

무선센서 네트워크에서 결합 쿼럼 기반 이웃노드 탐색프로토콜 스케줄링 생성 방법

이우식¹ · 윤종훈² · 송특섭³

¹경기대학교 컴퓨터과학과,

²미국 네브라스카 주립대학교 오마하캠퍼스 컴퓨터과학과,

³목원대학교 융합컴퓨터미디어공학부

Combined Quorum-based NDP in Heterogeneous Wireless Sensor Networks

Woosik Lee¹ · Jong-Hoon Youn² · Teuk-Seob Song³

¹Department of Computer Science, Kyonggi University, Suwon 443-760, Republic of Korea

²Department of Computer Science, University of Nebraska at Omaha, 6001 Dodge Street, Omaha, NE 68182, USA

³Division of Convergence Computer and Media, Mokwon University, Daejeon 35349, Republic of Korea

[요 약]

본 논문에서는 무선센서 네트워크 환경에서 스케줄링 기법 중 쿼럼(Quorum)기반 이웃 노드 탐색 프로토콜을 개선한 결합 쿼럼 기반 스케줄링 기법을 제안한다. 본 논문에서 제시하는 방법은 서로 다른 크기를 갖는 두 개의 쿼럼기반 스케줄링을 결합하여 새로운 스케줄을 생성하는 방법이다. 기존의 그리드기반의 쿼럼 스케줄링 방법은 주어진 스케줄의 주기 내에서 2번의 만남을 보장하는 방법이지만 두 개의 그리드를 결합하여 생성된 스케줄방법은 두 개의 스케줄이 만나는 횟수가 증가한다. 제안하는 방법과 토심(TOSSIM) 시뮬레이터를 사용하여 그리드기반의 스케줄링 방법인 쿼럼, 썬치라이트 및 헤디스와 성능을 비교하였다. 실험에서 모든 센서 노드가 서로 다른 듀티 사이클을 가정하여 실험을 수행하였다. 실제 실험결과 제안하는 방법이 기존의 다른 이웃 노드 탐색 프로토콜에 비해 우수한 성능을 보였다.

[Abstract]

In this paper, we propose a new method to improve the performance of a Quorum-based NDP (Neighbor Discovery Protocol) in heterogeneous wireless sensor networks. It creates a new set of discovery schedules by combining two different Quorum-based matrices. The original Quorum-based schedule guarantees only two overlapping active slots with a cycle, but the newly created matrix greatly increases the chance of neighbor discovery. Therefore, although the size of the combined matrix of the proposed method increases, the number of discovery chances with neighboring nodes considerably increases, and the new approach is superior to the original Quorum-based neighbor node discovery protocol. In this study, we compares the performance of the proposed method to the Quorum-based protocols such as SearchLight and Heddis using TOSSIM. We assume all sensor nodes operates in a different duty cycle in the experiment. The experimental results show that the proposed algorithm is superior to other Quorum-based methods.

색인어 : 이웃노드 탐색 프로토콜, 쿼럼기반 스케줄링, 무선센서 네트워크

Key word : Neighbor discovery protocol, Quorum based scheduling, Wireless sensor Networks

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2017.18.4.753>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 11 June 2017; Revised 10 July 2017

Accepted 28 July 2017

*Corresponding Author; Teuk-Seob Song

Tel: +82-42-829-7635

E-mail: teukseob@mokwon.ac.kr

1. 서론

무선센서 (wireless sensors)는 무선통신 능력을 갖춘 센서가 자율적인 네트워크를 구성하여 센서 노드로부터 수집된 정보를 활용하는 기술로 기상예측을 위한 정보수집과 재난현장에서 생존자 확인을 위한 정보수집 및 군사적인 목적의 다양한 정보를 수집하고 전송하는데 사용된다 [1,2]. 무선센서는 대부분 사람이 접근하기 곤란한 환경에서 사용되며 소형의 장치로 구성되기 때문에 한번 설치된 무선센서의 수명은 내부에 장착된 소형의 배터리를 효율적으로 사용하여 배터리의 교체 없이 무선센서가 장기간 동작하도록 하는 방법 중 하나가 무선센서의 액티브 모드 (active mode)와 슬립모드 (sleep mode)를 조절하는 스케줄링 기법이다. 무선센서의 배터리 소모를 줄이는 방법은 MAC (media access control) 프로토콜, 압축 기법, 전송 전력 조절 등 다양한 방법들이 있다. 본 논문에서는 센서 네트워크 환경 구축 초반에 이웃 센서노드를 찾는 데 소비되는 에너지 절약을 위한 이웃 노드 탐색 프로토콜 (NDP ; neighbor discovery protocol)에 대한 연구를 수행한다 [2].

이웃 노드 탐색 프로토콜은 센서 네트워크 환경에 센서가 임의로 배치되었을 때 무선센서의 통신 반경 범위 내에 있는 다른 센서를 탐색 프로토콜을 의미한다. 무선센서 네트워크 환경에서 센서는 고정된 위치에 있지 않고 필요에 따라 이동을 할 수 있으며, 외적 요인으로 인해 통신 반경 범위에 갑자기 나타날 수도 또는 사라질 수도 있기 때문에 이웃 노드 탐색 프로토콜은 단순 한번 이벤트를 위해 사용되는 프로토콜이 아닌 무선센서가 운영되는 동안 계속해서 수행 될 수 있는 프로토콜이다. 따라서 효율적인 이웃 노드 탐색 프로토콜은 무선센서의 에너지 소비와 직접적으로 연관성이 많으므로 무선센서의 수명 연장 시키는데 중요한 역할을 한다 [3].

