
공간상관 센서필드에서 측정 스케줄링

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

공간 상관관계를 갖는 무선 센서 필드에 센서들이 임의로 분포하고 있을 때, 효과적인 센서 측정 스케줄링 기법을 본 논문에서 논의한다. 즉, 전체 센서들을 k 개의 부분집합으로 분할하여 각 부분집합을 순차적으로 측정하는데, 가급적 측정시마다 유사한 양의 정보를 획득할 수 있도록 센서 부분집합을 구성하는 것이다. 이는, 센서들의 제한적인 에너지 수명을 고려하여 k 개의 센서들을 돌아가며 측정하는 것이다. 이를 위해, 상호정보 (mutual information)를 측정하고자 하는 계량으로 선택하고, 각 센서들의 Shapley value를 계산하여 가급적 Shapley value의 합이 유사한 센서들끼리 부분집합을 구성한다.

ABSTRACT

We consider an sensor partitioning problem for energy-efficient measurement scheduling in a spatially correlated sensor field where sensors are located randomly. We divide the whole sensors into subsets of k sensors in the way of letting each subset give similar amount of mutual information. Then it allows more prolonged life time of the sensor field than measuring the sensors that gives most information only. To this end, we compute the Shapley value of each sensor and compose the subsets so that each subset can have total Shapley value similar with the other subsets.

키워드

무선센서네트워크, 공간상관, 센서 집합 분할, 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 무선센서네트워크에서 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 센서들의 위치에 따라 전체 필드에 대한 정보의 양에는 차이가 있게 된다. 즉, 다른 센서들과 멀리 떨어져 있는 센서 (이러한 센서는 다른 센서들과 낮은 상관관계를 갖게 되어 상대적으로 더 많은 양의 정보를 제공함)가 더 많은 양의 정보를 제공해줄 확률이 높아진다 [6].

각 센서들이 제공해주는 필드 정보의 양을 정

량화하기 위해 우리는 센서의 측정 할당 문제를 협력게임 (cooperative game)으로 모델링하고 센서 필드에 대한 mutual information을 협력게임의 특성함수 (characteristic function)으로 정의한다. 특성함수는 협력게임에서 참가자들의 협력으로 얻어진 재화이며 이 재화는 각 참가자들의 공헌도 (marginal contribution)에 비례하여 공정하게 각 참가자들에게 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.

우리는 센서들의 전체집합을 k 개의 부분 집합으로 분할하는데, 각 부분집합에 속한 센서들이 가급적 비슷한 양의 mutual information을 제공하도록 분할 하고자 한다. 이는 센서들의 부분집합을 돌아가면서 측정하게 되면 매 측정마다 비슷한 양의 정보를 획득할 수 있고, 이를 통해 센서들의 에너지 소모량을 줄이기 위함이다.

이를 위해, 우선 각 센서들의 Shapley Value를 계산하고, 부분집합을 구성할 때, 각 부분집합에 속한 센서들의 Shapley Value의 합이 가급적 유사하도록 구성한다. 이렇게 함으로써 각 부분집합이 유사한 정보의 양을 제공할 수 있도록 한다.

II. 공간상관모델

우선, $N = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ 은 각 센서 i 의 위치에서 측정되는 확률변수 (W)의 집합으로 정의한다. 그리고, 필드의 모든 위치와 연관되는 확률변수의 집합을 U 로 표기하고, 당연히, $N \subseteq U$ 이다. $S \subseteq N$ 의 위치에 센서들이 배치되어 있다고 가정하면, 이 확률변수의 부분집합이 제공하는 정보의 양을 아래와 같이 정의한다.

$$v(S) = I(S; U \setminus S) \quad (1)$$

위 식 (1)은 S 에 해당되는 센서들이 S 에 속하지 않은 다른 지역의 확률변수에 대한 정보의 양을 뜻한다. U 에 속해있는 모든 확률변수가 다변수 정규분포를 따른다고 가정하고, K 를 그들의 공분산행렬로 표기하면, 위 식 (1)은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{2}(\log |K_S| + \log |K_{\bar{S}}| - \log |K|) \quad (2)$$

III. Shapley Value의 계산과 센서 분할

각 센서 i 의 Shapley value는 아래와 같이 정의된다.

$$\Phi_i(v) = \sum_{\emptyset \neq S \subseteq N \setminus W_i} \frac{(n - |S| - 1)! |S|!}{n!} \Delta_i v(S)$$

(3)

$$\Delta_i v(S) = v(S \cup W_i) - v(S) \log \left(\frac{|K_{A_i}| |K_{\bar{A}_i}|}{|K_S| |K_{\bar{S}}|} \right) \quad (4)$$

여기서, $A_i = S \cup \{W_i\}$, $\bar{A}_i = U \setminus A_i$, $\bar{S} = U \setminus S$ 로 정의된다. 그리고, 모든 센서필드의 확률변수 X_i 와 X_j 공분산 (covariance) $K(i, j)$ 는 $\gamma = \alpha \|i - j\|$, $\alpha > 0$ 라고 정의 했을 때, $\gamma < 2\pi$ 인 경우 식 (5)과 같이 정의되고, $\gamma \geq 2\pi$ 경우는 0이 된다.

$$K(i, j) = \frac{(2\pi - \gamma)(1 + \cos(\gamma)/2) + 2/3 \sin(\gamma)}{3\pi} \quad (5)$$

위 식들을 이용하여 모든 센서들의 Shapley Value를 계산하고, K-Set Partitioning 알고리즘을 적용하여, 센서들을 K 개의 부분집합으로 분할한다. 여기서 모든 부분집합들은 서로소가 되도록 분할한다. 분할을 하기 위해 Set partitioning 알고리즘을 사용하는데, K-Set partitioning 문제는 NP 완전 문제로서 최적의 분할을 위해서는 지수함수 시간 복잡도가 요구된다. 따라서, 우리는 모든 센서들의 Shapley Value의 합을 분할하고자 하는 부분집합의 개수로 나누고, 각 부분집합들에 속한 센서들의 Shapley Value의 합이 이 값을 갖도록 분할하는 greedy 방법을 사용한다.

