

무선 센서 네트워크에서 센서 값의 분포를 이용한 충돌 회피 전송방법

안종민*, 강지웅*, 정재학°

Collision Avoidance Transmission Method Using Sensor Values in Wireless Sensor Network

Jong-min An*, Ji-woong Kang*, Jea-hak Chung°

요약

무선 센서 네트워크에서 센서 노드는 제한된 전력을 사용하기 때문에 에너지 사용을 효율적으로 하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 에너지사용효율을 높이기 위해 일정지역에서 측정되는 센서 값으로 이루어진 행렬이 low rank일 때 Matrix Completion을 이용하여 패킷 생성량을 줄이고, 센서가 측정값에 대응시킨 time slot으로 센서 ID 전송을 시도할 때 확률밀도함수로 예측한 전송 성공 확률에 따라 전송을 결정하여 overhead와 충돌을 줄이는 방법을 제안한다. 전산 모의실험을 통해 CSMA/CA와 비교하여 제안된 방법이 전송 실패 수가 17% 감소하고 패킷 생성량은 73%로 감소함을 보였다. 또한 CSMA/CA에 비해 시간 지연이 22%로 감소하고 fusion center에서 Singular Value Thresholding(SVT)로 센서 값을 복원한 경우 MSE error가 CSMA/CA에 비해 86%로 낮음을 보였다.

Key Words : Sensor Network, Random Access Protocol, Matrix Completion, CSMA/CA, Probability Distribution Function

ABSTRACT

In wireless sensor networks, an energy efficient operation is important since the energy of the sensors is limited. This paper proposes an energy efficient method that reduces a packet generation with Matrix Completion method where sensor value matrix has low-rank and decreases a collision rate and an overhead by transmitting only sensor ID to a time slot corresponding to the sensor value. Computer simulations demonstrates that the proposed method shows 17% of transmission failure and 73% of the packet generation compared to a conventional CSMA/CS. Delay time of transmitting information of the proposed method exhibits 22% of the CSMA/CA and the MSE error after reconstructing sensor values by Singular Value Thresholding(SVT) in Fusion Center is 87% of the CSMA/CA.

※ 이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(분산형 수중 관측·제어망 개발)

• First Author : Inha University Department of Electronic Engineering, anjong3@inha.edu, 학생회원

° Corresponding Author : Inha University Department of Electronic Engineering, jchung@inha.ac.kr, 중신회원

* 인하대학교, 학생회원

논문번호 : KICS2016-12-380, Received December 12, 2016; Revised February 7, 2017; Accepted February 23, 2017

I. 서 론

무선 센서 네트워크는 넓은 지역에서 주기적으로 온도, 오염도 등과 같은 주변 환경 요소들을 측정하여 무선으로 수집하는데 많이 사용된다. 이러한 무선 센서 네트워크에서 센서가 원하는 환경 요소 등을 측정할 경우 센서 배터리의 용량이 작기 때문에 fusion center로 데이터를 전송할 때 사용되는 전력량을 줄이는 통신 방식이 필요하다^{1,2}. 특히 수중 무선센서네트워크에서 센서가 사용하는 전력량을 줄이는 것은 중요한 문제이다.

무선 센서 네트워크를 주요 응용으로 하는 IEEE 802.15과 802.11은 fusion center와 센서간의 통신을 위해 Carrier Sensing Multiple Access Collision Avoid(CSMA/CA)를 무선 접속 프로토콜로 사용한다³. CSMA/CA는 RTS/CTS를 이용하여 센서간의 충돌을 방지하는 Random Access Protocol(RAP)이다³⁻⁶.