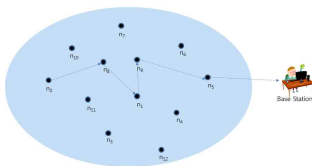


그림 1. 무선센서 네트워크 개념
Fig. 1. Concept of Wireless Sensor Networks

무선센서 네트워크 환경에 배치되는 센서의 경우 목적에 따라 센서의 스케줄 주기 안에 액티브모드와 슬립모드의 비율에 따라 달라진다. 예를 들어, 무선센서가 구축된 환경이 주기적으로 변하는 경우에는 액티브모드의 비율이 높은 스케줄방법을 사용해야 하며, 반면에 온도 측정과 같이 빠른 측정 주기가 필요하지 않은 경우 액티브모드의 비율이 낮은 스케줄링 기법을 사용한다. 무선센서의 스케줄링 기법에서 한주기내에서 액티브 모드의 비율을 듀티 사이클 (DC: duty cycle)이라 한다. 즉, 듀티 사이클이 높을 경우 한 주기 안에 액티브 모드 횟수가 많

으며, 반대로 듀티 사이클이 낮을 경우 한 주기 안에 액티브모드의 횟수가 적다. 듀티 사이클이 모두 같은 무선센서 네트워크 환경을 대칭(symmetric)한 환경이라고 하며, 듀티 사이클이 서로 다른 무선센서가 배치된 환경을 비대칭(asymmetric)한 환경이라 한다. 대부분의 무선센서 네트워크 환경은 각기 다른 센서가 배치되는 경우가 일반적인 상황으로 대칭환경과 비대칭 환경 모두를 지원하는 다양한 환경에 적용 가능한 스케줄링 기법이다. 큐롬기반 스케줄링 방법 [4]는 대칭과 비대칭을 모두 지원하는 방법이며 $n \times n$ 그리드(grid)의 한행과 한열을 액티브 모드의 슬랏으로 사용하기 때문에 다른 방법에 비해 비교적 단순하기 때문에 적용하기 쉬운 장점이 있다. 반면에 $n \times n$ 그리드를 사용하기 때문에 한 행을 연속적으로 액티브모드로 사용하는 채널 환경이 복잡한 경우 지연시간이 길어질 수 있다는 단점이 있다 [3].

본 논문에서는 큐롬기반 이웃노드 탐색 프로토콜을 개선하기 위한 그리드기반의 큐롬방법을 결합한 새로운 이웃 노드 탐색 프로토콜을 제안한다. 제안하는 프로토콜은 기본적인 큐롬기반 프로토콜의 그리드의 액티브슬랏에 다른 그리드기반의 스케줄링 프로토콜을 결합하는 방법으로 새로운 스케줄을 생성하는 방법이다. 새롭게 생성된 큐롬기반 이웃노드탐색 프로토콜은 기존의 그리드 기반의 스케줄링 방법에 비해서 이웃노드를 탐색 위한 액티브모드의 횟수가 증가하기 때문에 채널 환경으로 인해 손실 되는 데이터에 의한 지연시간이 짧아지는 장점이 있으며, 이웃 노드 찾는 지연시간이 짧아지기 때문에 에너지 소비에 대한 효율이 좋아진다.

제안하는 이웃 노드 탐색 프로토콜의 성능을 입증하기 위해 무선센서 시뮬레이터인 토심(TOSSIM) 시뮬레이터를 사용하여 실험하였으며, 실험 결과 분석을 통해 제안하는 프로토콜이 타 이웃 노드 프로토콜에 비해 우수하다는 것을 입증한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 이웃 노드 탐색 프로토콜과 관련된 기존연구를 소개하고 3장에서는 제안하는 이웃 노드 프로토콜을 만들기 위한 결합기법과 관련정의 를 소개한다. 4장에서는 무선센서 네트워크 시뮬레이션 환경 구축방법과 실험을 위한 변수설정을 기술하고 5장에서는 시뮬레이션을 사용하여 실험한 결과를 분석을 통해서 기존의 이웃 노드 프로토콜과 비교하여 제안한 방법의 우수성을 기술한다.

II. 관련 연구

이장에서는 무선센서 네트워크 환경에서 사용되는 큐롬기반과 큐롬을 응용한 씨치라이트 (SearchLight)와 헤디스 (Hedis) 이웃 노드 프로토콜의 아이디어와 장단점에 대해 기술한다.

큐롬기반 이웃 노드 탐색 프로토콜 [4]은 $n \times n$ 그리드를 사용하는 방법으로 액티브 슬랏을 설정하는 방법이 단순하기 때문에 스케줄을 생성하기 쉬운 장점이 있다. 큐롬기반 이웃노드 탐색 프로토콜의 경우 그림2와 같이 $n \times n$ 그리드에서 임의의 한 개의 행과 열을 액티브 슬랏으로 설정하는 방법으로 서로 다

른 행과 열을 액티브 슬롯으로 설정하게 되면 2개의 공통액티브 슬롯을 보장하는 방법이다. 비교적 단순하기 때문에 무선센서 네트워크의 이웃노드탐색 프로토콜뿐만 아니라 다양한 분야에 적용되는 방법이지만 다른 방법에 비해서 에너지소비가 다른 방법에 비해 높은 방법으로 알려져 있다.

