공간상관 센서네트워크에서 신뢰성 있는 데이터 수집을 위한 측정의 분배

변상선
부산가톨릭대학교

A Measurement Allocation for Reliable Data Gathering in Spatially Corrected Sensor Networks

Sang-Seon Byun
Catholic University of Pusan
E-mail : ssbyun@cup.ac.kr

요 약

이 논문에서는 공간상관 (spatial correlation) 센서네트워크에서 효과적이고 신뢰성있는 센서 데이터 수집을 위한 각 센서의 측정 확률 분배를 고려한다. 즉, 신뢰성이 높은 측정 데이터를 전달해주는 센서에게 더 높은 측정 확률을 분배하여 더 자주 측정되게 하는 것이다. 상관 모델은 각 센서의 전송파워 제한, 측정과정과 무선전송과정에서 발생될 수 있는 노이즈, 무선 채널의 감쇄를 고려하여 만들어진다. 그리고, 데이터 수집의 신뢰성은 데이터 수집 노드 (sink node)에서 왜곡 오차 (distortion error)를 계산함으로써 측정된다.

우리는 이 측정 분배를 정의된 공간상관상에서 협력게임으로 모델링하고 각 센서의 측정 확률을 Shapley Value를 통해 할당한다. Shapley Value는 협력게임에서 각 플레이어의 공헌도를 측정하는 방법으로, 공간상관 센서네트워크에서 각 센서들의 데이터 수집의 공헌도를 측정하는 데 사용될 수 있다. 따라서, 우리는 각 센서의 공헌도에 비례하여 측정 확률을 분배하는 것이다.

ABSTRACT

In this paper, we consider a measurement allocation problem for gathering reliable data from a spatially correlated sensor field. We allocate the probability of each sensor's being measured considering its marginal contribution in entire data gathering; higher measurement probability is given to a sensor that gives higher reilable data. First we establish a correlation model considering limit in each sensor's transmission power, noise in the process of measurement and transmission, and attenutations in wireless channel. Then we evaluate the reliability of gathered data by estimating distortion error in sink node.

We model the measurement allocation problem in spatially correlated sensor field into a cooperative game, and quantifiy each sensor's marginal contribution using Shapley Value. Then, the probability of each sensor's being measured is given in proportion to the Shapley Value.

키워드

무선센서네트워크, 공간상관, 측정분배, 협력게임, Shapley Value

Ⅰ. 서 론

무선센서네트워크에서 측정되는 데이터의 공간 상관관계 (spatial correlation)를 이용하면 신뢰성 있는 측정과 센서의 에너지 절약 측면에서 매우 유리하다. 이미 많은 연구에서 무선센서네트워크

에서 공간상관관계를 이용하여 성능을 향상시키는 연구가 이루어지고 있다. 예를 들면 i) 센서들의 배치 [1], ii) 측정 센서의 선택 [2], iii) 센서들의 밀도 결정 [3], iv) 측정 분배 [4], v) 멀티홉의 고려 [5] 등이 있다.

이 논문에서는 접근이 불가능한 센서 필드 (전장의 적군 접전 지역, 방사능 오염 지역과 같은)를 고려하고, 센서들은 항공기 또는 포를 이용하여 임의의 지역으로 투하되는 상황을 가정한다. 이런 환경에서 이벤트가 발생하는 위치에 따라 각 센서들이 제공해주는 정보의 질에는 차이가 있게 된다. 즉, 이벤트의 위치와 가까운 곳에 있는 센서가 더 정확한 정보를 전해줄 확률이 높다 [6]. 따라서, 더 높은 정확도의 정보를 제공해 주는 센서를 더 자주 측정하는 것이 좋게 되는데, 이렇게 하기 위해서는 이벤트의 위치에 따른 각 센서들의 상대적 측정 정확도를 정량화 할 필요가 있다.

각 센서들의 측정 정확도, 즉, 이벤트 측정에 미치는 공헌도를 정량화 하기 위해 우리는 센서의 측정 할당 문제를 게임이론의 협력게임 (cooperative game)으로 모델링하고 왜곡오차 (distortion error)의 역수를 협력게임의 특성함수 (characteristic function)으로 정의한다. 특성함수는 협력게임에서 참가자들의 협력으로 얻어진 재화이며 이 재화는 각 참가자들의 공헌도 (marginal contribution)에 비례하여 공정하게 각 참가들에게 분배되어야 한다. 재화의 분배는 Shapley Value [7]를 통해 이루어지며, 공간상관센서들의 측정 문제에서는 더 낮은 상관계수를 갖는 센서가 더 높은 공헌도, 즉 더 높은 Shapley Value를 갖게 된다.