CSMA/CA기반 네트워크에서 센서 노드와 fusion center간의 통신효율을 높이기 위해 경쟁 방식의 S-MAC과 비경쟁 방식의 Traffic Adaptive Medium Access protocol(TRAMA) 방법이 연구되었다^{7,8}. 그러나 센서 노드간의 전송 충돌로 재전송이 필요하고, 전송 충돌 방지를 위한 센서 클러스터 구성과 스케줄링을 위한 overhead가 증가한다. S-MAC과 TRAMA 외에도 비 경쟁방식과 경쟁방식의 장점을 동시에 지닌 Z-MAC이 연구되었다⁹. 이 방식은 각 센서에 time slot에 대한 우선순위를 부여하여 충돌 확률을 낮춘다. 그러나 우선순위를 부여하기 위해 overhead가 증가하고 충돌이 여전히 발생하는 단점을 지니고 있다. 이 외에 센서 측정값 행렬이 low rank인 특성을 이용하여 센서 값 중 일부만 전송하여 패킷 생성량을 줄이는 방법도 연구되었다^{10,11}. 이 방법은 전체 센서 중 일부만 전송에 참여하기 때문에 충돌 확률이 줄어들지만 충돌이 존재한다^{10,11}.

본 논문에서는 센서 측정값 행렬이 low rank인 경우 전체 센서 중 일부 센서만 측정값을 fusion center에 전송하고, 센서가 측정값 전송 시 측정값에 대응되는 slot에 센서 ID만 전송하여 충돌 확률과 overhead를 줄이는 방법을 제안한다. 그리고 같은 측정값을 가지는 센서간의 충돌을 피하기 위해 측정값의 확률밀도함수를 이용하여 충돌 확률을 예측하고 센서 스스로 전송을 제한하는 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 2절에서 시스템 모델을 설명한 후 3장에서 제안된 알고리즘을 설명하고 4장에서 전

산 모의실험을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 보이고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 N 개의 센서가 그림 1과 같이 배치된 센서 네트워크를 가정한다. N 개의 센서 중 i, j 위치에 있는 센서에서 측정된 센서 값 s 는 그림 1과 같이 $s(i, j)$ 로 나타낼 수 있다.

Fusion center로 전송된 센서 값은 센서 위치 (i, j) 에 따라 아래와 같이 행렬 M 으로 나타낼 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} s(1,1) & \dots & s(1,J) \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & s(i,j) & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ s(I,1) & \dots & s(I,J) \end{bmatrix}$$

해양 온도 분포나 오염도 분포 같이 자연에서 측정되는 대부분의 현상은 측정값을 행렬 M 과 같이 나타낼 경우 low rank인 특성을 갖고 있다¹⁰. 본 논문에서 고려하는 센서 값의 행렬도 low rank 행렬이라 가정한다.

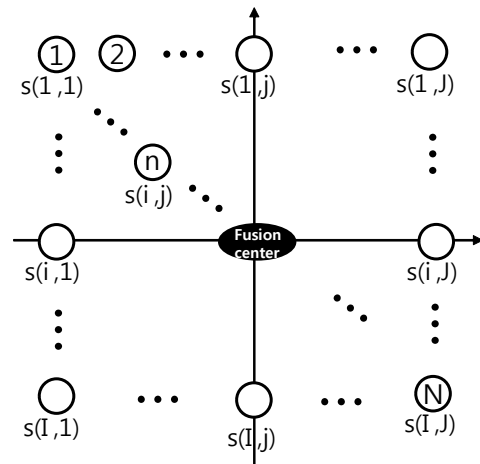


그림 1. 센서 네트워크
Fig. 1. Sensor Network

III. 제안 방법

본 장에서는 제안한 방법을 설명한다. 제안한 방법은 II장에서 가정한 것과 같이 센서 측정값의 행렬이

low rank인 특성을 이용하여 센서와 fusion center간 통신 과정에서 패킷 생성량을 줄이고 센서 값에 대응시킨 time slot으로 센서 ID를 전송하여 overhead를 줄인다. 그리고 센서가 전송 할 때 센서 값의 확률분포를 통해 예측한 전송 성공확률에 따라 전송을 결정하여 충돌 확률을 낮추는 방법이다.

3.1 Low rank 특성을 이용한 패킷 생성량 감소 방법

센서 값으로 이루어진 행렬 M 의 구성 요소 중 일부 센서 값으로 구성된 행렬을 행렬 X 라 한다. 이때 M 은 low rank이므로 행렬 X 를 이용하여 M 으로 복원하는 문제는 Matrix Completion문제와 같다^[12,13].