	1	2	3	4	5
1	0	0	1	0	0
2	1	1	1	1	1
3	0	0	1	0	0
4	0	0	1	0	0
5	0	0	1	0	0

그림 2. Quorum 기반 이웃 노드 프로토콜의 구조
Fig. 2. Structure of Quorum-based Neighbor Discovery Protocol

slot index	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
mode	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0

그림 3. Quorum 기반 이웃 노드 프로토콜의 ON/OFF 스케줄
Fig. 3. ON/OFF Schedule of Quorum-based Neighbor Discovery Protocol

큐름기반의 스케줄링 기법을 개선한 씨치라이트 [5]는 $n \times n$ 그리드에서 행의 개수를 반으로 줄인 방법을 제시하였다. 씨치라이트 방법은 첫번열을 앵커 (anchor), 대각선방향의 액티브 슬롯을 프로브 (probe)를 사용하는 방법으로 대칭과 비대칭 스케줄링을 모두 지원하는 방법을 제시하였다. 큐름의 경우 $n \times n$ 그리드에서 다양한 스케줄을 생성할 수 있지만 씨치라이트의 경우 $n/2 \times n$ 그리드에서 한 개의 스케줄을 생성하는 방법으로 큐름방법보다 다양한 스케줄을 생성하지 못한다. 또한 큐름의 경우 2이상의 n 에 대해서 일반적으로 스케줄을 생성할 수 있지만 씨치라이트의 경우 짝수인 경우에 한정하여 적용할 수 있는 방법이다.

	1	2	3	4	5	6
1	A	P	0	0	0	0
2	A	0	P	0	0	0
3	A	0	0	P	0	0

그림 4. SearchLight 이웃 노드 프로토콜의 구조
Fig. 4. Structure of SearchLight Neighbor Discovery Protocol

헤디스 [6]은 $n \times (n+1)$ 그리드를 사용하여 스케줄을 생성하여 대칭과 비대칭 모두를 지원하는 방법을 제시하였다. 대칭의 경우 임의의 그리드 크기에 무관하게 공통액티브 슬롯이 존재하지만 비대칭의 경우 두 개의 그리드 $n \times (n+1)$ 과 $m \times (m+1)$ 인 경우 n 과 m 이 홀수이거나 짝수인 경우에만 비대칭 스케줄링에서 공통액티브 슬롯이 존재한다. 또한, 씨치라이트와 같이 한 개의 그리드에서 한 개의 스케줄만 생성할 수 있는 방법이다.

	1	2	3	4	5	6
1	A	P	0	0	0	0
2	A	0	P	0	0	0
3	A	0	0	P	0	0
4	A				P	
5	A					P

그림 5. Hedis 이웃 노드 프로토콜의 구조
Fig. 5. Structure of Hedis Neighbor Discovery Protocol

III. Combined Quorum기반 비대칭 스케줄 생성

이장에서는 스케줄의 정의와 스케줄 생성에 필요한 기호들을 소개하고 큐름을 결합한 새로운 스케줄링 방법인 CQ-NDP(combined quorum based neighbor discovery protocol)를 소개한다.

3-1 정의 및 기호

무선센서는 에너지를 절약하기 위해서 데이터를 서로 교환할 수 있는 액티브 모드와 대기상태인 슬립모드로 구성된다. 스케줄에서는 액티브모드를 1로 슬립모드를 0으로 표시한다. 스케줄은 일정한 패턴을 갖고 있으며 정해진 주기 L 에 따라 같은 패턴을 반복한다. 따라서 무선센서노드 u 가 주기 L 을 갖는 경우 스케줄은 사이클의 길이가 L 인 수열로 0과 1을 갖는 수열로 표현할 수 있으며 다음과 같이 스케줄을 정의한다.

정의 1: 센서노드 u 가 주기 L 인 스케줄은 수열 s_u^L 로 수열의 원소는 $a_i = 0$ 또는 $a_i = 1$ 을 갖고 i 는 타임슬롯의 인덱스를 의미한다. 즉 스케줄은 $s_u^L = \langle a_k \rangle_{k=0}^{L-1}$ 로 나타낼 수 있다. 예를 들어 무선센서노드 u 가 그림 1과 같이 5*5 그리드를 기본으로 하는 큐름의 스케줄을 갖는다면 스케줄의 주기는 25이며 스케줄 수열은 $s_u^{25} = \langle 0,0,1,0,0,0,1,1,1,1,0,,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0 \rangle$ 이다.

기호 1) 스케줄은 0과 1로 구성된 길이가 L 인 수열이며 이 중 1의 개수를 액티브 슬롯의 개수를 의미한다. 따라서 본 논문에서 $|s_u^L|$ 주기의 길이가 L 인 스케줄에서 1의 개수를 의미

한다.

2) 두 개의 스케줄 s_u^L 과 s_v^K 에서 $s_u^L \wedge s_v^K$ 의 의미는 0에서 $LCM(L, K) - 1$ 까지 대응하는 수열의 원소 간에 논리곱(logical and)연산을 한 것을 의미 하고 여기서 (LCM ; least common multiple) 최소공배수를 의미한다. 따라서 두 스케줄의 논리곱 $s_u^L \wedge s_v^K = \langle a_i \wedge b_i \rangle_{i=0}^{LCM(L, K) - 1}$ 이다.

큐롬을 이용한 결합스케줄링 방법을 소개하기 전에 행렬의 곱연산 중 하나인 크로넥커 프로덕트(Kronecker product)을 소개한다. 일반적으로 행렬의 덧셈은 두 개의 행렬의 크기가 같아야 하며, 행렬의 곱은 행의 개수와 열의 개수가 같아야 연산이 가능하지만 크로넥커 프로덕트는 행렬의 크기와 무관하게 연산이 가능하며 다음과 같이 정의 한다 [7].