하지만, 정확한 Shpley Value의 계산은 매우 높은 복잡도를 갖는 관계로 합리적인 시간안에 계산하는 것이 불가능하다 [8]. 따라서, 우리는 randomized 방법에 근거하여 근사적인 Shpleay Value를 측정한다.

II. 공간상관모델

이 논문에서 사용하게 될 공간상관모델은 센서의 위치, 전송파워, 채널 및 측정오차를 반영하여 실제 이벤트 값과 측정된 값의 평균제곱근편차 (mean square error) - 즉, 왜곡오차 - 를 계산하는 방법을 제시하도록 정의된다 (그림 1 참조). U와 $\hat{U}$를 각각 이벤트 소스의 실제 값과 sink에서 측정된 값으로 정의하면 왜곡오차는 아래와 같이 정의 된다.

$$D_E = E[(U - \hat{U})^2] \quad (1)$$

W_i는 센서 i의 U에 대한 측정값이며 다른 센서들의 측정값과 상관관계에 있다고 가정한다. W_i가 결합 가우시안 확률변수 (joint Gaussian random variable)을 갖는다고 가정하면 아래의 식이 우선 성립한다.

$$E[W_i] = 0, \quad var[W_i] = \sigma^2_{W_i}, \ \forall i \in N \quad (2)$$

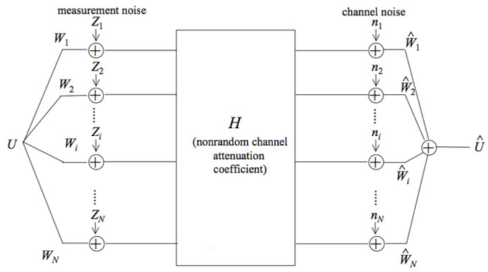

그림 1. 공간상관관계를 갖는 센서측정 모델

식 (2)에서 N은 전체 센서의 집합을 표현한다. 그리고, 센서 i와 j의 공분산 (covariance) 행렬 $K(i, j)$는 $\gamma = \alpha \parallel i - j \parallel$, $\alpha > 0$ 라고 정의 했을 때, $\gamma < 2\pi$ 인 경우 식 (3)과 같이 정의되고, $\gamma \geq 2\pi$ 경우는 0이 된다.

$$K(i,j) = \frac{(2\pi - \gamma)(1 + \cos(\gamma)/2) + 2/3\sin(\gamma)}{3\pi} \quad (3)$$

Z_i와 n_i를 센서 i의 측정 잡음과 채널 잡음으로 표현하고 i.i.d. ~ $N(0, \sigma_z^2)$와 i.i.d ~ $N(0, \sigma_n^2)$를 따른다고 가정한다. 그러면, sink에서 측정되는 센서 i의 측정값은 아래와 같다.

$$\hat{W}_i = \sqrt{\frac{P_i}{\sigma_W^2 + \sigma_Z^2}} \, h_i (W_i + Z_i) + n_i \quad (4)$$

식 (4)에서 P_i는 센서 i가 사용할 수 있는 전송파워이고 h_i는 채널감쇄요소 (channel attenuation factor)를 표현한다. 여기서 센서들은 차례대로 하나씩 측정된다고 가정하면 센서들간에 전송 간섭은 없게 된다.

$\hat{U}(S)$를 전체 센서의 부분 집합 $S \subseteq N$에 속한 센서들만 측정했을 때 sink에서 측정된 값이라고 하면 아래의 식이 성립한다.

$$\hat{U}(S) = \frac{1}{|S|} \sum_{i \in S} \hat{W}_i \quad (5)$$

그리고, 식 (1)은 다음과 같이 S에 대해서 다시 정의된다.

$$D_E(S) = E[(U - \hat{U}(S))^2] \quad (6)$$

식 (2)~(5)를 토대로 식 (6)을 다시 풀어쓰면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} D_E(S) &= \sigma_W^2 - \frac{2}{|S|\sqrt{\sigma_W^2+\sigma_Z^2}} \sum_{i \in S} \sqrt{P_i} h_i \mathcal{K}(U,i) \\ &+ \frac{1}{|S|^2} \sum_{i \in S} P_i h_i^2 \\ &+ \frac{1}{|S|^2(\sigma_W^2+\sigma_Z^2)} \sum_{i \in S} \sum_{j \in S; i \neq j} \sqrt{P_i P_j} h_i h_j \mathcal{K}(i,j) \\ &+ \frac{\sigma_n^2}{|S|}, \end{aligned} \quad (7)$$

III. 측정할당을 위한 협력 게임 모델

측정할당문제는 센서들의 균등한 에너지 소모와 측정품질을 동시에 고려하는 것이다. 측정할당문제는 다음과 같이 정의된다.