본 논문에서는 Matrix Completion의 솔루션 알고리즘의 하나인 Singular Value Thresholding(SVT)를 사용하여 전송 센서수를 줄인다^[12]. SVT는 N 개의 원소로 이루어진 행렬 M 이 존재할 때 N 개의 원소 중 임의의 m 개의 원소로 이루어진 행렬 X 를 알고 있는 경우 행렬 X 의 nuclear norm $\|X\|_*$ 을 최소로 만드는 행렬 X 를 찾아 행렬 M 을 복원하는 방법이다. SVT는 아래와 같은 수식으로 나타낼 수 있고 Convex Optimization을 이용하여 풀 수 있다^[14].

$$\begin{aligned} \min \|X\|_* \\ \text{subject } X_{x,y} = M_{x,y} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 요구되는 행렬 X 의 최소 원소 수 m 값은 다음과 같다^[12].

$$m \geq C(N)^{6/5} r \log(N) \quad (2)$$

r 은 행렬 M 의 rank이며 C 는 양의 실수이다. 전체 N 개의 센서 중 m 개의 센서만 측정값을 전송하여 패킷 생성량을 줄일 수 있다^[10,11].

3.2 측정값에 따른 time slot전송을 이용한 충돌 회피 방법

센서에서 측정값을 fusion center에 전송할 때 전송 과정에서 센서 간 충돌이 발생하면 fusion center에서 측정값을 수신하지 못한다. 충돌에 의해 전송에 실패한 센서는 재전송을 하기 때문에 시간지연과 추가 전력 소모가 발생한다.

본 논문에서는 전송 과정에서 time slot을 센서 값에 대응시키고 센서가 측정값 전송 시 센서 값에 대응

되는 time slot에 센서 ID만 전송하게 함으로써 데이터 overhead를 줄이고 전송시간을 분산시켜 충돌을 감소시키는 방법을 제안한다.

그림 2는 time slot을 센서 값에 대응시켜 구성하는 방법을 나타낸다. 측정값 범위를 L 개로 나누어 양자화한 각 구간을 Δd_l 라 할 때 Δd_l 내의 측정값을 갖는 센서는 l 번째 time slot t_l 을 사용하여 전송한다. 센서가 측정값 전송 시 구간 Δd_l 에 대응되는 time slot t_l 에 센서 ID만 전송하면 t_l 자체가 센서의 측정값을 나타내므로 fusion center는 센서 값 수신 없이 센서 값을 알게 되고 전체 데이터 overhead를 줄일 수 있게 된다.

제안한 측정값에 따른 time slot전송을 하기 위해서 네트워크 내의 모든 센서는 시간 동기화가 맞춰져 있어야 하며 센서 네트워크에서 시간 동기화를 위해 많은 알고리즘이 연구되어왔다^[15,16]. 따라서 본 논문에서는 이러한 알고리즘을 사용하여 시간 동기가 이루어져 있다고 가정한다.

만일 측정값의 양자화 구간 Δd_l 의 크기가 0으로 수렴한다면 여러 센서가 같은 time slot t_l 을 사용할 확률도 0으로 수렴하므로 충돌을 피할 수 있다. 그러나 실제 시스템에서 Δd_l 은 일정 구간 값을 갖기 때문에 같은 Δd_l 의 값을 갖는 다른 센서가 존재하며 충돌 확률이 증가하게 된다.