정의 2 : 행렬 M 을 크기가 $a \times b$ 인 행렬이고 행렬 N 은 크기가 $c \times d$ 인 행렬이하면 M 과 N 은 식 (1)의 좌와 우로 쓸 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & \dots & m_{1b} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ m_{a1} & \dots & m_{ab} \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} n_{11} & \dots & n_{1d} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ n_{c1} & \dots & n_{cd} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

M 과 N 두 행렬의 크로넥커 프로덕트는 $M \otimes N$ 로 표시하며, 행렬 M 의 원소에 행렬 N 을 곱한 것으로 식 (2)와 같이 정의한다.

$$M \otimes N = \begin{bmatrix} m_{11}N & \dots & m_{1b}N \\ \vdots & \dots & \vdots \\ m_{a1}N & \dots & m_{ab}N \end{bmatrix}. \quad (2)$$

3-2 Combined Quorum기반 스케줄링 생성 방법

큐롬 무선센서 네트워크 스케줄링 방법은 $n \times n$ 그리드를 사용하여 임의의 행과 열을 액티브 슬롯인덱스로 정하기 때문에 0과 1을 원소로 갖는 행렬로 표현가능하다. 다음 그림좌는 3*3 그리드의 1행과 2열을 액티브슬롯으로 정하는 경우의 그림이고 우측 그림은 그리드의 액티브 슬롯을 행렬의 원소 1로 표현하고 슬립모드의 경우 0으로 표현한 3*3행렬이다.

$$\begin{matrix} & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 0 \end{matrix}, \quad M_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

그림 6. 큐롬기반 그리드와 큐롬행렬
Fig. 6. Grid and Quorum Matrix of Quorum-based Neighbor Discovery Protocol

그리드 기반의 큐롬스케줄은 위와 같이 한 개의 행과 열을 액티브 슬롯 인덱스로 한다. 이에 대응하는 행렬을 큐롬 행렬이

라 하자. 즉 큐롬행렬은 행렬의 임의의 한 개의행과 임의의 한 개의 열의 원소가 1이며 나머지 다른 원소는 모두 0인 행렬을 의미한다. 그림 6의 그리드는 1행과 2열이 액티브 슬롯 이므로 큐롬행렬을 (1, 2) 큐롬행렬이다. 큐롬기반의 행렬의 원소는 0과 1로 구성되어 있으며, 무선센서의 스케줄 또한 0과 1을 원소 a_k 를 갖는 수열이기 때문에 행렬의 i 행 j 열의 원소 m_{ij} 를 무선센서의 스케줄로 매핑 시킬 수 있다. $n \times n$ 그리드를 사용하는 경우 사이클의 길이가 n^2 이기 때문에 타임슬롯은 n^2 이고 생성되는 스케줄의 인덱스는 $k = 0, \dots, n^2$ 이다. 따라서 수열의 인덱스 $k = 0, \dots, n^2$ 에 대해서 스케줄의 모드 $a_k = m_{ij}$ 이라 하면 $k = (i + j) + i(n - i)$ 이다, 여기서 $i, j = 0, 1, \dots, n - 1$ 이다. 그림 7은 3*3 큐롬행렬과 스케줄과의 관계를 나타낸 것으로 센서노드 u 는 행렬 M 의 1행과 2열을 액티브 슬롯으로 한 것이고 센서노드 v 는 행렬 N 의 2행과 3열을 액티브 슬롯으로 한 것으로 액티브 슬롯은 0,1,2,4,7과 2,3,4,5,8이다.

$$M_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3}, \quad N_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (3)$$

slot index	0	1	2	3	4	5	6	7	8
sensor u	1	1	1	0	1	0	0	1	0
sensor v	0	0	1	1	1	1	0	0	1

그림 7. 그리드 기반의 큐롬스케줄링 기법의 공통액티브 슬롯
Fig. 7. Common active slots of Quorum-based Neighbor Discovery Protocol

센서노드 u 와 v 의 스케줄 수열은 $s_u^9 = \langle 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0 \rangle$ 과 $s_v^9 = \langle 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1 \rangle$ 이며 $LCM(9, 9) = 9$ 이기 때문에 슬롯 인덱스 0에서 8까지중 공통액티브 슬롯은 2와 4가 존재하기 때문에 $s_u^9 \wedge s_v^9 = \langle 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0 \rangle$ 이고 $|s_u^9 \wedge s_v^9| = 2$ 이다.

● 결합 큐롬 (combined Quorum) 기반 NDP (CQ-NDP)

행렬 M 을 $m \times m$ 그리드에 대응하는 큐롬기반 행렬 이라고 하고 N 은 $n \times n$ 그리드에 대응하는 큐롬기반 행렬 이라고 하자. 즉, 행렬 M 과 N 의 임의의 한행과 한열의 원소는 1이고 나머지 원소는 모두 0으로 구성된 행렬이다.

제안하는 결합 큐롬 기반 이웃탐색 프로토콜 (CQ-NDP)은 행렬 M 의 원소 중 1은 행렬 N 으로 0은 모든 원소가 0인 $n \times n$ 행렬도 대치하는 것으로 행렬 M 과 N 의 크로넥커 프로덕트 $M \otimes N$ 에 의해서 생성된 행렬을 스케줄로 생성한다.