IV. 수치실험

이 절에서는 Shapley Value에 기반하는 센서 집합의 각 분할이 유사한 정보의 양을 제공한다는 것을 수치실험을 통해 보인다.

우선, 12×12 의 격자형태의 센서 필드를 가정하고 (따라서, 총 144개의 위치를 가짐), 이 격자들에 10개의 센서를 임의로 배치한다 (그림 1 참조).

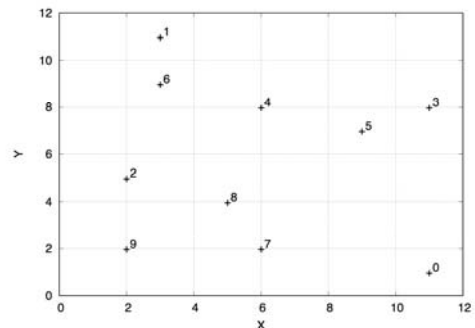


그림 1. 실험을 위해 생성된 센서필드

이 센서필드에서 각 센서들의 Shapley Value는 아래 표 1과 같이 계산된다. 참고로, 수치실험을 위해 식 (2)와 (4)에 우리는 자연로그를 적용하고, 정보의 양의 단위는 nat가 된다.

표 1. 각 센서들의 Shapley Value

센서 No.	Shapley Value
0	2.5536447068
1	2.8662350806
2	4.9568319014
3	3.0947591111
4	3.7334185328
5	4.5742498805
6	4.5374682098
7	4.2243696205
8	4.4403235230
9	3.3207665912

그리고, 위에서 계산된 Shapley Value를 근거로 센서집합을 3개로 분할한다. 분할할 때, 모든 분할이 정확하게 같은 Shapley Value의 합을 갖게 하는 것은 불가능하므로 (Shapley Value가 실수로 표현되기 때문) 우리는 각 합에 0.05의 허용오차를 설정한다.

결과적으로 Partition 0 = {4, 5, 6}, Partition 1 = {2, 8, 9}, Partition 2 = {0, 1, 3, 7} 로 센서들이 분할되며, 각 분할의 Shapley Value 합과 정보의 양 ($v(S)$)는 그림 2와 같이 계산된다.

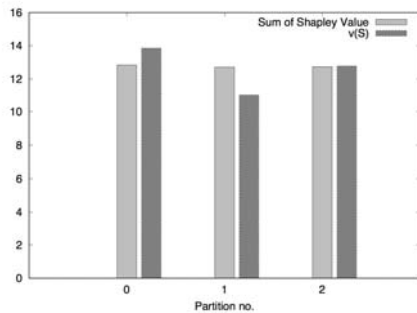


그림 2. 각 Partition의 Shapley Value의 합과 정보의 양 ($v(S)$)의 비교

그림 2에 나와있듯이, 비교적 각 파티션이 유사한 정보의 양 (최대 대략 2.8 nat 만큼의 차이)을 제공함을 알 수 있다.

V. 결론

이 논문에서는 공간상관 센서필드에서 측정 스케줄링 문제를 고려한다. 공간상관 센서필드에서는 각 센서들의 측정품질에 공헌하는 정도가 다

르다. 즉, 센서들의 위치에 따라 각 센서의 공헌도가 다르게 된다. 우리는 이 공헌도를 정량화하기 위해 mutual information을 기준으로 각 센서의 Shapley Value를 계산한다.

그리고, 전체 센서 집합을 k 개의 부분집합 (실험에서는 3개의 부분집합)으로 분할하는데, 가급적 각 부분집합이 유사한 Shapley Value를 갖도록 한다. 이렇게 하여, 각 분할이 유사한 정보의 양을 제공할 수 있게 하여 각 분할을 돌아가면서 측정하게 되면 매 측정마다 유사한 정보의 양을 얻을 수 있게 된다.

하지만, 실험결과를 통해 알 수 있듯이 여전히 분할간에 정보의 양에는 다소 차이가 있다. 이를 줄이기 위해 하나의 단계를 더 추가하여 분할을 맞추는 방법을 고안하고자 하고, 이는 우리의 차후 연구에 중요한 주제가 될 것이다.

또한, Shapley Value의 계산에는 많은 시간이 걸려 (#P-Complete 문제 [8]), 센서들의 숫자가 늘어날수록 계산량이 기하급수적으로 늘어난다. 이를 위해, 우리는 샘플링에 기반하는 Randomized Method [9]를 적용하고자 한다.

참고문헌

- [1] P. Balister and S. Kumar, "Random vs. deterministic deployment of sensors in the presence of failures and placement 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 calculation of the Shapley value based on sampling," *Comput. Oper. Res.*, vol. 36, no. 5, pp. 1726-1730, May 2009.