본 논문에서는 센서 측정값의 확률밀도함수 $p(d)$ 를 미리 알고 있다고 가정하면 동시에 Δd_l 의 값을 갖는 센서 수의 확률을 계산하여 Δd_l 을 가지는 센서 수가 많을 경우 스스로 전송을 제한하여 충돌을 줄이는 방법을 제안한다. 센서 측정값의 확률밀도함수 $p(d)$ 가 주어지면 하나의 센서가 Δd_l 의 값을 가질 확률 $P(\Delta d_l)$ 을 아래식과 같이 구할 수 있다.

$$\int_{\Delta d_l} p(d) = P(\Delta d_l) \quad (3)$$

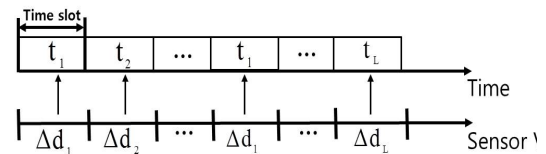


그림 2. 측정값에 따른 time slot 대응
Fig. 2. Time Slot corresponding to measured value of sensor

하나의 센서가 Δd_l 내의 값을 가질 확률이 $P(\Delta d_l)$ 이므로 이항분포를 이용하여 전체 N 개의 센서 중 n 개의 센서가 Δd_l 을 가질 확률 $P^{(n)}(\Delta d_l)$ 은 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$P^{(n)}(\Delta d_l) = {}_N C_n \times P(\Delta d_l)^n \times (1 - P(\Delta d_l))^{N-n} \quad (4)$$

이항 분포에서 시행 횟수가 커지고 발생 확률이 작아질 경우 이항 분포는 포아송 분포(Poisson Distribution)로 수렴한다. 따라서 Δd_l 의 값을 n 개의 센서가 동시에 가질 확률을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P^{(n)}(\Delta d_l) = \lambda^n \times \frac{e^{-\lambda}}{n!}, \quad \lambda = n \times P(\Delta d_l) \quad (5)$$

식 (5)의 확률 값은 time slot t_l 에서 n 개의 센서가 충돌할 확률을 나타낸다. 만일 센서 간 충돌이 발생하면 fusion center에서 센서간의 충돌을 회피하기 위해 추가적으로 직교코드를 이용할 수 있다. 직교코드로 PN 시퀀스를 사용할 때 동시 접속 가능한 센서 수는 한정되어 있다. 이 센서 수를 k 라 할 때 Δd_l 값을 갖는 센서 수 n 이 k 보다 많다면 접속에 실패한다. k 에 따라 센서 값 Δd_l 을 갖는 센서들이 t_l 에서 충돌이 발생할 확률 $P_c^{(k)}(\Delta d_l)$ 은 아래 식으로 구할 수 있다.

$$P_c^{(k)}(\Delta d_l) = \sum_{n=k+1}^N P_c^{(n)}(\Delta d_l) \quad (6)$$

만일 센서 값 Δd_l 을 갖는 센서 중 일부의 전송을 제한하여 t_l 에 전송을 시도하는 센서의 수가 k 이하가 되도록 한다면 전송 실패가 발생하지 않는다. 본 논문에서는 충돌을 피하기 위해 Δd_l 을 가지는 센서에서 균일 분포를 갖는 임의의 불규칙 전송 변수 R 을 발생시켜 전송 변수 R 이 전송 성공 확률 $1 - P_c^{(k)}(\Delta d_l)$ 보다 크면 전송하고 작으면 전송을 포기하는 알고리즘을 제안하며 이 과정은 표 1에 나타내었다.

제안한 알고리즘에서 센서가 전송에 참여할 확률은 $1 - P_c^{(k)}(\Delta d_l)$ 과 같으므로 전체 N 개의 센서 중 전

표 1. 센서의 전송 제한 알고리즘
Table 1. Sensor transmission restriction algorithm

Proposed Algorithm
1. Sensor measures $s(i, j)$
2. Find Δd_l when $s(i, j)$ is within Δd_l
3. Compute $P_c^{(k)}(\Delta d_l)$
4. Generate a random value R
5. If $1 - P_c^{(k)}(\Delta d_l) < R$
Transmit sensor ID in t_l slot time
else
Stop transmitting sensor ID
end

송하는 센서 수 n_{TX} 는 k 의 함수로 아래 식과 같이 예측할 수 있다.

$$n_{TX}(k) = N - \sum_{l=1}^L \sum_{n=k+1}^N P^{(n)}(\Delta d_l) \times n \quad (7)$$

전송에 참여하는 센서의 수 $n_{TX}(k)$ 가 식 (2)의 m 보다 커야 SVT를 이용하여 원래 센서 값을 복원할 수 있다. 그러므로 센서 값의 확률밀도함수를 알고 있는 경우 식 (7)을 이용하여 전송에 참여하는 센서의 수 $n_{TX}(k)$ 가 m 보다 커지는 Δd_l 과 k 를 계산하면 전송 과정에서 충돌 발생량이 줄어들고 fusion center에서는 SVT를 통해 전체 센서 값을 복원할 수 있다.