예를 들어 스케줄행렬 M 이 3*3 행렬이며 1행과 2열이 액티브 슬롯이고 행렬 N 은 5*5행렬로 1행과 2열이 액티브 슬롯인 경우 M 과 N 은 다음과 같이 쓸 수 있다. M 과 N 의 결합 큐롬

기본 이웃탐색 프로토콜 CQ-NDP는 두 행렬의 크로벡터 프로덕트 $M_{3 \times 3} \otimes N_{5 \times 5}$ 로 얻을 수 있기 때문에 두 개의 행렬의 크기를 곱한 은 크기는 $15 * 15$ 이며, 8행과 8열의 모든 원소는 1로 구성된다. 또한 액티브 슬랏을 나타내는 1의 개수는 M 의 액티스 개수 $5(= 2*3-1)$ 와 N 의 액티스개수를 나타내는 1의 개수 $9(= 2*5-1)$ 의 곱인 45개임을 알 수 있다. 즉, $m \times m$ 그리드를 사용하는 쿼럼의 액티브 개수는 $2m - 1$ 이지만 제안하는 CQ-NDP의 경우 $m \times m$ 그리드와 $n \times n$ 그리드를 사용하여 스케줄을 생성하면 $(2m - 1) \times (2n - 1)$ 이다.

$$M_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, N_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ 이면}$$

두 행렬의 $M_{3 \times 3}$ 과 $N_{5 \times 5}$ 의 크로벡터 프로덕트는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$M_{3 \times 3} \otimes N_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0000000100000000 \\ 0000000100000000 \\ 0000011111000000 \\ 0000000100000000 \\ 0000000100000000 \\ 0010000100001000 \\ 0010000100001000 \\ 1111111111111111 \\ 0010000100001000 \\ 0010000100001000 \\ 0000000100000000 \\ 0000000100000000 \\ 0000011111000000 \\ 0000000100000000 \\ 0000000100000000 \end{bmatrix}_{15 \times 15} \quad (4)$$

센서노드 u 가 쿼럼행렬 $M_{m \times m}$ 과 $N_{n \times n}$ 의 크로벡터 프로덕트 $M_{m \times m} \otimes N_{n \times n}$ 를 스케줄로 생성하게 되면 스케줄 수열은 $s_u^{m^2 \times n^2}$ 이다. 두 개의 무선센서노드 u 와 v 가 서로 다른 행과열을 쿼럼행렬의 $M_{m \times m}$ 과 $N_{n \times n}$ 의 액티브 슬랏으로 하는 경우 두 행렬의 크로벡터 프로덕트 $M_{m \times m} \otimes N_{n \times n}$ 의 한행과 한 열의 모든 원소가 액티브 슬랏으로 대응되기 때문에 $|s_u^{m^2 \times n^2} \wedge s_v^{m^2 \times n^2}| \geq 2$ 인 것은 당연하다. 따라서 두 개의 스케줄이 공통액티브 슬랏이 항상 2개 이상 존재한다.

무선센서의 NDP에서 듀티 사이클은 액티브 슬랏의 개수를 사이클의 길이로 나눈 값으로 주어진 스케줄링 방법의 에너지 효율을 결정하는 방법으로 사용된다. 쿼럼기반의 스케줄링 기법의 DC는 사이클의 길이가 m^2 이고 액티브의 개수는 $2m - 1$ 임으로 쿼럼기반의 DC는 식 (5)와 같다.

$$DC_Q = \frac{2m - 1}{m^2} \quad (5)$$

```

Procedure CombinedQuorum_NDP( $M_{m \times m}, N_{n \times n}$ )
Input: 쿼럼 행렬 ( $M_{m \times m}, N_{n \times n}$ )
Output: 쿼럼 행렬  $CM_{(m \times n) \times (m \times n)}$ 
Initializaing Global Values
 $Mlength = 0$ 
 $Nlength = 0$ 
 $Mlength = M.length()$ 
 $Nlength = N.length()$ 
 $CM = new\ int[Mlength \times Nlength][Mlength \times Nlength]$ 
for  $i=0$  to  $Mlength$  do
  for  $j=0$  to  $Nlength$  do
    if  $M[i][j]$  equal Active Mode then
      for  $ci=i*Nlength$  to  $i*Nlength+Nlength$  do
        for  $cj=j*Nlength$  to  $j*Nlength+Nlength$  do
           $CM[ci][cj] = N[ci-(i*Nlength)][cj-(j*Nlength)]$ 
        else then
          for  $ci=i*Nlength$  to  $i*Nlength+Nlength$  do
            for  $cj=j*Nlength$  to  $j*Nlength+Nlength$  do
               $CM[ci][cj] = Sleep\ Mode$ 
    Return  $CM_{(m \times n) \times (m \times n)}$ 

```

그림 8. 제안 방법인 CQ-NDP 슈도코드

Fig. 8. Pseudo code of proposed CQ-NDP

한편, 쿼럼행렬 M 이 $m \times m$ 와 N 의 크기가 $n \times n$ 인 경우 제안한 방법인 두 개의 쿼럼행렬을 결합한방법의 DC는 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$DC_{CQ} = \frac{(2m - 1)(2n - 1)}{m^2 n^2} \quad (6)$$

당연히 $\frac{2m - 1}{m^2} < 1$ 이고 $\frac{2n - 1}{n^2} < 1$ 이기 때문에 제안한 방법의 DC와 쿼럼을 결합하여 생성된 스케줄의 DC는 식 (7)의 부등식을 만족하기 때문에 CQ-NDP의 DC는 쿼럼의 DC보다 작다는 것을 알 수 있다.

$$DC_{CQ} = \frac{(2m - 1)(2n - 1)}{m^2 n^2} < DC_Q = \frac{2m - 1}{m^2} \quad (7)$$

한편, 써지라이트의 DC는 식 (8)과 같이 주어진다.

$$DC_s = \frac{\frac{m}{2} + \frac{m}{2}}{m \times \frac{m}{2}} = \frac{2m}{m^2} \quad (8)$$

써치라이트의 DC와 제안한 방법의 DC를 비교하면 $DC_{CQ} < DC_s$ 로 제안한 방법의 DC가 써치라이트 보다 작은 것은 당연하다. 또한, 헤디스의 DC는 식 (9)와 같이 주어진다.

$$DC_H = \frac{2(m-1)}{m(m-1)} = \frac{2}{m} = \frac{2m}{m^2} \quad (9)$$

따라서 제안한 방법의 DC가 헤디스의 DC보다 당연히 작다. 즉 $DC_{CQ} < DC_H$ 시 성립함을 알 수 있다.

