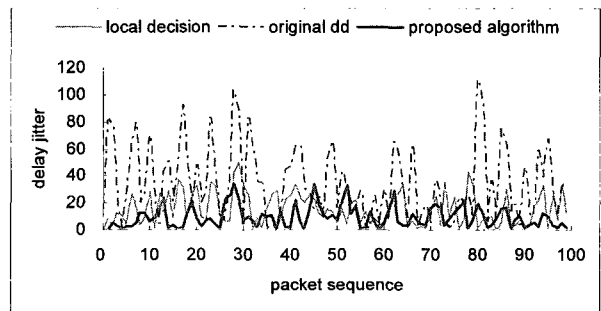


그림 7. 링크 에러율이 90% 미만일 때의 지터
Fig. 7. Jitter when link error rates are less than 90%.

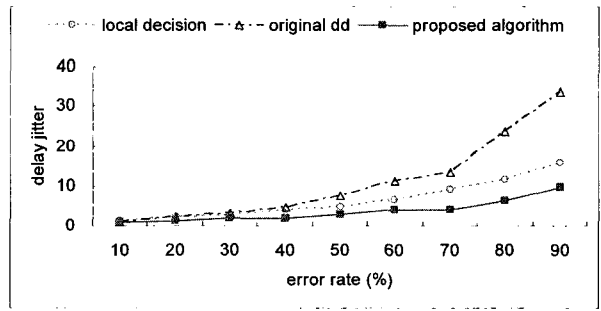


그림 8. 링크 에러율에 따른 지연 지터
Fig. 8. Jitter under the different link error rate.

을 나타내는 수치로서, 음향과 같은 스트리밍 응용의 품질은 이러한 지연 지터에 더욱 큰 영향을 받게 된다.

그림 6은 그림 3의 실험 결과로부터 지터를 산출하여 나타낸 그래프이고, 그림 7은 그림 4의 실험 결과로부터 지터를 산출하여 나타낸 그래프이다. 그림 8은 그림 5와 같은 방법으로 에러율을 증가시켜가면서 지터를 산출하여 그래프로 표현한 것이다. 이들 그래프는 에러율이 증가할수록 지터도 커지지만, 다른 방식들에 비하여 제안 기법은 지터의 증가폭이 작으며 항상 낮은 지터값을 나타내고 있다. 본 실험 환경에서 제안 기법의 지터는 지역적 선택 방식보다 최대 39%, 기존의 Directed Diffusion보다 최대 71% 정도 작았다. 이러한 결과들은 제안 기법이 지연시간에 민감한 실시간 데이터의 전송

은 물론 스트리밍 응용과 같이 지터에 더욱 민감한 데이터의 전송에 대해서도 우수한 성능을 나타낸다는 것을 의미한다.

3. 최적 경로 분석

특정한 패킷의 전송 시점에서 어떠한 알고리즘이 가장 빠른 경로를 선택하는가 하는 문제는 III장에서 언급한 것처럼 전송 오류의 발생 유무에 의존적이다. 그런데, 전송 오류의 발생 유무는 비결정적이다. 따라서 링크 상에서의 전송 오류를 고려한 제안 기법이 항상 최적의 경로를 선택한다는 보장은 없으므로, 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

그림 9는 세 가지 알고리즘들에 의해 최적 경로가 선택되는 비율을 그래프로 표현한 것이다. 현재까지의 실험에서 개별적인 측정값들은 모두 평균을 이용하여 표현된 것이었고, 이러한 과정을 통한 패킷 전송은 비교 분석을 위하여 모든 실험들에서 100번씩 수행되었다. 즉, 그림 9는 각각의 알고리즘을 이용하여 100번의 패킷 전송을 실험해 보았을 때, 소스 노드에서 싱크 노드까지 패킷이 전달되는데 걸리는 시간이 가장 짧게 측정된 횟수를 나타낸 그래프이다. 그래프를 통하여 확인할 수 있는 것처럼 제안 기법의 종단 간 전달 지연시간이 항상 가장 짧게 나타나는 것은 아니다. 하지만, 다른 방식들에 비하여 패킷이 가장 먼저 도착하는 횟수가 훨씬 더 많다는 사실을 알 수 있다. 이러한 결과를 통하여, 동일한 송수신 노드에서 다수의 패킷들이 전송되는 스트리밍 전송과 같은 응용에서는 제안 기법에 의한 경로 선택이 훨씬 더 우수하다는 것을 추론할 수 있다.

