

# 확률 모델 기반의 스케줄링 기법\*

김찬명\*, 강인석\*\*, 한연희†

\* \*\*† 한국기술교육대학교 첨단기술연구소 지능네트워크연구실  
e-mail:{cmdr, iseka, yhhan}@kut.ac.kr

## A Scheduling Scheme under Probabilistic Model

Chan-Myung Kim\*, In-Seok Kang\*\*, Youn-Hee Han†

\* \*\*† Laboratory of Intelligent Networks,  
Advanced Technology Research Center

### 요 약

CTC(Connected Target Coverage) 문제는 주어진 전체 타겟을 관측하고 관측한 데이터를 싱크노드까지 전송하는데 관여하는 센서집합의 개수를 최대화하여 네트워크 수명을 최대화하는 문제이다. 본 논문은 확률 센싱 및 연결성 모델을 기반으로 CTC문제에 접근한다. CTC문제를 해결하기 위해 휴리스틱 알고리즘인 CWGC-PM 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 알고리즘이 CTC문제를 해결하기에 적합함을 보인다. 또한 확률모델이 다양한 커버리지 및 연결성 요구조건에 적용될 수 있음을 보인다.

### 1. 서론

무선 센서 네트워크에서 주어진 모든 타겟을 관측하고 관측한 데이터를 싱크노드까지 전달하는 문제는 중요한 문제이다. CTC(Connected Target Coverage) 문제[1]는 제한된 에너지를 지닌 센서들로 주어진 모든 타겟을 관측해야 하는 커버리지 문제[2]에 데이터를 싱크노드까지 전달하는 연결성 또한 고려한 문제이다. [1]에서는 타겟 관측에 관여하는 센서들을 그룹화 하여 트리를 구성하고 이러한 트리의 개수를 최대로 찾아낼 때 네트워크 수명 또한 증가함을 보였다.

무선 센서 네트워크의 기존의 많은 연구[1][2]들은 커버리지와 연결성 면에서 이진 모델을 사용했다. 이진 모델은 센서를 중심으로 센싱반경, 통신반경과 동일한 반경을 가지는 원의 형태를 각각 관측구역과 통신거리로 정한다. 즉, 타겟이 센싱반경 안에 존재하면 항상 관측되고 두 센서가 통신반경 안에 존재하면 항상 통신가능하다고 가정한다. 그러나 이러한 이진 모델은 현실세계의 다양한 특성을 반영하지 못한다는 단점이 있다.

본 논문에서는 확률 커버리지 및 연결성 모델을 기반으로 CTC문제를 해결하고자 한다. 제안하는 휴리스틱 알고

리즘인 CWGC-PM(Communication Weighted Greedy Cover-Probabilistic Model) 알고리즘은 확률 모델을 기반으로 CTC문제를 해결하기 위해 디자인되었다. 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘이 CTC 문제를 해결하기에 적합함을 보이고 확률모델이 다양한 커버리지 및 연결성 요구조건에 적용될 수 있음을 보인다.

### 2. 확률 모델

본 절에서는 음파나 지진파 센서가 주어진 타겟을 관측하는 상황을 가정하는 확률 커버리지 모델에 대해 기술한다. 타겟 관측 확률은 센서와 타겟의 거리에 따라 영향을 받으며 다음과 같은 공식[3]에 의해 계산된다.

$$c_t(s) = \begin{cases} 0, & \text{if } r + r_e \leq d(s, t) \\ e^{-\lambda a^\beta}, & \text{if } r - r_e < d(s, t) < r + r_e \\ 1, & \text{if } r - r_e \geq d(s, t) \end{cases} \quad (1)$$

