

스마트 팩토리 환경에서 효율적인 데이터 전송을 위한 경매 알고리즘 기반 채널 할당 기법 연구

강석원, 홍충선*

경희대학교 컴퓨터공학과

{dudtndud, cshong}@khu.ac.kr

Auction-Based Channel Allocation for Efficient Data Transfer in Smart Factory

SeokWon Kang, ChoongSeon Hong

Department of Computer Science and Engineering, Kyung Hee University

요 약

최근 제조업에 사물 인터넷 기술이 도입되면서 각 기기의 센서값을 이용한 설비의 자동화, 모니터링 및 고장예측 등의 서비스를 제공하고 있다. 이에 따라 스마트 팩토리 센서들의 대량의 데이터들을 효율적으로 전송하고 지연을 감소시키기 위한 통신 방식의 적용이 필요하며, 특히 지연에 민감한 스마트 팩토리 환경에 최적화된 채널 할당 방식이 필요하다. 본 논문에서는 스마트 팩토리 센서의 효율적인 통신을 위해 에지 네트워크 환경에서 각 노드의 전송 제한시간, 데이터 전송 시간, 채널 품질을 고려한 경매 알고리즘을 제안한다. 이는 각 노드의 채널 할당을 최적화 하고 네트워크 자원을 효율적으로 사용할 수 있음을 보인다.

1. 서 론

최근 제조업에 사물 인터넷 기술이 도입된 Industrial Internet of Things(IIoT) 기술의 발전으로 각 기기의 센서값을 이용한 설비의 자동화, 모니터링, 고장 예측 등의 편의 서비스를 제공하고 있다[1]. 이에 따라 스마트 팩토리 내 IIoT 노드들 간의 효율적인 통신을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. IIoT 노드들은 정확한 예측을 위해 일반적인 IoT 환경보다 낮은 지연과 많은 컴퓨팅 자원이 요구되며, 이러한 환경에서 사용자와 가까운 거리에 서버를 구성하는 모바일 에지 컴퓨팅(Mobile Edge Computing) 도입이 해결책이 될 수 있다. 모바일 에지 컴퓨팅 기술은 IIoT 노드와 클라우드 서버 간의 거리로 인한 지연문제와 코어 네트워크와의 통신으로 인해 생기는 백홀망의 트래픽 병목 현상을 해결 할 수 있다. 그러나 이 경우에 각 IIoT 노드의 방대한 센서 데이터가 Access Point(AP)에 집중되며 이에 따른 최적화 방안이 필요하다.

최근 IoT 환경 내에서 네트워크 자원을 효율적으로 활용하기 위한 연구가 수행되고 있으나 이러한 기존의 네트워크 할당 방법들은 전송 지연에 민감한 스마트 팩토리에서 고려되어야 할 사항이 적용 되지 않아 IIoT 환경 도입에 적합하지 않을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 스마트 팩토리 내 IIoT 노드들의 효율적인 데이터 통신을 위해 각 노드별 채널 할당 최적화를 위한 태스크 제한시간과 데이터 전송시간, 채널 품질을 고려한 경매 알고리즘을 제안하고 이를 적용하여 기존의 채널 할당 방식과 비교하여 네트워크 자원을 좀 더 효율적으로 사용할 수 있음을 보인다.

2. 관련 연구

게임이론은 현재 네트워크 자원 할당 문제 해결을 위해 많은 연구에서 활용되고 있으며[2][3], Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 알고리즘 또한 네트워크 자원 할당을 위해 사용될 수 있다. VCG 알고리즘은 Social Welfare를 최대화하거나 Cost를 최소화하기 위해 사용되는 최적화 알고리즘이다. 채널을 각 노드에 분배하기 위해 사용될 수 있으며, 이때 채널과 노드로 이루어진 행렬의 Cost 합을 최소화 하기 위해서 헝가리안 알고리즘과 함께 활용될 수 있다. 헝가리안 알고리즘은 그림 1과 같이 이분 그래프로 표현할 수 있는 상황에서 하나의 노드가 하나의 채널만을 할당 받을 수 있다고 가정했을 때 사용할 수 있는 매칭 알고리즘이다.

