

# 브로드캐스팅이 가능한 동적 시스템에서 다중 사용자의 효용 함수 경도 증감에 따른 자원 분배 전략

차채연, 박형곤

이화여자대학교 전자전기공학과 스마트팩토리융합전공  
chaeyeon.cha@ewhain.net, hyunggon.park@ewha.ac.kr

## Resource Allocation Strategy Based on the Gradients of Utility Functions from Multiple Users in a Dynamic System with Broadcasting

Chaeyeon Cha, Hyunggon Park

Department of Electronic and Electrical Engineering Graduate Program in Smart Factory,  
Ewha Womans University

### 요약

본 논문은 동적 시스템에서 제한된 공유 자원을 공유하는 다중 사용자에게 최적의 자원 분배 지점을 찾기 위한 효용 함수의 경도 증감에 따른 자원 분배 전략을 제안한다. 제안하는 자원 분배 전략은 공유 자원을 균등한 보조 자원으로 나누고, 사용자들의 효용 함수 경도 증감 신호의 브로드캐스팅을 통해 가장 큰 효용 함수의 경도 증가량을 가진 사용자에게 보조 자원을 할당하는 반복적인 계산을 통해 최적의 자원 분배 지점을 찾는다. 실험을 통해 제안한 자원 분배 전략이 정확성을 잃지 않고 낮은 복잡도로 최적의 자원 분배 지점을 찾는 것을 보였다.

### I. 서론

사물인터넷(IoT, Internet of Things) 기술이 발전함에 따라 동적 시스템에 존재하는 다중 사용자가 서로 연결되어 실시간으로 정보 교환 및 상호작용이 가능하게 되었다[1]. 동적 시스템에서 다중 사용자는 원하는 서비스를 지원받기 위해 시스템의 제한된 자원을 공유한다. 시스템의 효율성을 향상시키기 위해 시스템 컨트롤러는 사용자의 특성을 고려하면서 제한된 공유 자원을 공정하게 할당하는 것이 중요하다. 따라서 사용자 간 효율적인 자원 분배를 위한 적절한 자원 관리 및 스케줄링 전략이 필수적이다[2].

내쉬 협상 해법(NBS, Nash Bargaining Solution)은 공통된 자원 할당 문제에서 다중 사용자에게 공평하고 효율적으로 자원을 분배할 수 있어 다양한 분야에서 자원 할당 전략으로 활용되었다[3]-[5]. 동적 시스템에서 NBS에 기반한 자원 분배는 시간에 따라 변화하는 공유 자원으로 인해 계산 복잡성이 기하급수적으로 증가하기 때문에 이를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되었다[4], [5]. 하지만 기존 연구들은 동적 시스템에서 자원을 분배하기 위한 시스템 컨트롤러가 필수적이며, 컨트롤러는 시스템에 존재하는 모든 사용자의 효용을 알아야하며, 반복적인 복잡한 계산을 통해 최적의 자원 분배 지점을 찾아야 한다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 이러한 한계를 해결하기 위해, 시스템에 존재하는 다중 사용자의 효용 함수 경도 증감에 따른 자원 분배 전략을 제안한다. 제안하는 자원 분배 전략을 통해 시스템의 사용자들은 브로드캐스팅을 기반으로 최적의 자원 분배 지점을 찾을 수 있으며, 시스템 컨트롤러는 내쉬 곱(NP, Nash Product)을 반복적으로 계산하지 않기 때문에 낮은 계산 복잡도로 최적의 자원 분배 지점을 찾을 수 있다.

### II. 본론

#### A. 문제 정의

본 논문에서는 브로드캐스팅을 기반으로 다중 사용자 간 정보 교환 및 상호작용이 가능한 동적 시스템을 고려한다. 고려하는 시스템에는 총  $n$ 명의 사용자가 존재하고  $n$ 명의 사용자는 시간  $t$  ( $t = 1, \dots, T$ )에서 시스템에 주어진 자원  $R(t)$ 를 공유한다. 시간  $t$ 에서  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ )번째 사용자에게 할당된 자원을  $x_i(t)$ 라 할 때, 사용자에게 할당된 총 자원은 사용 가능한 자원을 초과할 수 없으므로 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^n x_i(t) \leq R(t). \quad (1)$$

시스템의 각 사용자는 고유한 효용 함수를 가지며,  $i$ 번째 사용자는 시간  $t$ 에서 할당된 자원  $x_i(t)$ 를 기반으로 효용  $u_i(x_i(t))$ 를 갖는다. 시간  $t$ 에서 전체 사용자의 효용을 나타내는 벡터를  $\mathbf{u}(\mathbf{x}(t))$ 라 하면, 벡터  $\mathbf{u}(\mathbf{x}(t))$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}(t)) = (u_1(x_1(t)), \dots, u_n(x_n(t))) \quad (2)$$