IV. 실험 및 평가

무선센서 네트워크 환경은 다수의 센서가 임의의 위치에 배치된 환경으로 각 센서는 자신의 통신 반경 범위 안에 존재하는 이웃 센서를 발견 한 후 통신이 가능하다. 본 장에서는 무선센서 네트워크 환경 구성을 위해 센서 네트워크 환경에서 많이 활용되는 TOSSIM 시뮬레이터 [8] 기반의 환경을 구성한다. 환경 구성 시 논문에서는 성능 측정을 위해 레이턴시(latency) 측정 모듈과 에너지 측정 모듈을 개발 한 시뮬레이터에 탑재 시킨 후 시뮬레이션이 구동 되는 동안 에너지와 레이턴시를 측정한다.

4-1 실험 환경

무선센서 네트워크 환경 구성을 위해 본 논문에서는 표 1과 같은 속성을 가지고 네트워크를 구축하였다. 우선 100*100m 실험 환경에서 50개의 무선 통신이 가능한 센서 디바이스를 임의의 위치에 배치한 랜덤 토폴로지를 구성하였다.

랜덤하게 토폴로지 구성을 하였기 때문에 각 무선센서는 자신의 주변에 어떤 센서가 존재하는 지 알 수 없다. 무선센서 디바이스는 15ms 마다 이웃 센서를 탐색 위한 데이터를 송수신을 시도한다. 기존연구와 비교하기 위해서 제안한 CQ-NDP와 큐룸, 써치라이트, 헤디스 이웃노드탐색 프로토콜을 실험하였다.

표 1. 실험 환경 구성 요소

Table. 1. Component of experiment environment

속성	값
네트워크 구성	랜덤 토폴로지
실험 사이즈	100*100m
통신 모듈	CC2420 [9]
센서 수	50 개
개별 슬롯 시간	15ms
Duty cycle 형태	비대칭형 Duty Cycle
에너지 측정 모듈	PowerTOSSIM Module
링크 모델	USC 링크 모델 [10]
채널 접근 방법	CSMA/CA [11]
무선 전파 모델	Log-Distance Path Loss Model
NDP 종류	Quorum, SearchLight, Hedis, CQuorum

본 논문에서는 실제 무선센서 네트워크 환경의 전파 방해부 터 지연 까지 흡사한 환경 구성을 위해 서던 캘리포니아 대학교(USC) [11] 에서 개발한 링크 모델을 사용하였으며, 무선센서 디바이스가 랜덤하게 채널에 접근하는 접근 방식은 CSMA/CA(carrier sense multiple access with collision avoidance) [10]방식을 사용하였다. 그리고, 무선 전파 모델로써 Log-Distance Path Loss Model을 사용하였다.

이웃노드 탐색 프로토콜을 비교하기 위해서 각기 다른 듀티 사이클을 선택하는 비대칭형 듀티사이클을 고려한 실험을 환경을 구성하였다. 대표적으로 10%-10%, 10%-5%, 10%-2%, 10%-1% 네 가지 비대칭형 환경을 고려한 실험환경을 구축하고 실험하였다. 실험환경 구축과 분석에는 비 대칭의 값으로 R 값을 활용한다. R값은 분모가 낮은 듀티사이클 분모가 높은 듀티사이클로 계산된다. 예를 들어 R=10/10=1, R=10/5=2, R=10/2=5, R=10/1=10 이 된다.

본 논문에서 성능평가를 위한 측도는 레이턴시와 에너지 소비로 아래와 같다.

- 레이턴시 : 모든 센서 노드가 자신의 통신 반경 범위에 안에 존재하는 모든 이웃 센서 노드를 다 찾을 까지 걸린 시간을 의미한다.
- 에너지 소비 : 모든 센서가 이웃 센서 노드를 탐색 위해서 소비되는 총 에너지 양을 의미한다.

4-2 실험 결과

본 장에서는 무선센서 네트워크 환경에서 4.1절 실험환경을 바탕으로 실험을 수행한 결과를 분석한다.