3. 제안사항

그림 2는 본 논문에서 제안된 스마트 팩토리 네트워크 토폴로지로서, AP를 $AP = (ap_1, ap_2, ap_3, \dots, ap_i)$ 로, j 번째 AP에 연결된 IIoT 노드들을 $D_i = (d_1^i, d_2^i, d_3^i, \dots, d_j^i)$ 로 정의

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2015-0-00557, IoT 기기의 물리적 속성, 관계, 역할 기반 Resilient/Fault-Tolerant 자율 네트워킹 기술 연구) *Dr. CS Hong is the corresponding author

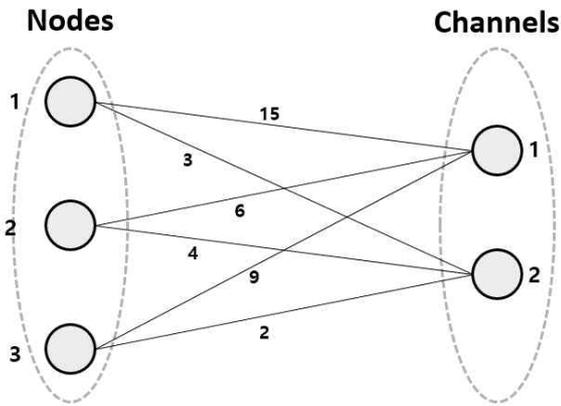


그림 1. 채널 할당 이분그래프

할 수 있다. 여기서 j 은 AP_i 내에 연결된 IIoT 노드의 개수를 의미한다. 또한 AP_i 에서 사용할 수 있는 채널 자원을 $R_k^i = (r_1^i, r_2^i, r_3^i, \dots, r_k^i)$ 과 같이 정의한다. 각 채널마다 다른 채널 품질 값을 가지며, q_k 로 정의한다. 또한 각 IIoT 노드는 채널 별로 $V_{j,k}^i = (v_{j,1}^i, v_{j,2}^i, v_{j,3}^i, \dots, v_{j,k}^i)$ 의 입찰값을 가질 수 있으며, 모든 IIoT 노드의 입찰값 정보는 AP_i 로 전송된다. 따라서 각 노드별로 전송한 입찰값 행렬을 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$W^i = \begin{pmatrix} V_1^i \\ V_2^i \\ \dots \\ V_j^i \end{pmatrix}$$

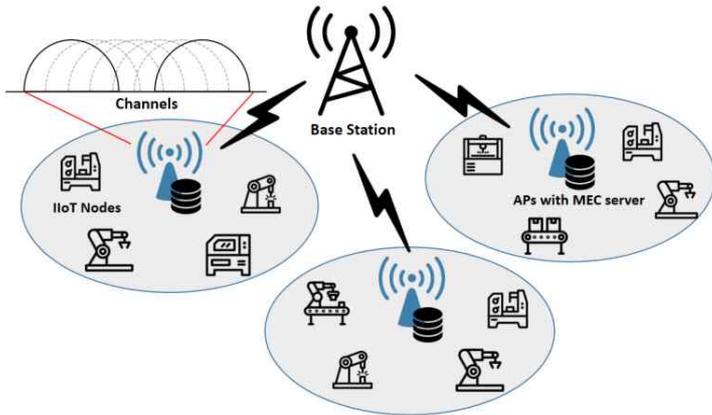


그림 2. 시스템 모델

각 노드의 채널 입찰값 $v_{j,k}^i$ 는 해당 노드의 전송 제한 시간인 $t_{i,j}^D$ 과 데이터 전송시간인 $t_{i,j}^E$ 에 결정된다[4]. 따라서 각 노드의 입찰값을 $v_{j,k}^i = \min(t_{i,j}^D, t_{i,j}^E)$ 으로 정하며, 데이터 전송시간은 총 전송할 데이터 $a_{j,n}$ 에 데이터 전송 속도 $c_{i,j}$ 를 나눈 값으로 다음 공식과 같이 나타낸다.