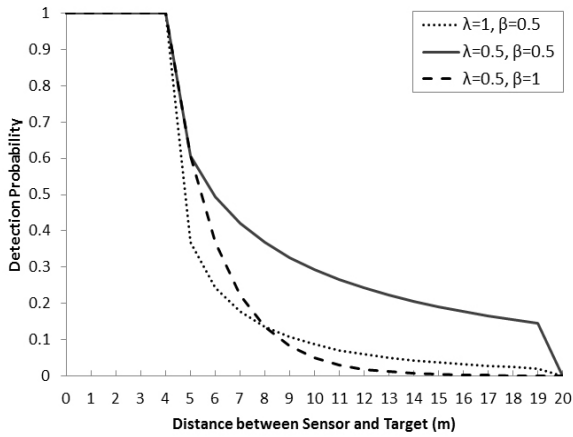
$c_t(s)$ 는 타겟  $t$ 가 센서  $s$ 에 의해 관측될 확률을 뜻하며  $r_e$ 는 관측의 불확실성을 뜻한다.  $d(s, t)$ 는 센서  $s$ 와  $t$ 의 유클리디안 거리를 뜻하고  $a$ 는  $d(s, t) - (r - r_e)$ 이다.  $\lambda$ 와  $\beta$ 는 다양한 종류의 관측확률모델을 나타내기 위한 상수값이다. 그림 1은  $r=12m$ ,  $r_e=4m$ 일 때  $\lambda$ 와  $\beta$ 값에 따른 관측확률의 변화를 나타낸다.

타겟  $t$ 가 센서 집합  $S_t$ 의 구성요소들에 의해 관측될 때 중복된 관측 확률은 다음과 같이 계산된다.

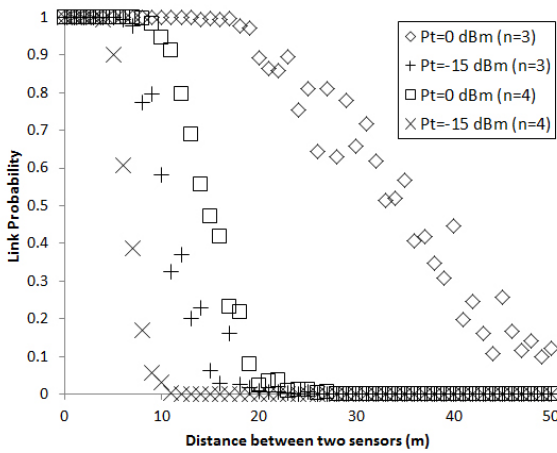
$$c_t(S_t) = 1 - \prod_{s \in S_t} (1 - c_t(s)). \quad (2)$$

\* 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행(2011-0005057)되었으며, 또한 이 논문은 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다

† 한연희: 교신저자



(그림 1)  $\lambda$ 와  $\beta$  값에 따른 관측확률의 변화



(그림 2)  $P_t$ 와  $n$  값에 따른 연결성 확률의 변화

한편, 연결성 면에서 통신 특성을 나타내기 위해 많은 연구들에 의해 연구되어온 Log-normal 경로손실모델 기반 확률 모델[4]이 사용되었다. 송신자의 송신파워를  $P_t$ 라고 하고 송신자와 수신자 사이의 거리를  $d$ 라고 할 때 수신 신호 세기  $P_r(d)$ 는 다음과 같다.

$$P_r(d) = P_t - (PL(d_0) + 10n \log_{10}(d/d_0) + X_\sigma) \quad (3)$$

이 때  $PL(d_0)$ 은 기준거리  $d_0$ 에서의 경로손실이고  $n$ 은 전파경로손실계수이며  $X_\sigma$ 는 평균이 0이고 표준편차가  $\sigma$ 인 가우시안 랜덤변수이다. 링크의 연결 확률은 수신자가 수신 신호 세기 임계값  $\gamma$  이상으로 신호를 수신할 확률과 같으며 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

$$\Pr[P_r(d) > \gamma] = \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(\frac{\gamma - P_r(d)}{\sigma \sqrt{2}})] \quad (4)$$

[5], [6]에 따라 센서는 이산적인 송신 파워 레벨을 가지며 송신 파워 레벨을 조절하여 통신범위를 조정할 수 있다. 그림 2는 송신 파워와 전파경로손실계수를 변화시켰을 때 두 센서간의 거리에 따른 연결성 확률을 나타낸다. 파라미터로  $\gamma=10.9mW$  [4],  $d_0=1m$ ,  $PL(d_0)=46.67dB$ ,  $\sigma=4.0$ 이 사용되었다.