IV. 전산 모의실험

제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 전산 모의 실험을 진행하였다. 실험을 위한 센서 네트워크는 80개의 센서가 2.5m 간격으로 이루어져 있고, 센서가 측정할 온도는 확률밀도함수로 정규 분포를 갖는다고 가정하며 이를 표 2에 나타내었다. 주어진 표2의 센서 네트워크에 맞게 설계하기 위해 전송 센서 수 $n_{TX}(k)$ 가 최소 필요 센서 수 m 이상이 되는 Δd_l 과 k 을 구한다. 그리고 설계된 값을 이용한 제안된 방법과 Matrix Completion을 이용한 CSMA/CA와 성능 비교를 위해 전송 실패 수, 패킷 생성량, overhead로 인한 시간 지연, MSE error를 비교하였다.

표 2의 분포와 식 (6)을 이용하면 센서가 Δd_l 로 0.1℃를 갖는 경우 k 에 따른 충돌 확률 $P_c^{(k)}(\Delta d_l)$ 을 구하였다. 만일 10℃~15℃ 까지 각각 1℃간격으

표 2. 센서 측정 온도 분포

Table 2. Sensor measured temperature distribution

Temperature distribution	Normal distribution
Temperature average	10°C
Temperature Variance	2°C
Maximum temperature	20°C
Minimum temperature	0°C
Measured Matrix rank	4
sensor number	80
sensor distance	2.5 m
Channel model	log normal(10dB)

로 Δd_l 에 대한 충돌확률 $P_c^{(k)}(\Delta d_l)$ 을 구하면 그림 3과 같이 나타난다.

그림 3에서 k 가 3으로 설정하면 때 센서 값이 10°C~10.1°C내에 있는 Δd_{102} 의 경우 충돌 확률 $P_c^{(3)}(\Delta d_{102})$ 은 0.7 이 되고 15°C~15.1°C내에 있는 Δd_{152} 의 경우 충돌 확률 $P_c^{(3)}(\Delta d_{152})$ 은 1이 된다. 그러므로 k 가 3일 때 Δd_{102} 의 센서 값을 갖는 센서는 생성된 불규칙 전송 변수 R 이 0.3의 보다 작으면 전송을 포기한다. 그리고 Δd_{152} 의 센서 값을 갖는 센서는 발생시킨 불규칙 전송 변수 R 이 0보다 작으면 전송을 포기한다. 본 실험의 센서 네트워크에서 구현된 80개의 센서 중 실제 전송에 참여하는 센서의 수와 식 (7)을 이용하여 예측한 전송참여 센서 수 $n_{TX}(k)$ 를 k 에 따라 비교하여 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 볼 수 있듯 식 (7)을 이용하여 전송에 참여하는 센서의 수를 k 값과 Δd_l 에 따라 구할 수 있다. 표 2에서 보이는 바와 같이 측정값 행렬 M 의

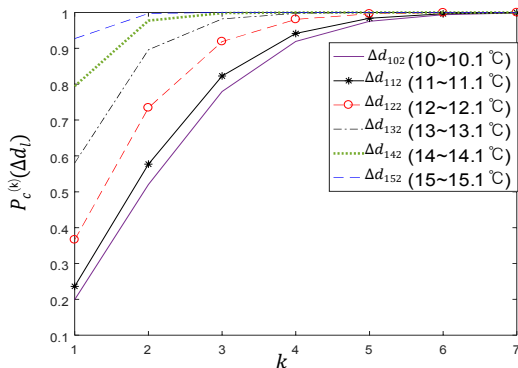


그림 3. Δd_l 과 k 에 따른 충돌 확률
Fig. 3. Probability of collision according to Δd_l and k