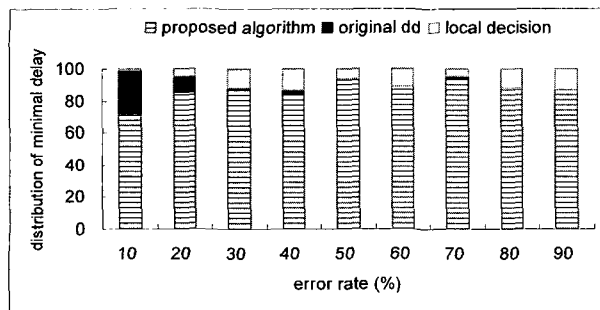


그림 9. 각 알고리즘에 의해 최적 경로가 선택되는 비율

Fig. 9. Ratio of optimal path selection by each algorithm.

4. 네트워크 수명 분석

본 절에서는 기존의 방식들에 의한 실시간 데이터 전

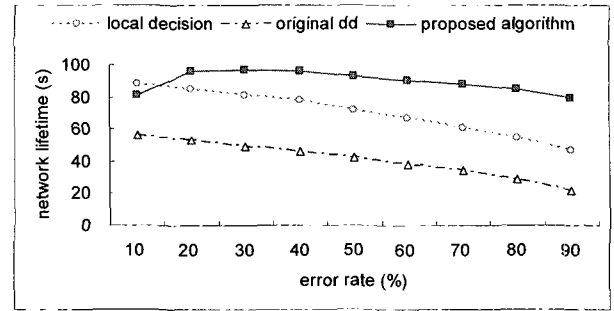


그림 10. 링크 에러율에 따른 네트워크 수명

Fig. 10. Network lifetime under the different link error rate.

달과 제안 기법에 의한 실시간 데이터 전달 시의 네트워크 수명을 비교해 보고자 한다.

그림 10은 링크의 에러율을 변화시켜가면서 네트워크의 수명을 분석한 그래프이다. 실험 방법은 이전의 과정들과 동일하며, 100번의 실험에 대한 평균값으로 표시하였다. 약 15% 이상의 에러율 상태에서 제안 기법의 네트워크 수명은 다른 방식들에 비하여 항상 길게 나타났다. 그리고 약 15% 미만의 에러율 상태에서는 기존의 Directed Diffusion보다는 길지만, 지역적 선택 방식에 비해서는 조금 짧게 나타났다. 일반적으로, 에러율이 높으면 전송 오류로 인한 재전송이 더욱 빈번하게 발생하여 에너지 소비가 많아지므로 네트워크의 수명은 단축된다. 하지만, 제안 기법의 네트워크 수명은 다른 방식들에 비하여 감소하는 폭이 상대적으로 작다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 다른 방식들에 비하여 제안 기법에서 재전송이 더욱 낮은 빈도로 발생하여 다른 방식들보다는 에너지 소비량이 상대적으로 적기 때문이다. 특히, 약 30%의 에러율 상태까지는 제안 기법의 네트워크 수명이 오히려 증가하는 현상을 보인다. 이것은 일반적인 에러율 증가로 인한 재전송 횟수의 확실적인 증가보다는 제안 기법에 의한 실질적인 재전송 감소 효과가 더욱 크게 나타나기 때문인 것으로 분석된다. 본 실험 환경에서 제안 기법을 사용하면 네트워크의 수명은 지역적 선택 방식보다 최대 1.7배, 기존의 Directed Diffusion보다 최대 3.6배 정도 연장된다는 사실을 확인하였다.

이상과 같은 다양한 실험을 통하여 제안 기법이 실시간 전송 능력을 향상시키고 네트워크의 수명을 연장시킨다는 사실을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 지연시간에 민감한 데이터를 실시간으로 전달하는 기법을 제안하였다. 무선 센서 네트워크의 기존 방식들은 홉 수 또는 지연시간에만 의존하여 실시간 전송 경로를 선택한다. 하지만, 링크 상에서 전송 오류가 발생할 경우에는 재전송이 수행되므로 기대하는 시간 내에 데이터를 전달할 수 없게 된다. 이에 반하여, 본 논문에서는 이웃 노드에 대한 링크 에러율을 고려하여 실시간 전송 경로를 선택하였다. 즉, 전송 오류가 발생할 가능성을 추정하고 재전송을 위한 일련의 과정에 소요되는 시간까지 포함하는 지연시간을 예측하였다. 제안 기법에 의해 산출된 지연시간은 Interest 패킷을 통하여 홉을 지날 때마다 반복적으로 계산되어 더해지면서 네트워크에 전파된다. 이 과정에서 설정된 경사는 특정 노드에서 싱크 노드까지의 전달 지연시간 정보를 유지하게 된다. 최종적으로, 가장 짧은 지연시간을 나타내는 경사를 실시간 전송 경로로 선택하고 데이터를 전달하였다.