$$t_{i,j}^E = \frac{a_{i,j}}{c_{i,j}}$$

또한 데이터 전송속도는 새년의 채널용량

(Shannon-Hartley theorem)에 따라 다음의 공식과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$c_{i,j} = B \log_2 \left(1 + q_k \frac{G_j}{N} \right)$$

B 는 채널 용량 값을, G_j 은 channel gain을, N 은 잡음 전력을 나타내며, 본 논문에서 각 IIoT 노드의 잡음비는 같다고 가정한다. 또한 각 채널은 하나의 IIoT 노드만이 사용할 수 있으며, 또한 IIoT 노드도 단 하나의 채널만을 사용한다고 가정한다.

$p_{j,k}^i$ 는 IIoT 노드 d_j^i 가 r_k^i 채널을 입찰 받았을 경우에 지불해야 하는 비용이며, 따라서 IIoT 노드가 채널을 이용했을 경우 얻을 수 있는 유틸리티 값 u_j^i 는 $u_j^i = v_{j,k}^i - p_{j,k}^i$ 와 같이 나타낼 수 있다.

3.1 The Payment Rule

입찰 지불값인 $p_{j,k}^i$ 의 경우 Vickrey Clarke Groves(VCG) 경매 알고리즘의 Clarke pivot rule을 사용하였으며[6], 노드 j 가 경매에 불참시에 얻는 다른 IIoT 노드들의 입찰값에 노드 j 가 경매 참여시 j 를 제외한 다른 노드들의 입찰값 합계로 다음과 같이 공식화 할 수 있다.

$$p_i = \sum_{j \neq i} \sum_k y_{jk}^i v_{jk}^i - \sum_{j \neq i} \sum_k x_{jk}^i v_{jk}^i$$

이는 다른 노드들의 경매 값을 알 수 없는 환경에서 정확한 입찰값을 유도하기 위한 사회적 전략이다. 여기서 $x_{j,k}^i$ 의 경우에, 행렬 W^i 에서 최적화된 채널 할당에 따라 행렬 X^i 을 나타낼 수 있으며, 행렬 요소인 $x_{j,k}^i$ 가 1일 경우 j 노드가 k 채널을 할당 받았음을 의미하며, 그렇지 않을 경우에는 0을 부여한다.

3.2 Cost Minimization

경매 알고리즘은 각 노드가 최적화를 통해 얻을 수 있는 social welfare의 값을 최대화하거나 Cost를 최소화하는 것을 목표로 한다. 본 논문의 경우에는 각 노드의 데이터 전송 속도를 최소화함에 목적이 있다. 따라서 각 노드의 Cost의 합은

$$S = \sum_j \sum_k x_{jk} v_{jk}$$

와 같으며, 본 논문의 최적화 공식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X^* = \min \sum_j \sum_k x_{jk} v_{jk}$$

$$s.t. \begin{aligned} \sum_j x_{jk} &\leq 1, \forall j \\ \sum_i x_{jk} &\leq 1, \forall k \end{aligned}$$

할당 최적화의 경우 $n \times n$ 행렬에서 매칭 최적화를 위한 방법인 헝가리안 알고리즘을 사용한다.

4. 성능평가

본 논문에서 제안된 경매 알고리즘 성능을 평가하기 위해 채널을 각 노드마다 균등하게 할당하는 Round

Robin 스케줄링, 기존의 전송 제한시간 및 채널품질이 고려되지 않은 IoT 환경에서의 경매 알고리즘과 비교하여 성능을 평가한다. 이때 채널 대역폭은 $B = 1$, 채널 품질은 연속균등분포에 따라 $[0.01, 1]$ 내에서 임의적으로 정해지며, 잡음비의 해당되는 σ^2 의 값은 10^{-2} 으로 정의한다. 각 시나리오마다 100번의 반복 실행을 통해 도출된 행렬 W^i 에 헝가리안 알고리즘을 사용하여 채널 및 IIoT 노드의 개수에 따라 전송 시간의 합을 구하고 시나리오별 비교를 통하여 성능을 분석한다.