정의 1 (측정할당문제): 센서필드에서 발생되는 사건을 측정하는데 있어서 각 센서들이 측정의 정확성에 기여하는 정도에 비례하여 측정 확률을 분배한다.

그리고, 센서들을 협력게임의 참가자로 하고, 식 (6)의 역수를 특성함수로 정의내리게 되면 다음과 같은 측정할당게임을 정의내릴 수 있다.

정의 2 (측정할당게임): 측정할당게임 (N, v)는 모든 coalition $S \subseteq N$에 대해서 다음의 특성함수로 정의된다.

$$v(S) = [D_E(S)]^{-1} \quad (8)$$

$v(S)$는 센서 집합 S에 의해 주어지는 왜곡오차의 역수다. 그리고, 각 센서의 Shapley value는

$$\Delta_i v(S) = [D_E(S \cup i)]^{-1} - [D_E(i)]^{-1} \quad (9)$$

일 때, 다음과 같이 정의된다.

$$\psi_i = \sum_{\varnothing \neq S \subseteq N \setminus i} \frac{(|N| - |S| - 1)!|S|!}{|N|!} \times \Delta_i v(S) \quad (10)$$

그러면, 각 센서의 측정확률은

$$\Gamma_i(v) = \frac{\psi_i(v)}{\sum_{i \in N} \psi_i(v)} \quad (11)$$

이다.

IV. Randomized Method

Shapley value의 계산은 #P-complete (Shapr-P-complete)로 정확한 값을 계산하는 것은 지수함수 복잡도를 갖기 때문에 합리적인 시간안에 완료할 수 없다. 따라서, 우리는 이 논문에서 randomized method [9]를 사용하여 근사적인 Shapley value를 계산한다.

Randomized method는 모든 $S \subseteq N$에 대해서 식 (10)을 계산하는 대신에 임의의 S를 샘플링하여 계산하는 것이다. 크기가 X인 coalition을 S_x라고 하고, 그 S_x의 샘플 개수를 q_x라고 했을 때, randomized method에 의한 근사 Shapley value는 다음과 같다.

$$\hat{\psi}_i(v) = \sum_{X=1}^{X^{\max}} \left[\frac{1}{q_X} \sum_{k=1}^{q_X} \Delta_i(S_X^k)\right] \quad (12)$$

V. 수치실험

수치실험을 위해서 500×500m^2 센서필드를 가정하고 α=0.018 (식(3)의 공분산 모델에 적용)로 한다. 각 센서의 전송파워는 100mW~2W 가운데 임의의 값으로 하도록 한다. 채널 모델은 아래와 같은 모델을 사용한다.

$$h_{i,j} = 10^3 \cdot 10^{\beta(i,j)/10} \cdot (d_{i,j})^{-2} \quad (13)$$

$\beta(i, j)$는 가우시안 확률변수이며 평균은 0이고 표준편차는 6dB 이다.

먼저 randomized method의 정확성을 알아보기 위해 N=20일 때, 정확한 Shapley value 값과 근사 Shapley value 값을 비교한다.

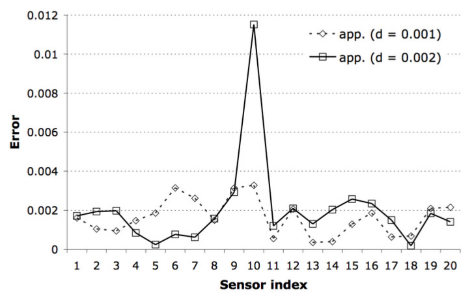

그림 2. N=20일 때, 근사 Shapley value와 정확한 Shaplely value의 비교

그림 2에 나와있듯이 샘플링 에러를 0.001로 해서 근사 Shapley value를 계산할 때, 0.004 미

만의 최대 오차가 나오는 것으로 확인된다.

다음은 측정 품질과 센서들의 에너지 소모간의 균형도를 측정하는 실험을 한다. 이를 위해 50개의 센서를 임의로 배치하고 각 센서들이 매 측정마다 전송파워 만큼의 에너지를 소모한다고 가정한다. 그리고, 매 측정라운드마다 20개의 센서를 선택하는데 다음의 세 기준으로 선택한다.