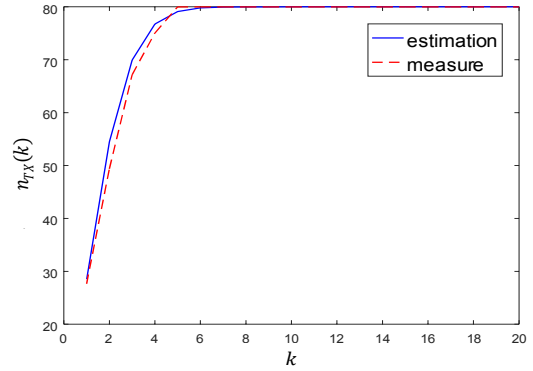


그림 4. k 값에 따른 전송 참여 센서 수
Fig. 4. Number of sensors participating in transmission by value k

rank가 4이고 센서 총 개수 N 이 80개 이므로 최소 센서 개수 m 은 70으로 구할 수 있다. 그러므로 센서가 표2의 측정값을 제안된 방법을 이용하여 전송할 때 전송에 참여하는 센서의 수 $n_{TX}(k)$ 가 최소 필요 센서 수 m 보다 커지는 k 값을 식 (7)을 이용하여 찾을 수 있다. fusion center와 센서 노드간의 통신 환경에 따라 전송이 실패하는 경우가 있기 때문에 전송 참여 센서 수 $n_{TX}(k)$ 는 m 값인 70보다 커야만 한다. (7)을 이용하여 예측하면 전송 참여 센서 수 $n_{TX}(k)$ 는 k 가 4일 때 77로 m 값인 70보다 크다. 따라서 k 는 4로 결정 할 수 있다.

본 논문에서는 시간 동기화가 이루어져 있다고 가정하였으나 실제로는 센서간의 시간 동기 오류가 발생한다. 따라서 시간 동기 오류로 인한 센서 값 오차와 양자화로 인한 센서 값 오차를 분석한다. 실험 환경은 802.11에서 guard interval은 time slot의 25%이며^[17] 802.11기반 시간동기 알고리즘 중 하나인 Self-Adjusting Timing Synchronization Function(SATSF)를 사용하여 시간동기가 이루어진다고 가정한다^[16]. SATSF 알고리즘의 최대 시간 동기 오류는 25usec이며^[16] 정규 분포를 가정한 경우 시간 동기화 오류와 양자화로 인한 센서 값의 오차를 그림5에 나타내었다.

그림 5에서 가로축은 slot의 시간길이를 나타내고, 세로축은 센서 값 오차를 나타낸다. 빨간 선은 센서 값의 양자화로 인한 오차를 나타내며 파란 선은 시간 동기 오류로 인한 오차를 나타낸다. time slot의 길이를 줄여 양자화 구간을 늘릴 경우 양자화로 인한 센서 값 오차는 줄어들지만 slot의 시간길이가 짧아지기 때문에 시간 동기 오류에 민감해 지고 센서 값 오차는

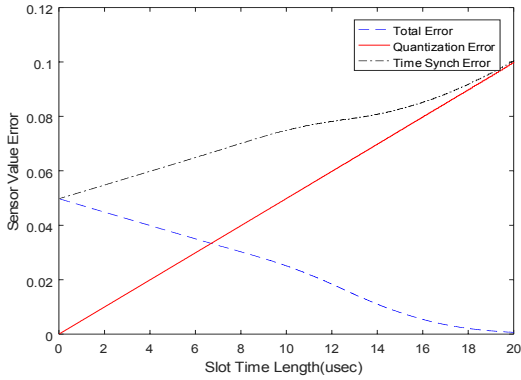


그림 5. 시간 동기 오류로 인한 측정값 오차와 양자화로 인한 측정값 오차
 Fig. 5. Sensor value error due to time synchronization error and quantization error

커지게 된다. 시간 동기 오류로 인한 센서 값 오차는 slot의 시간길이가 커질수록 점점 0에 수렴하게 된다. 따라서 시간 동기 오차에 민감하지 않도록 slot의 시간 길이를 설정해 주는 것이 필요하다. 본 논문에서는 slot의 시간길이를 20usec로 설정했고 이때 시간동기 오류로 인한 오차는 $6.6e-4^{\circ}C$ 이므로 이때 시간동기 오류로 인한 오차는 무시 할 수 있다.