다양한 실험을 통하여, 제안 기법을 사용하면 데이터 전달 속도가 기존의 다른 방식들에 비하여 더욱 향상된다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 제안 기법의 지연 지터가 다른 방식들보다 작다는 것을 알 수 있었다. 그리고 전송 오류 및 재전송의 상대적인 감소로 인하여 에너지 소비가 줄어들어 네트워크의 수명이 연장된다는 사실을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 무선 센서 네트워크에서 지연시간 및 지터에 민감한 트래픽을 실시간으로 전송하는데 효과적으로 사용될 수 있다. 특히, 네트워크의 전송 품질이 좋지 못한 환경에서 더욱 나은 성능 향상을 보인다. 향후에는 제안한 알고리즘을 다양한 토폴로지 환경에서 실험해 볼 필요가 있다. 또한, 실시간을 비롯한 다양한 요구사항들을 복합적으로 고려한 데이터 전달 기법을 개발할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [2] Jamal N. Al-Karaki and Ahmed E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11, No. 6, pp. 6-28, Dec. 2004.
- [3] Kemal Akkaya and Mohamed Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, May 2005.
- [4] Mohamed Younis, Kemal Akkaya, Mohamed Eltoweissy, and Ashraf Wadaa, "On Handling QoS Traffic in Wireless Sensor Networks," in *Proc. of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2004)*, pp. 1-10, Big Island, Hawaii, USA, Jan. 5-8, 2004.
- [5] Dazhi Chen and Pramod K. Varshney, "QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey," in *Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004)*, pp. 227-233, Las Vegas, Nevada, USA, June 21-24, 2004.
- [6] Jae-Won Choi and Kwang-Hui Lee, "A Reliable Data Transfer Mechanism Using Directed Diffusion in Wireless Sensor Networks," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 43-TC, No. 8, pp. 77-83, Aug. 2006.
- [7] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," in *Proc. of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, pp. 56-67, Boston, Massachusetts, USA, Aug. 6-11, 2000.
- [8] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, John Heidemann, and Fabio Silva, "Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, Vol. 11, No. 1, pp. 2-16, Feb. 2003.
- [9] Fabio Silva, John Heidemann, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin, "Directed Diffusion," *USC/ISI Technical Report ISI-TR-2004-586*, Feb. 10, 2004.
- [10] Pavan K. Pothuri, Venkatesh Sarangan, and Johnson P. Thomas, "Delay-Constrained, Energy-Efficient Routing in Wireless Sensor Networks Through Topology Control," in *Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2006)*, pp. 35-41, Ft. Lauderdale, Florida, USA, April 23-25, 2006.
- [11] Sangeeta Bhattacharya, Guoliang Xing, Chenyang Lu, Gruiã-Catalin Roman, Octav Chipara and Brandon Harris, "Dynamic Wake-up and

- Topology Maintenance Protocols with Spatiotemporal Guarantees,” in Proc. of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2005), pp. 28-34, Los Angeles, California, USA, April 25-27, 2005.
- [12] Srihari Narasimhan and Srisankar S. Kunnilyur, “Delay Differentiation in Sensor Networks Using Power Control,” in Proc. of Computer and Information Sciences Symposium (CISS 2004), pp. 1390-1395, Princeton, New Jersey, USA, March 17-19, 2004.
- [13] Ke Liu, Nael Abu-Ghazaleh and Kyoung-Don Kang, “JiTS: Just-in-Time Scheduling for Real-Time Sensor Data Dissemination,” in Proc. of the 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2006), pp. 42-46, Pisa, Italy, March 13-17, 2006.
- [14] Huan Li, Prashant Shenoy, and Krithi Ramamritham, “Scheduling Communication in Real-Time Sensor Networks,” in Proc. of the 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2004), pp. 10-18, Toronto, Canada, May 25-28, 2004.
- [15] Chenyang Lu, Brian M. Blum, Tarek F. Abdelzaher, John A. Stankovic, and Tian He, “RAP: A Real-Time Communication Architecture for Large-Scale Wireless Sensor Networks,” in Proc. of the 8th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2002), pp. 55-66, San Jose, California, USA, Sep. 24-27, 2002.
- [16] Tian He, John A Stankovic, Chenyang Lu, and Tarek Abdelzaher, “SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks,” in Proc. of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2003), pp. 46-55, Providence, Rhode Island, USA, May 19-22, 2003.
- [17] Emad Felemban, Chang-Gun Lee, Eylem Ekici, Ryan Boder, and Serdar Vural, “Probabilistic QoS Guarantee in Reliability and Timeliness Domain in Wireless Sensor Networks,” in Proc. of IEEE INFOCOM 2005, Miami, Florida, USA, Mar. 13-17, 2005.
- [18] Min Chen, Taekyoung Kwon and Yanghee Choi, “Energy-efficient differentiated directed diffusion (EDDD) in wireless sensor networks,” Computer Communications, Vol. 29, No. 2, pp. 231-245, Jan. 10, 2006.

 저 자 소 개

최 재 원(학생회원)

대한전자공학회논문지
제42권 TC편 제1호 참조

이 광 휘(정회원)

대한전자공학회논문지
제42권 TC편 제1호 참조