그림 3은 각 채널 할당 알고리즘에 따른 노드별 데이터 전송 시간의 총 합이다. IIoT 노드가 증가함에 따라 본 논문에서 제안하는 알고리즘이 더 낮은 총 데이터 전송시간을 보이며, 이는 네트워크 자원을 좀 더 효율적으로 활용함을 보이고 있다.

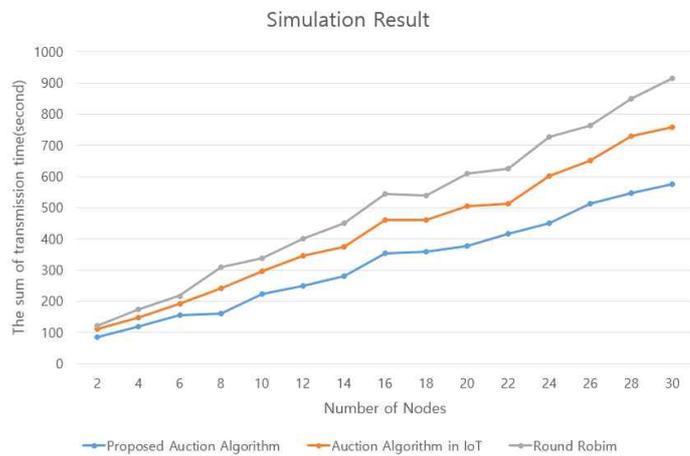


그림 3. 시뮬레이션 결과 그래프

5. 결론

본 논문에서는 지연에 민감한 스마트 팩토리 네트워크 환경에서 효율적인 채널 할당을 위해 기존 Vickrey-Clarke-Groves 경매 알고리즘에 채널 품질과 전송 제한시간을 적용하여 대량의 데이터를 전송할 시에 네트워크 자원 할당을 최적화함을 보여준다. 또한 경매 알고리즘을 활용하여 각 에지 서버에서 IIoT 노드의 데이터를 처리 할 시에 적용되는 CPU 자원 할당을 효율적으로 처리하는 알고리즘에 대한 연구를 진행하고자 한다.

6. 참고문헌

[1] Jinjiang Wang, Yulin Ma Laibin Zhang, Robert X.Gao, Dazhong Wu, "Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications," Journal of Manufacturing Systems, Vol 48, Part C, July 2018, Pages 144-156.

[2] Do Hyeon Kim, S.M Ahsan Kazmi, Choong Seon Hong, "Cooperative Slice Allocation for Virtualized Wireless Network: A Matching Game Approach," The International Conference on Information Networking (IMCOM 2018), Jan. 5-7, 2018, Langkawi, Malaysia.

[3] Yan Kyaw Tun, Chit Wutyee Zaw, Nway Nway Ei, Choong Seon Hong, "An Online Spectrum Market in Wireless Small Cells Networks An Advanced Auction Approach," 2017 Korea Software Congress(KSC 2017), 2017.12.20.-12.22

[4] S. Jeong, W. Na, J. Kim, and S. Cho, "Internet of Things for smart manufacturing system: Trust issues in resource allocation," IEEE Internet of Things Journal, Vol 5, Issue 6, March 2018, Pages 4418-4427.

[5] M. Khaledi and A. Abouzeid, "Auction-based spectrum sharing in cognitive radio networks with heterogeneous channels," in Information Theory and Applications Workshop (ITA 2013), 2013, pp. 1-8.

[6] N. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos, and V. V. Vazirani, *Algorithmic game theory*, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.