(1) 모든 센서들이 에너지를 균등하게 소모하도록 선택 (Uniform method)

(2) 최고의 측정품질을 주는 센서들만 일정하게 선택 (Greedy method)

(3) Shapley value에 의해 결정된 확률로 선택 (Shapley-value method)

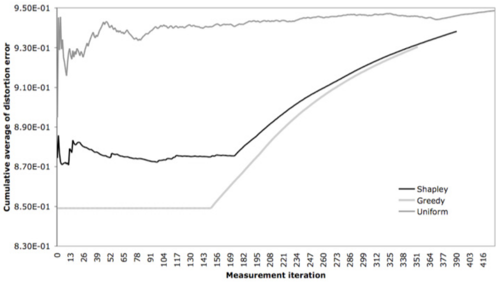

그림 3. 왜곡오차의 누적평균, 매 측정라운드에서 50개의 센서들 가운데 20개를 세 가지 기준으로 선택함.

측정결과는 그림 3에 표현되어 있다.

Greedy method와 Shapley value method를 사용했을 때, 각각, 측정라운드 151과 174에서 왜곡오차가 급상승을 한다. 이 이유는 공헌도가 높은 센서의 에너지가 고갈되면서 발생되는 것이다. 측정품질은 당연히 Greedy method를 사용했을 때, 가장 좋으며, 에너지 소모는 Uniform method를 사용했을 때 가장 좋다. 그리고, Shapley value 방법은 Greedy method에 비해서는 에너지 소모가 적고 Uniform method에 비해서는 측정품질이 좋다. 즉, 에너지 소모와 측정품질간에 균형을 주는 방법임을 알 수 있다.

Ⅵ. 결 론

이 논문에서는 공간상관 센서필드에서 측정할당 문제를 고려한다. 공간상관 센서필드에서는 각 센서들의 측정품질에 공헌하는 정도가 다르다. 즉, 센서들의 위치와 측정 대상 (이벤트)이 발생되는 위치에 따라 각 센서의 공헌도가 다르게 된다. 따라서, 공헌도가 높은 센서를 더 자주 측정하게 하는 것이다.

각 센서의 공헌도를 수치화 하기 위해 측정할당문제를 측정할당 게임으로 모델링하고 각 센서의 Shapley value를 측정한다. 그리고, 이 Shapley value를 측정확률로 간주한다.

하지만, 정확한 Shapley value의 계산은 합리적인 시간안에 완료되지 않는다. 따라서, randomized method를 통해 근사 Shapley value를 합리적인 시간안에 측정하는 방법을 사용한다.

수치실험을 통해, 근사 Shapley value와 정확한 Shapley value 사이에는 비교적 오차가 작은 것으로 확인되고, 근사 Shapley value에 의한 측정확률 할당이 에너지 소모 측면과 측정품질 측면에서 균형있는 결과를 가져다 주는 것으로 확인된다.

참고문헌

[1] P. Balister and S. Kumar, “Random vs. deterministic deployment of sensors in the presence of failures and plaement errors,” in Proc. IEEE INFOCOM, Apr. 2009.

[2] M. Lazaro, M. Sanchez-Fernandez, and A. Artes-Rodriguez, “Optimal sensor selection in binary heterogeneous sensor networks,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 57, no. 4, pp. 1577-1587, Apr. 2009.

[3] A. Anandkumar, L. Tong, and A. Swami, “Optimal node density for detection in energy-constrained random networks,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 56, no. 10, pp. 5232-5245, Oct. 2008.

[4] S,-S, Byun, H. Moussavinik, and I. Balasingham, “Fair allocation of sensor measurements using Shapley value,” in Proc. IEEE LCN, Oct. 2009.

[5] T. Elbatt, “On the trade-offs of cooperative data compression in wireless sensor networks with spatial correlations,” IEEE Trans. Wirelss Commun., vol. 8, no. 5, pp. 2546-2557, May 2009.

[6] M. Vuran and I. Akyildiz, “Spatial correlation-based collaborative medium access control in wireless sensor networks,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 14, no. 2, pp. 316-329, Apr. 2006.

[7] L. S. Shapley, “A value for n-person games,” Annals of Mathematical Studies, vol. 28, pp. 307-317, 1953.

[8] S. S. Fatima, M. Wooldridge, and N. R. Jennings, “A linear approximation method for the Shapley Value,” Artif. Intell., vol. 172, no. 14, pp. 1673-1699, Sep. 2008.

[9] J. Castro, D. Gomez, and J. Tejada, “Polynomial caculation of the Shapley value based on sampling,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 36, no. 5, pp. 1726-1730, May 2009.