### 3. CTC(Connected Target Coverage) 문제

#### 1. 문제 정의

CTC 문제[1]는 타겟 관측 (coverage)[2]과 연결성(connectivity)을 동시에 고려하는 문제로 본 논문에서는 확률모델에 맞게 수정되었다. 무선 센서 네트워크에서 위치가 알려진  $M$ 개의 타겟과 제한된 에너지를 지닌  $N$ 개의 센서가 임의로 배치되었을 때, 네트워크 수명을 최대화하기 위하여 다음과 같은 조건을 필요로 한다.

1) 각 타겟은 최소 하나 이상의 센서에 의해 커버리지 임계값  $T_{cvg}$  이상의 확률로 관측되어야 한다.

2) 관측한 데이터를 싱크노드까지 전송할 수 있는 경로가 존재하여야 하며 각 센서간의 링크는 연결성 임계값  $T_{conn}$  이상의 확률로 전송 가능해야 한다.

이 때 임의의 시간에 타겟 관측과 데이터 전송에 관여하는 모든 센서의 집합은 싱크노드가 루트로 시작되는 하나의 트리로 나타낼 수 있으며 이러한 트리를 커버 트리(Cover Tree)로 정의할 수 있다. [1]은 CTC문제를 커버 트리의 개수를 최대화하는 MCT(Maximum Cover Tree) 문제로 해석하고 있다.

#### 2. 커버 트리(Cover Tree)

각 센서들은 임의의 시간에 활성상태와 수면 상태 중 하나의 상태를 유지한다. OTI(Operational Time Interval)  $\tau$ 는 각 센서들의 상태가 바뀌지 않는 하나의 단위 시간을 의미한다.

임의의 시간  $\tau$  동안 활성화 되어 있는 센서들은 타겟을 관측하는 센서 집합  $S_s(\tau)$ 과 관측 데이터를 증계하는 센서 집합  $S_r(\tau)$ 으로 구분한다. 이 때 커버 트리  $Y(\tau)$ 는 다음 식과 같이 정의한다.

$$Y(\tau) = (S_s(\tau) \cup S_r(\tau) \cup \kappa, E(\tau)) \quad (5)$$

여기서  $E(\tau)$ 는 관측한 데이터를 증계하는 경로의 집합을 뜻하고  $\kappa$ 는 싱크노드를 뜻한다. CTC 문제에서 각각의  $Y(\tau)$ 는 1), 2)조건을 만족해야 한다.

#### 3. 에너지 모델

[1]에 따라  $\tau$ 동안 각 타겟에 대하여 센서가 생성하는 데이터 비트 발생률(Bit Rate,  $B(\tau)$ )이 동일하다고 가정한다.  $e_s$ 와  $e_r$ 은 각각 임의의 센서가 임의의 타겟에서 발생하는 1bit의 데이터를 관측하고 수신하는데 소모되는 에너지를 나타낸다.  $P_t^{T_{conn}}$ 이 센서  $s_i$ 가 센서  $s_j$ 에  $T_{conn}$ 을 만족하면서 데이터를 보낼 수 있는 최소의 전송파워라고 할 때  $e_t^{T_{conn}}$ 은  $P_t^{T_{conn}}$ 의 송신파워로 1bit의 데이터를 전송할 때 소모하는 에너지이다.  $P_t^{T_{conn}}$ 는 다음과 같은 식에

의해 구해진다.

$$P_t^{T_{conn}} = -\sigma \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(1-2T_{conn}) + \gamma + PL(d_0) + 10 \log_{10}(d/d_0) + X_\sigma. \quad (6)$$