각 사용자가 시스템의 자원 분배에서 할당받는 최소 효용을 불일치점  $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_n)$ 이라 할 때, 시간  $t$ 에서 모든 사용자의 효용 곱은 다음과 같이 표현된다.

$$G(\mathbf{u}(\mathbf{x}(t)), \mathbf{d}) = \prod_{i=1}^n (u_i(x_i(t)) - d_i). \quad (3)$$

최적의 자원 분배 지점인 내쉬 협상 해법을  $\mathbf{X}^*(t)$ 라 할 때,  $\mathbf{X}^*(t)$ 는 효용 곱을 최대화하는 벡터이므로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X}^*(t) = \underset{\sum_{i=1}^n x_i(t) \leq R(t)}{\operatorname{argmax}} G(\mathbf{u}(\mathbf{x}(t)), \mathbf{d}). \quad (4)$$

본 논문에서는 브로드캐스팅을 통한 다중 사용자 간 정보 교환을 통해 최적의 자원 분배 지점  $\mathbf{X}^*(t)$ 를 낮은 계산 복잡도로 찾는 자원 분배 전략 설계를 목적으로 한다.

### B. 제안 방법

시스템 컨트롤러는 시간  $t$ 에서의 공유 자원  $R(t)$ 를  $p$ 개의 균등한 보조 자원으로 나누어 자원 분배를 진행하며, 시간  $t$ 에서 시스템 컨트롤러는  $p$ 개의 균등한 시간 간격마다 자원  $R(t)/p$ 를 다중 사용자 중 한 명에게 할당한다.  $i$ 번째 사용자가  $m(m=1, \dots, p)$ 번째 시간 간격까지 할당받은 자원을  $y_i(m)$ 라 하면,  $y_i(m)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$y_i(m) = \sum_{q=1}^m y_i(q). \quad (5)$$

입의의 사용자  $I$ 는 브로드캐스팅을 통해 시스템의 모든 사용자에게  $y_i(m)$ 에서의 효용 함수 정도 증가량인  $u'_I(y_I(m))$ 을 송신한다. 효용 함수 정도 증가량을 송신한  $I$ 번째 사용자를 제외한 사용자  $j(j=1, \dots, n, j \neq I)$ 은  $u'_j(y_j(m))$ 와  $u'_I(y_I(m))$ 을 비교하여 신호 전송 의사 결정 전략인  $\alpha_j(m)$ 에 따라 효용 함수 정도 증가량의 전송 여부를 결정한다.

$$\alpha_j(m) = \begin{cases} 0, & u'_j(y_j(m)) \leq u'_I(y_I(m)) \\ 1, & u'_j(y_j(m)) > u'_I(y_I(m)) \end{cases}. \quad (6)$$

시스템 컨트롤러는 브로드캐스팅 신호가 일정 기간동안 발생하지 않으면, 가장 최신에 수신한 효용 함수 정도 증가량 신호의 사용자에게  $R(t)/p$ 를 할당한다. 컨트롤러는 보조 자원  $R(t)/p$  분배를  $p$ 번 진행하여 공유 자원  $R(t)$ 를 모두 분배하며,  $R(t)$ 를 분배한 뒤의 사용자  $i$ 에게 할당된 자원  $y_i(p)$ 는 시간  $t$ 에서의 할당된 자원인  $x_i(t)$ 와 같다.

### III. 실험 결과

본 실험에서는  $3(n=3)$ 명의 사용자가 존재하는 동적 시스템을 고려하며, 각 사용자의 효용 함수는 아래와 같이 입의의 오목함수로 정의한다.

$$\begin{aligned} u_1(x) &= \log_3(x+1). \\ u_2(x) &= x^{0.2} \\ u_3(x) &= -7^{-x} + 1 \end{aligned} \quad (8)$$

제안하는 자원 분배 전략과 일반적인 자원 분배 전략의 최적 자원 분배 지점을 찾는 데 필요한 계산 복잡도와 내쉬 곱을 비교하여 제안하는 자원 분배 전략이 낮은 계산 복잡도로 최적의 자원 분배 지점을 찾을 수 있음을 보인다. 실험에서 불일치점  $d$ 는  $0$ 으로,  $p$ 는  $100$ 으로 설정하였다.