위와 같이 제안 방법을 사용하여 전송한 경우와 Matrix Completion 알고리즘을 이용한 CSMA/CA^[10,11]로 전송한 경우 패킷 생성량과 시간 지연, 전송 실패 수를 비교하였다. 실험을 위한 물리계층 통신 변수는 표 3에 나타내었다. 설계된 CSMA/CA도 Matrix completion을 이용하며 70 개 이상의 센서 값을 전송하도록 설계하였다^[10,11].

표 3과 같은 환경에서 제안된 방법과 Matrix Completion을 이용한 CSMA/CA를 이용하여 표 2의

표 3. 전산 모의실험 환경표
 Table 3. Simulation environment

Parameter	Value
slot length	20 usec
SIFS	10 usec
DIFS	50 usec
CW	$31 < CW < 1023$
Tx power	100 mW
MAI threshold	5 dB
Processing Gain(SF)	50
Data packet size	50 Bytes
Control packet size	10 Bytes
Band width	22 MHz

센서 네트워크 환경에서 센서의 측정값을 fusion center에 초기 전송만 고려하였을 경우에 전송 실패 수, 시간 지연, 패킷 생성량, MSE error값을 표 4에 나타내었다.

표 4에 보인바와 같이 제안 된 방법을 사용할 경우 전송 실패하는 센서 수가 6.으로 Matrix Completion을 이용한CSMA/CA를 사용한 경우의 17%로 감소하고 총 패킷 생성량은Matrix Completion을 이용한 CSMA/CA를 사용한 경우의 약 73%로 줄어들게 된다. 또한 제안된 방법은 센서 값을 제외한 센서 ID만 전송하기 때문에 overhead가 줄어들어 센서값 전달을 위한 시간지연이 Matrix Completion을 이용한 CSMA/CA대비 22%로 감소하며, fusion center에서 복원한 센서 값 분포에 대한 MSE error 또한 89%로 감소하였다.

표 4. 실험 결과
 Table 4. Simulation result

	CSMA/CA using Matrix Completion	Proposed method
Transmission fail number	34	6
Transmission success number	71	71
Packet generation	105	77
MSE error	$0.097^{\circ}C$	$0.086^{\circ}C$
Time delay	37msec	8msec

V. 결 론

본 논문에서는 측정값의 low rank 특성을 이용한 Matrix Completion의 SVT 알고리즘을 이용하여 패킷 생성량을 줄이고 측정값에 대응되는 time slot에 센서 ID를 전송하여 충돌 확률과 overhead를 줄이는 방법을 제안하였다. 전산 모의실험을 통해 Matrix Completion을 이용한 CSMA/CA와 비교하여 제안된 방법을 사용할 경우 전송 실패 수가 17% 감소하고 패킷 생성량은 73%로 감소함을 보였다. 시간 지연 또한 Matrix Completion을 이용한 CSMA/CA에 비해 22%로 감소하고 fusion center에서 측정값을 복원한 경우 Matrix Completion을 이용한 CSMA/CA에 비해 88%로 MSE error가 낮음을 보였다.