식(6)을 통해 도출된  $P_t^{T_{conn}}$ 을 [7]의 표2에 대입하여  $e_t^{T_{conn}}$ 을 구할 수 있다.  $\tau$  시간 동안 형성할 수 있는 커버 트리  $Y(\tau)$ 에 속한 임의의 센서  $s$ 의 에너지 소비 모델은 다음 식(7)과 같다.

$$E(s, Y(\tau)) = \left\{ \begin{array}{l} e_s B(\tau) + e_t^{T_{conn}} B(\tau), \\ s \in S_s(\tau) \text{ and } s \notin S_r(\tau); \\ (e_t^{T_{conn}} + e_r) B(\tau) D(s, Y(\tau)), \\ s \in S_r(\tau) \text{ and } s \notin S_s(\tau); \\ e_s B(\tau) + e_t^{T_{conn}} B(\tau) \\ + (e_t^{T_{conn}} + e_r) B(\tau) D(s, Y(\tau)), \\ s \in S_s(\tau) \cap S_r(\tau); \\ 0, s \notin S_s(\tau) \text{ and } s \notin S_r(\tau). \end{array} \right\} \quad (7)$$

$D(s, Y(\tau))$ 는 커버 트리  $Y(\tau)$ 에서 센서  $s$ 의 child노드의 개수를 뜻한다.

#### 4. 제안 알고리즘 의사코드

표 1은 제안 알고리즘의 의사코드를 나타낸다. 알고리즘은 다음과 같은 파라미터를 사용한다.

- $P_{\max}^t$ : 센서의 최대 송신파워
- $S_l$ : 에너지 잔량이 있는 센서의 집합
- $E_r(s)$ : 센서  $s$ 의 에너지 잔량
- $w_s$ :  $s$ 로부터  $\kappa$ 까지 경로가중치의 합
- $R(s, Y)$ : 트리  $Y$ 에 존재하는 소스 센서  $s$ 로부터  $\kappa$ 까지의 센서집합
- $\bar{R}(s, Y)$ :  $R(s, Y)$ 에서  $s$ 와  $\kappa$ 를 제외한 센서들의 집합

알고리즘은 가능한 모든 센서의 집합들 중 가장 높은 Profit Value( $W(\phi)$ )를 가진 센서집합  $\phi^*$ 를 선택하여 관측 센서 집합  $S_s(\tau)$ 에 추가한다. Profit Value 공식은 다음과 같다.

$$W(\phi) \equiv \frac{\sum_{s \in \phi} |T(s) - (T - T') - \hat{T}(\phi)|}{\sum_{s \in \phi} (1 - c_t(s)) \times w_s} \quad (8)$$

이 때,  $T(s)$ 는 센서  $s$ 에 의해 관측되는 타겟을 뜻하고  $\hat{T}(\phi)$ 는 센서 집합  $\phi$ 의 구성요소들에 의해 관측되는 타겟을 뜻한다. 만약 센서 집합  $\phi$ 가 임의로 선정된 타겟  $t$ 를 관측할 확률  $c_t(\phi)$ 가 관측 요구조건  $T_{avg}$ 를 넘지 못할 경우  $W(\phi)$ 는 0이 된다.