그림 9는 평균 레이턴시결과 그래프를 보여주고 있다. 그래프의 X축은 R값을 의미하며, Y축은 평균 레이턴시(s)를 의미한다. 처음 R=1인 곳에서는 큐룸, 써치라이트, 헤디스와 제안방법인 CQ-NDP가 거의 비슷한 평균 레이턴시를 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 R=1인 경우 10%-10% 듀티사이클을 가지고 있는 센서가 서로 통신하는 상황으로써, 비대칭의 대 한 효과 크지 않기 때문이다. 즉, 모든 센서 노드가 동일한 패킷을 가지고 통신 모듈을 On, Off 하기 때문에 행렬을 사용하는 모든 NDP가 비슷한 것이다. 반면에 R=2, 5, 10인 곳에서는 큐룸의 성능이 타 NDP에 비해 높은 평균 레이턴시를 보여주고 있다. 그 원인 타 NDP에 비해 행렬의 사이즈가 크고 만남의 횟수가 선택된 행에서 1번 열에서 1번 총 2번으로 만약 채널 상태가 좋지 않은 경우에는 행렬 사이즈 만큼 지연시간이 걸리기 때문이다. 반면에 써치라이트, 헤디스, 제안방법인 CQ-NDP의 경우 R=2, 5, 10에서 비슷한 평균 레이턴시를 보여주고 있다. 그 원인 써치라이트와 헤디스는 큐룸 사이즈의 절반으로 전체 사이즈를 줄여 데이터 손실이 일어나도 금방 복구를 할 수 있으며, CQ-NDP의 경우 써치라이트와 헤디스에 비해 행렬의 사이즈는 크지만 만남의 횟수가 많기 때문에 손실이 발생 되도 만남이 유지된다. 따라서 CQ-NDP가 기존의 다른 NDP에 좋은 레이턴시를 가진다.

그림 10은 최대 레이턴시결과를 보여주고 있다. 평균 레이턴시결과와는 다르게 최대 레이턴시의 결과는 CQ-NDP가 가장 좋은 결과를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 특히 R 값이 10인 곳에서는 큐럼에 비해 2배 이상 좋은 결과를 보여주고 있다. CQ-NDP가 타 NDP에 비해서 최대 레이턴시가 좋은 이유는 그리드 기반의 다른 NDP는 데이터 손실을 2회 하게 될 경우 다음 만남이 있을 때 까지 행렬 전체 길이만큼 기다려야 이웃 노드를 찾을 수 있는 반면에 CQ-NDP의 경우 2개의 행렬이 결합되기 때문에 한 액티브슬롯마다 2개의 만남의 경우의 수가 발생하기 때문에 만남의 횟수가 프로토콜에 비해 증가되는 것이다. 따라서 행렬 기반 다른 NDP가 2번 손실되어 기다리는 동안 CQ-NDP의 경우 하나의 행렬 안에서 공통액티브 슬롯의 개수가 증가하기 때문이다.

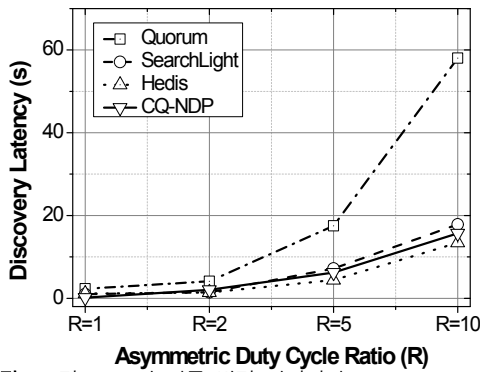


그림 9. 각 NDP의 평균 발견 지연시간
Fig. 9. Average Discovery Latency each NDP

그림 10에서 씨치라이트와 헤디스의 결과가 비슷한 이유는 행렬의 사이즈가 거의 비슷하며, 만남의 횟수 또한 비슷하기 때문에 토폴로지가 같을 경우 비슷한 결과를 보여준다. 실험결과에서 보여주는 것과 같이 본 논문에서 제안하는 CQ-NDP가 타 NDP에 비해서 우수한 레이턴시를 가진다는 것을 알 수 있다.

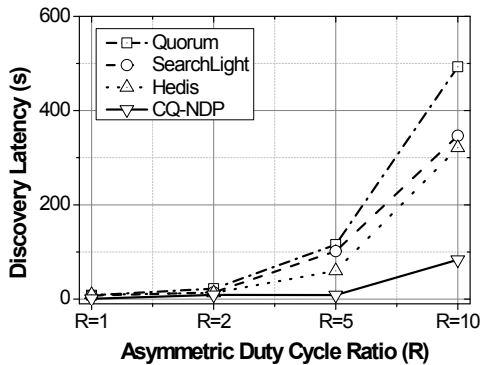


그림 10. 각 NDP의 최대 발견 지연시간
Fig. 10. Maximum Discovery Latency each NDP

그림 11과 12는 무선센서 네트워크 환경에서 각 센서 노드가 이웃 노드를 탐색 위해서 통신 칩을 On, Off 하고, 데이터 송수신시 발생하는 에너지 측정된 결과를 보여주고 있다. 그림 11의

X축 레이턴시 그래프와 비슷하게 R 값을 보여주고 있으며, Y 축은 에너지 소비량 mJ을 보여준다. 그림 11과 12 모두 큐럼이 가장 에너지 효율이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 큐럼의 경우 기존의 NDP에 비해 기본적인 스케줄 사이클 길이가 길기 때문에 데이터 손실로 인한 레이턴시 증가가 발생할 가능성이 있으며, 하나의 행과 열 선택의 액티브슬롯의 개수가 높은 비율을 차지하기 때문에 에너지 소비가 크다. 반면에 에너지 효율이 가장 좋은 CQ-NDP의 경우 기본적 행렬 크기는 큐럼의 비해 증가하지만 만남의 횟수가 큐럼의 비해 증가하기 때문에 전체 행렬의 크기인 주기 내에서 만남이 이뤄진다. 따라서 CQ-NDP가 큐럼과 다른 NDP에 비해 빨리 이웃 노드를 찾을 수 있기 때문에 에너지 효율이 높다는 것을 알 수 있다.