References

- [1] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *J. Sciencedirect Computer Netwoks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292-2330, Aug. 2008.
- [2] J.-I. Kong, J.-H. Lee, J. Kang, and D.-S. Eom, "Energy efficient clustering algorithm for surveillance and reconnaissance applications in wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 37, no. 11, pp. 1172-1183, Nov. 2012
- [3] K.-H. Jung and Y.-J. Suh, "An efficient collision resolution method in wireless sensor networks based on IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA," *J. KICS*, vol. 37 no. 9, pp. 750-759, Sept. 2012.
- [4] H. R. Lee, K.-H. Jung, and Y.-J. Suh, "Contention/Collision mitigation scheme in IEEE 802.15.4 mesh sensor networks," *J. KICS*, vol. 38 no. 8, pp. 683-691, Aug. 2013.
- [5] M. Heusse, F. Rousseau, G. Berger-Sabbatel, and A. Duda, "Performance anomaly of 802.11b," in *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Commun.*, vol. 2, pp. 836-843, San Francisco, USA, Mar. 2003.
- [6] C. S. Hwang, K. Seong, and J. M. Cioffi, "Opportunistic p-persistent CSMA in wireless networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 183-188, Istanbul, Turkey, Jun. 2006.
- [7] W. Ye, J. Heldemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Int Conf. Comput. Commun. Soc.*, pp. 1567-1576, New York, USA, Jun. 2002.
- [8] G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl, "A rate-adaptive MAC protocol for multi-Hop wireless networks," in *Proc. ACM Int Conf. 7th Computing and Networking*, pp. 236-351, Rome, Italy, Jul. 2001.
- [9] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min, and M. L. Sichitiu, "Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks," *J. IEEE Trans. Networking*, vol. 16, no. 3, pp. 511-524, Jun. 2008.
- [10] F. Fazel, M. Faze, and M. Stojanovic, "Design of a random access network for compressed sensing," in *Proc. IEEE Int Conf. Inf. theory and Appl.*, pp. 1-9, San Diego, USA, Jun. 2011.
- [11] F. Fazel, M. Fazel, and M. Stojanovic, "Random access compressed sensing in underwater sensor networks," in *Proc. IEEE Conf. Commun., Control, and Comput.*, pp. 768-774, Illinois, USA Oct. 2010.
- [12] B. Recht, "A simpler approach to matrix completion," *J. Machine Learning Res.*, vol. 12, pp. 3413-3430, Dec. 2011.
- [13] E. J. Candes and B. Recht, "Exact matrix completion via convex optimization," *J. Foundations of Computational Math.*, vol. 55, no. 6, pp. 717-772, Dec. 2009.
- [14] J. F. Cai, E. J. Candes, and Z. W. Shen, "A singular value thresholding algorithm for matrix completion," *J. SIAM Optimization*, vol. 20, no. 4, pp. 1956-1982, Oct. 2008.
- [15] J. He, P. Cheng, and J. Chen, "Time synchronization for random mobile sensor networks," *J. IEEE Veh. Technol.*, vol. 63, no. 8, pp. 3935-3946, Feb. 2014.
- [16] D. Zhou and T. H. Lai, "A compatible and scalable clock synchronization protocol in IEEE 802.11 ad hoc networks," in *Proc. IEEE Int Conf. Mob. Ad hoc and Sensor Syst.*, pp. 550-558, Oslo, Norway, Jun. 2005.
- [17] IEEE Std 802.11. Part11: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification*, Mar. 2012.

안 종 민 (Jong-min Ahn)



2015년 2월 : 인하대학교 전자
공학과 졸업
2017년 2월 : 인하대학교 전자
공학과 석사졸업
2017년 3월~현재 : 인하대학교
전자공학과 박사과정

<관심분야> 이동통신, 무선센서 네트워크, Beyond
4G

정 재 학 (Jae-hak Chung)



1988년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 학사 졸업
1990년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 석사 졸업
2000년 : University of Texas
at Austin 전기전산 학과 박
사 졸업

2000~2001년 : Post doctoral fellow, University of
Texas at Austin

2001~2005년 : 삼성종합기술원 수석연구원

2005년~현재 : 인하대학교 정교수

<관심분야> Cognitive radio, 차세대 무선 이동 통
신, MIMO-OFDM, UWB, Cross layer 설계

강 지 웅 (Ji-woong Kang)



2015년 2월 : 인하대학교 전자
공학과 졸업
2017년 2월 : 인하대학교 전자
공학과 석사졸업
<관심분야> 이동통신, 무선센
서 네트워크, Beyond 4G