<표 1> 제안 알고리즘 의사코드

---

**CTCP-PM algorithm** ( $S, T, \kappa, \tau, T_{avg}, T_{conn}$ )

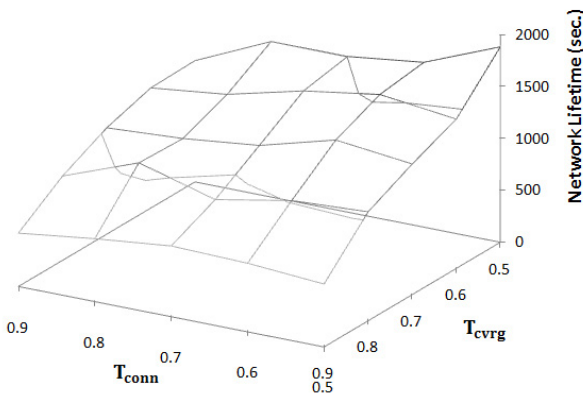
---

- 1:  $S_l = S, x = 0$
- 2: **for each**  $s \in S_l$  **do**
- 3:  $E_r(s) = E_0(s), w_s = \infty$
- 4: **end for**
- 5: **while**  $\cup_{s \in S_l} T_s = T$  and  $S_l \neq \emptyset$  **do**
- 6: **for each** link( $s_i, s_j$ ) **do**
- 7: calculate  $P_t^{T_{conn}}$
- 8: if  $P_t^{T_{conn}} < P_t^{\max}$  then
- 9:  $w_{i,j} = e_t^{T_{conn}} \times E_0(s_i) / E_r(s_i)$ ;
- 9: **end for**
- 10: Build a MWCT  $Y_m$  connecting each sensor  $s \in S_l$  to the sink node
- 11: **for each** sensor  $s$  in  $Y_m$
- 12: The sum of link weights in the route  $R(s_i, Y_m)$  is set to  $w_s$
- 13: **end for**
- 14:  $x = x + 1$ ;  $S_s' = \emptyset$ ;  $T' = T$ ,  $\tau_x = \tau$ ;  $Y(\tau_x) = \{\kappa\}$ ;
- 15: **while**  $T' \neq \emptyset$  **do**
- 16: Randomly select a target  $t$
- 17: Find a sensor set  $\phi^*$  covering  $t$  with maximum profit  $W(\phi^*)$ ;
- 18:  $S_s' = S_s' \cup \phi^*$ ;
- 19:  $T' = T' - \hat{T}(\phi^*)$ ;
- 20: **for each**  $s^* \in \phi^*$  **do**
- 21: **for each**  $s \in \bar{R}(s^*, Y_m)$  **do**
- 22:  $w_s = w_s + (e_t^{T_{conn}} + e_r) B(\tau) \times w_s / E_r(s_i)$ ;
- 23: **end for**
- 24: **end for**
- 25: **end while**
- 26: **for each**  $s \in S_s', Y_x = Y_x \cup R(s, Y_m)$ ; **end for**
- 27: **for each**  $s \in Y_x$
- 28:  $\tau_x = \min(\tau_x, \frac{E_r(s)}{E(s, Y(\tau_x))} \tau_x)$
- 29: **end for**
- 30: **for each**  $s \in Y(\tau_x)$
- 31:  $E_r(s) = E_r(s) - E(s, Y(\tau_x))$ ;
- 32: **end for**
- 33: Remove isolated and dead sensors from  $S_l$
- 34: **end while**
- 35: **return**  $Y(\tau_1), Y(\tau_2), \dots, Y(\tau_x)$  and  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_x$

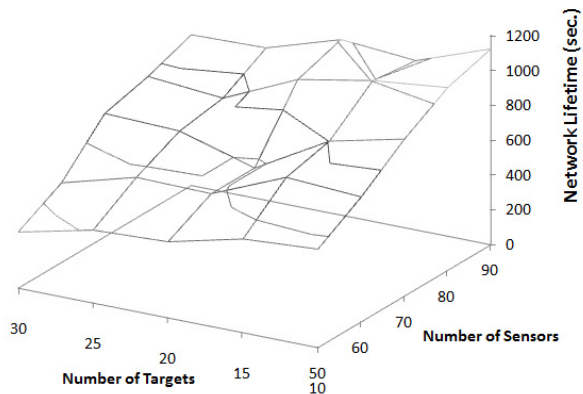
---

#### 4. 성능 평가

본 절에서는 제안하는 CWGC-PM 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 평가한다. 기본적으로  $50m \times 50m$  영역의 중앙(25,25)에 싱크노드가 위치하고  $r=15m$ ,  $r_c=4m$ ,  $\lambda=0.5$ ,  $\beta=0.5$ 인 60개의 센서와 15개의 타겟이 임의로 배치되는 상황을 고려한다. 각 센서의 최초 에너지  $E_0$ 는  $20J$ ,  $\tau=60$  sec.,  $n=2.2$ ,  $e_s=150nJ/bit$ ,  $e_r=150nJ/bit$ ,  $e_t=60.6 \sim 122.7 nJ/bit$ [5]를 적용하였다. 각 소스노드에 의한 데이터 생성률은  $250 Kbps$ 를 적용하였고 각 실험은 25회씩 수행하였다.