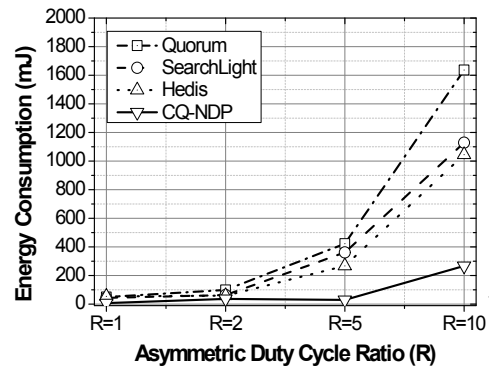


그림 11. 각 NDP의 평균 에너지 소모
Fig. 11. Average Energy Consumption each NDP

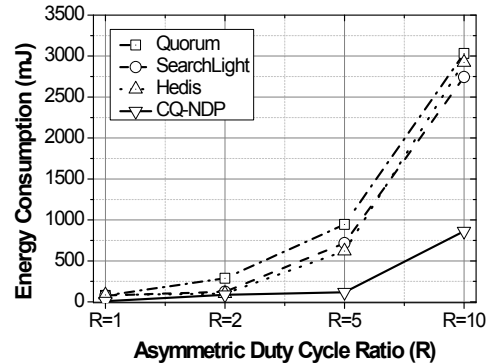


그림 12. 각 NDP의 최대 에너지 소비량
Fig. 12. Maximum Energy Consumption each NDP

V. 결 론

본 논문에서는 무선센서 네트워크 환경에서 각 센서 노드가 자신의 이웃 노드를 에너지 효율이 높으면서 짧은 레이턴시를 갖는 새로운 NDP를 제안하였다. 새로 제안한 NDP는 행렬을 사용하는 기본 큐럼의 결합하는 공식을 활용해서 만들어진 NDP로써 기존에 행렬의 단점인 레이턴시가 늘어나는 것을 만남의 횟수 증가를 통해 해결하였다. 결론적으로 만남의 횟수 증가로 인해 전체적인 최대 레이턴시를 줄이는 효과를 볼 수 있었으며, 에너지 효율 또한 기존에 연구된 NDP인 큐럼, 씨치라이트

트, 헤디스에 비해 에너지 효율도 높다는 것도 알 수 있었다.

본 논문을 바탕으로 향후 연구는 실제 장비에 개발한 NDP를 탑재하여 시뮬레이션 결과와 비교분석을 수행할 계획을 가지고 있다.

감사의 글

본 연구는 이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.NRF-2015R1D1A1A01058786).

참고문헌

[1] Kora Communication Agency, "Communication Technology for IoT based on Wireless Sensor Networks", *Issue and Vision of Communication Technology*, Vol. 37,1-12, 2014.

[2] J. Lim, A Design and Evaluation of Protocol for VBR Service in Wireless Multimedia Network, *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 2, No.1, pp.93-102, 2001.

[3] S. Choi, W. Lee, T.S. Song and J.H. Youn, "Block Design-Based Asynchronous Neighbor Discovery Protocol for Wireless Sensor Networks", *Journal of Sensors*, vol. 2015, pp. 1- 11, 2015

[4] J. R. Jiang, Y.C. Tseng, C.S. Hsu and T.H. Lai, "Quorum-based Asynchronous Power-saving Protocols for IEEE 802.11 Ad Hoc Networks", *Mobile Networks and Applications*, Vol. 10, No.1, pp.169- 181, 2005.

[5] M. Bakht, M. Trower, and R. Kravets, "Searchlight: Won't You Be My Neighbor?" in *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 185-196, Aug. 2012.

[6] L. Chen, R. Fan, K. Bian, L. Chen, M. Gerla, T. Wang, and X. Li, "On Heterogeneous Neighbor Discovery in Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 693-701, 2015.

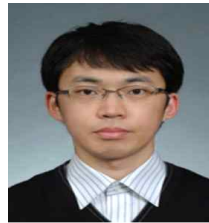
[7] I. Anderson, *Combinatorial Designs and Tournaments*, Oxford University Press, Oxford, UK, 1988.

[8] TinyOS, [Internet] Available: <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tutorial/usc-topologies.html>

[9] CC2420 Data Sheet, [Internet] Available: <https://inst.eecs.berkeley.edu/~cs150/Documents/CC2420.pdf>

[10] USC Link Model, [Internet]. Available: <http://www.math.uwaterloo.ca/~kpurbhoo/co634/Designs.pdf>.

[11] M. Oliver and A. Escudero, "Study of Different CSMA/CA IEEE 802.11-based Implementations," in *Proceedings EUNICE 1999 Contribution*, 1999.



이우식 (Woosik Lee)

2009년 2월 경기대학교 컴퓨터과학과 (이학학사)
2011년 2월 경기대학교 컴퓨터과학과 (이학석사)
2016년 2월 경기대학교 컴퓨터과학과 (이학박사)

2016년 4월 ~ 2017년 2월 : 한국건설기술연구원
2017년 2월 ~ 현재 : 경기대학교 컴퓨터과학과 교수
※관심분야 : 무선 네트워크 시스템, 센서 네트워크



윤종훈(Joung-Hoon Youn)

2002년 8월 Dept. Computer Science at Oregon State University (Ph.D.)

2002년 9월 ~ 현재 Professor in the Department of Computer Science at the University of Nebraska, Omaha.
※관심분야 : Wireless Communication and Mobile Computing.



송특섭(Teuk-Seob Song)

2001년 2월 연세대학교 수학과 (이학박사)
2006년 2월 연세대학교 컴퓨터과학과 (공학박사)

2006년 3월 ~ 현재 목원대학교 융합컴퓨터미디어학부 부교수
※관심분야 : 웹환경 어노테이션, 센서네트워크