그림 1은 동적 시스템에서 시간  $t$ 에 따라 변화하는 공유 자원의 분배에 있어 제안하는 자원 분배 전략과 일반적인 자원 분배 전략을 따랐을 때, 최적의 자원 분배 지점을 찾는 데 필요한 시간을 나타낸다. 일반적인 자원 분배 전략을 따르면 평균  $0.014s$ , 최대  $0.02s$ , 최소  $0.005s$ 가 필요하지만, 제안 전략은 평균  $0.05ms$ , 최대  $0.07ms$ , 최소  $0.02ms$ 가 필요하여 계산 시간을 현저히 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 시변하는 공유 자원에 따라 계산 시간이 민감하게 달라지는 일반적인 전략과 달리 제안하는 자원 분배 전략은 일정 수준의 시간이 필요한 것을 확인할 수 있다. 표 1은 일반적인 자원 분배 전략과 제안하는 전략을 통해 찾은 최적의 자원 분배 지점에서의 내쉬 곱과 평균 제곱근 오차(RMSE, Root Mean Square Error)를 나타낸다. 표 1의 RMSE를 통해 제안하는 자원 분배 전략을 사용하여 최적의 자원 분배 지점을 찾아도 정확도를 잃지 않는 것을 확인할 수 있다.

### IV. 결론

본 논문에서는 동적 시스템에서 다중 사용자에게 시변하는 공유 자원

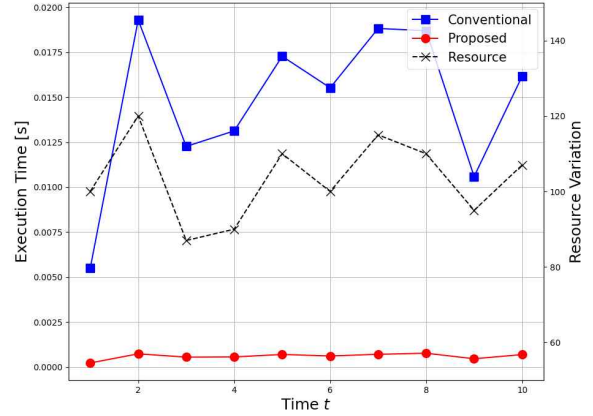


그림 1 동적 시스템에서 최적의 자원 분배 지점 계산에 필요한 시간

Time		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NP	Conventional	7.72	8.38	7.23	7.35	8.06	7.72	8.22	8.06	7.54	7.72
	Proposed	7.56	8.86	6.63	6.84	8.25	7.56	8.58	8.25	7.21	7.56
RSME		0.11	0.34	0.43	0.36	0.13	0.11	0.25	0.13	0.23	0.11

표 1 자원 분배 전략에 따른 내쉬 곱(NP) 및 평균 제곱근 오차(RMSE)

을 낮은 복잡도로 분배하기 위해 다중 사용자의 효용 함수의 정도 증감에 따른 자원 분배 전략을 제안하였다. 제안한 자원 분배 전략은 동적 시스템에서 브로드캐스팅을 가정하며 공유 자원을 보조 자원으로 나누고, 시스템 사용자들의 효용 함수 정도 증감 신호의 브로드캐스팅을 통해 가장 큰 효용 함수 정도 증가량을 가진 사용자에게 보조 자원을 반복적으로 할당한다. 실험을 통하여 일반적인 자원 분배 전략보다 제안한 자원 분배 전략이 정확성을 잃지 않고 시변하는 공유 자원에 상관없이 낮은 복잡도로 최적의 자원 분배 지점을 찾는 것을 확인할 수 있었다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No.2021-0-00739, 분산/협력 AI 기반 5G+ 네트워크 데이터 분석 기능 및 제어 기술 개발)을 받아 수행된 연구임.

### 참고 문헌

- [1] Y. Yi, Z. Zhang, L. T. Yang, X. Deng, L. Yi, and X. Wang, "Social interaction and information diffusion in social Internet of Things: Dynamics, cloud-edge, traceability," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 4, pp. 2177 - 2192, 2020.
- [2] X. Li and L. Da Xu, "A review of Internet of Things—resource allocation," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 11, pp. 8657 - 8666, 2020.
- [3] Y. Zhang, J.-H. Liu, C.-Y. Wang, and H.-Y. Wei, "Decomposable intelligence on cloud-edge IoT framework for live video analytics," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 9, pp. 8860 - 8873, 2020.
- [4] J. Choi and H. Park, "Direction vector-based algorithm for the Nash bargaining solution in dynamic networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 1342 - 1345, 2018.
- [5] C. Cha and H. Park, "ECS-NBS: Exact computation of sequential Nash bargaining solutions," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 12, pp. 13453 - 13457, 2022.