(그림 3)  $T_{conn}$ 과  $T_{cvrg}$ 의 변화에 따른 네트워크 수명 비교



(그림 4) 센서 수와 타겟 수의 변화에 따른 네트워크 수명 비교

그림 3은  $T_{conn}$ 과  $T_{cvrg}$ 의 변화에 따른 네트워크 수명 변화를 나타낸다. 그림 3을 통해  $T_{conn}$ 과  $T_{cvrg}$ 가 증가할수록 네트워크 수명이 감소함을 알 수 있다. 그러나  $T_{conn}$ 의 증가에 따른 네트워크 수명변화는 크지 않다.  $T_{conn}$ 이 낮을수록 센서는 데이터를 보다 멀리 전송할 수 있다. 하지만 많은 에너지 소모로 인해 그러한 원거리 전송은 자주 일어나지 않는다.

그림 4는 센서 수와 타겟 수의 변화에 따른 네트워크 수명 변화를 나타낸다. 그림 4를 통해 센서 수가 줄어들수록, 타겟 수가 증가할수록 네트워크 수명이 감소함을 알 수 있다. 타겟 관측을 위해 활성화될 수 있는 센서의 수가 증가할수록 보다 많은 스케줄링 집합을 찾을 수 있기 때문에 네트워크 수명은 증가한다. 반대로 타겟의 수가 많을수록 하나의 커버 트리를 생성할 때 많은 센서가 관여하게 되어 네트워크 수명이 감소한다.

#### 5. 결론

무선 센서 네트워크에서 주어진 모든 타겟을 관측하고 관측한 데이터를 싱크노드까지 전달하는 CTC문제는 중요한 문제이다. 본 논문에서는 기존의 연구와는 달리 현실세계의 다양한 특성을 고려하기 위해 확률 커버리지 및 연결성 모델을 기반으로 CTC문제에 접근하였다. 휴리스틱 알고리즘인 CWGC-PM을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘이 확률 커버리지 모델을 기반으로 CTC문제를 해결하기에 적합함을 보였다. 또한 확률모델이 다양한 커버리지와 연결성 요구조건에 적용될 수 있음을 보였다.

#### 참고문헌

- [1] Q. Zhao and M. Gurusamy, "Lifetime Maximization for Connected Target Coverage in Wireless Sensor Networks," IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, Vol. 16, No. 6, Dec. 2008.
- [2] M. Cardei, M. T. Thai, Y. Li, and W. Wu, "Energy-Efficient Target Coverage in Wireless Sensor Networks", IEEE Infocom Vol. 3, pp. 1976-1984, 2005.
- [3] Y. Zou and K. Chakrabarty, "Sensor Deployment and Target Localization based on Virtual Forces", In Proc. of IEEE INFOCOM, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies Vol. 2, 2003.
- [4] M. Hefeeda and H. Ahmadi, "Network Connectivity under Probabilistic Communication Models in Wireless Sensor Networks," IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS 2007), October 2007.
- [5] S.K. Mitra, J. Banerjee, A. Chakraborty, and M.K. Naskar, "Data Gathering in Wireless Sensor Network using Realistic Power Control," International Conference on Communication, Computing and Security (ICCCS 2011), February 2011.
- [6] "Micaz datasheet." [http://bullseye.xbow.com:81/Products/Product\\_pdf\\_files/Wireless\\_pdf/MICAz\\_Datasheet.pdf](http://bullseye.xbow.com:81/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAz_Datasheet.pdf).