

동적 시스템에서 분산적 자원 분배를 위한 교대 제안 협상 전략

진수연*, 차채연+, 박형곤**

이화여자대학교 전자전기공학전공*, 이화여자대학교 전자전기공학과 스마트팩토리융합전공+
{ycdia384, chaeyeon.cha, hyunggon.park}@ewha.ac.kr

Alternating Offer Bargaining Strategy for Decentralized Resource Allocation in Dynamic Systems

Sooyeon Jin*, Chaeyeon Cha+, Hyunggon Park**

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

요약

본 논문은 동적 시스템에서 공통 자원을 공유하는 다중 사용자가 최적의 자원 분배 지점을 찾기 위해 사용자의 요청 서비스를 기반으로 형성된 집단이 자원 분배 지점을 제안하고 반복되는 수락과 거절 및 제안을 통해 분산적으로 자원을 분배하는 전략을 제안한다. 제안하는 교대 제안 협상 전략은 순차적으로 집단이 자원 분배 지점을 제안하며 제안된 자원 분배 지점에서의 효용보다 자신의 협상 제안 시점에서의 효용의 대소를 기반으로 협상 타결 의사 결정을 내린다. 실험을 통해 제안한 교대 제안 협상 전략이 중앙 집중적 자원 분배 전략에 대해 정확성을 잃지 않고 낮은 복잡도로 최적의 자원 분배 지점을 찾는 것을 보였다.

I. 서론

최근 사물인터넷의 발전으로 시스템에 실시간으로 다수 사용자의 접근이 가능해지고 있다. 시간에 따라 사용자의 수 및 사용자가 공유하고 있는 공통 자원이 달라지는 동적 시스템에서의 시스템 효율을 향상시키기 위해선 적절한 자원 분배가 필수적이다. 공통 자원을 시스템에 존재하는 사용자들에 적절히 분배하기 위해선 사용자의 수와 각 사용자의 효용을 기반으로 자원 분배 지점을 계산해야 하며, 시스템에서 사용자의 효용은 사용자가 요청하는 서비스에 따라 달라질 수 있다.

내쉬 협상 해법(Nash Bargaining Solution, NBS)은 다수의 사용자가 공통의 자원을 공유하는 시스템에서 자원을 공평하고 효율적으로 분배할 수 있어, 다양한 분야의 자원 분배에 널리 사용되어 왔다[1]. 하지만 NBS를 사용한 자원 분배는 시스템의 모든 정보를 알고 자원 분배 지점을 계산하는 중앙 제어 장치가 필수적이라는 한계점이 있다.

본 논문에서는 이를 해결하기 위해 사용자들이 요청하는 서비스를 기반으로 집단화하고, 집단 간 분산적 교대 제안 협상 전략을 통해 중앙 제어 장치 없이 최적의 자원 분배 지점인 NBS를 찾는 방법에 대해 제안한다.

II. 본론

A. 문제 정의

본 논문에서는 시간 $t (t=1, \dots, T)$ 에서 $n(t)$ 명의 사용자가 공통 자원 $R(t)$ 을 공유하는 동적 시스템을 고려한다. 각 사용자는 요청하는 서비스가 서로 다를 수 있으며, 같은 서비스를 요청한 사용자들을 묶어 총 $g (1 \leq g \leq n(t))$ 개의 집단 $G_i (i=1, \dots, g)$ 을 구성한다. 시간 t 에서 집단 G_i 에 속한 사용자의 수를 $m_i(t)$ 라 하면, $m_i(t)$ 은 아래의 식을 만족한다.

$$n(t) = \sum_{i=1}^g m_i(t). \quad (1)$$

시간 t 에서 집단 G_i 에 속한 j 번째 사용자에게 할당된 자원을 $x_j(t)$ 라 하고 할당된 자원 $x_j(t)$ 을 통해 사용자 j 가 얻는 효용을 $u_j(x_j(t))$ 라 할

때, 하나의 집단에 속한 사용자들은 모두 동일한 효용을 가지므로 $u_j(x_j(t))$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$u_j(x_j(t)) = u_k(x_k(t)) \quad (j \neq k). \quad (2)$$

본 논문에서 고려하는 시스템의 집단 효용을 집단 내 모든 사용자의 효용의 곱으로 정의하면, 집단 G_i 에 할당된 자원을 $x_{G_i}(t)$ 라 할 때 집단 G_i 의 효용 함수 $u_{G_i}(x_{G_i}(t))$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$u_{G_i}(x_{G_i}(t)) = \prod_{j=1}^{m_i(t)} u_j(x_j(t)). \quad (3)$$

시간 t 에서 집단 G_i 에 할당된 자원 $x_{G_i}(t)$ 을 집단 내 모든 사용자가 동일하게 할당받으므로, j 번째 사용자에게 할당된 자원 $x_j(t)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$x_j(t) = \frac{x_{G_i}(t)}{m_i(t)}. \quad (4)$$

각 집단이 시스템의 자원 분배에서 할당받는 최소의 효용을 불일치점 $\mathbf{d}_G = (d_{G_1}, \dots, d_{G_g})$ 라 할 때, 시간 t 에서 집단의 효용 곱인 내쉬 곱(Nash Product, NP)은 다음과 같이 표현된다.

$$G_G(\mathbf{u}_G(\mathbf{x}_G(t)), \mathbf{d}_G) = \prod_{i=1}^g (u_{G_i}(x_{G_i}(t)) - d_{G_i}). \quad (5)$$

집단에 대한 최적의 자원 분배 지점인 NBS를 $\mathbf{X}_G^*(t)$ 라 할 때, $\mathbf{X}_G^*(t)$ 은 NP를 최대화하는 벡터이므로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X}_G^*(t) = \underset{\mathbf{1}^T \mathbf{x}_G(t) \leq R(t)}{\operatorname{argmax}} G_G(\mathbf{u}_G(\mathbf{x}_G(t)), \mathbf{d}_G). \quad (6)$$

본 논문에서는 최적의 자원 분배 지점인 NBS $\mathbf{X}_G^*(t)$ 을 집단 간 교대 제안 협상 전략을 통해 분산적인 방식으로 찾는 것을 목적으로 한다.

B. 제안 방법

교대 제안 협상을 위해 각 집단은 협상 제안 시점 $p (p=1, \dots, P)$ 에

서 순차적으로 자원 분배 지점을 제안하며 협상 제안이 진행됨에 따라 각 집단의 협상에서의 효용 가치는 δ_{G_i} 배로 감소한다. 협상 제안 시점 p 에 따라 집단 G_i 는 자신의 자원 분배량 $x_{G_i}(p)$ 을 감소시키며 자원 분배 지점을 제안하고, 자신을 제외한 타 집단 $G_{-i}(-i=1, \dots, i-1, i+1, \dots, g)$ 에 제안하는 자원 분배량 $x_{G_{-i}}(p)$ 은 남은 자원을 균등하게 분배하여 자원 분배 지점을 제안한다.

$$x_{G_{-i}}(p) = \frac{R(t) - x_{G_i}(p)}{g-1}. \quad (7)$$

협상 제안을 받은 집단 G_{-i} 은 제안된 자원 분배 지점에서의 효용 $u_{G_{-i}}(x_{G_{-i}})$ 이 자신의 협상 제안 시점까지 지속되었을 때 얻는 효용과 자신의 협상 제안 시점에서 제안하는 효용의 대소를 비교하여 협상 타결 의사 결정 $\alpha_{G_{-i}}(p)$ 을 아래와 같이 결정하며

$$\alpha_{G_{-i}}(p) = \begin{cases} 0, & \delta_{G_{-i}}^p(u_{G_{-i}}(x_{G_{-i}}(p))) \geq \delta^{p-i+g} u_{G_{-i}}(x_{G_{-i}}(p_{-i})) - \Delta_{G_{-i}} \\ 1, & \delta_{G_{-i}}^p(u_{G_{-i}}(x_{G_{-i}}(p))) < \delta^{p-i+g} u_{G_{-i}}(x_{G_{-i}}(p_{-i})) - \Delta_{G_{-i}} \end{cases}, \quad (8)$$

이때 집단 G_{-i} 이 가장 최근에 협상 제안을 한 시점을 p_{-i} 라 한다. 즉, 집단 G_{-i} 은 협상 타결 의사 결정 $\alpha_{G_{-i}}(p)$ 이 0인 경우 p 에서 집단 G_i 가 제안한 자원 분배 지점을 수락하며, 1인 경우 제안을 거절하고 자신의 협상 제안 시점에서의 효용을 일정 간격 $\Delta_{G_{-i}}$ 만큼 감소시킨 뒤 자원량으로 변환하여 자원 분배 지점을 제안한다. 본 시스템에서 집단 G_i 가 제안하는 자원 분배 지점에 대해 모든 집단의 협상 타결 의사 결정 $\alpha_{G_{-i}}(p)$ 이 0일 때 자원 분배 협상이 완료되며, 협상 완료 시점 P 에서 집단 G_i 에 할당된 자원은 시간 t 에서 집단에 할당된 자원과 동일하므로 다음과 같이 표현된다.

$$x_{G_i}(P) = x_{G_i}(t). \quad (9)$$

III. 실험 결과

본 실험에서는 시간에 따라 변화하는 다수의 사용자가 공통 자원을 공유하고 3($g=3$)개 요청 서비스를 지원하는 동적 시스템을 고려하며, 각 집단의 효용함수는 다음과 같이 정의하였으며

$$u_{G_i}(x_{G_i}(t)) = \left[\left(\frac{x_{G_i}(t)}{m_i(t)} \right)^{1-a_{G_i}} \right]^{m_i(t)}, \quad (10)$$

각 집단의 위험 회피 성향 $a_{G_i} = \{0.9, 0.5, 0.7\}$ 로 설정하였다. 시간에 따라 변화하는 사용자의 수를 모델링 하기 위해 상태 천이 행렬 P_n 을 다음과 같이 설정하였으며

$$P_n = \begin{bmatrix} 0.52 & 0.48 \\ 0.63 & 0.37 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

시변하는 자원을 위한 상태 천이 행렬 P_R 은 [3]와 동일하게 사용한다.

그림 1은 동적 시스템에서 시간 t 에 따라 변화하는 공통 자원의 분배에 있어 제안하는 교대 제안 협상 전략과 중앙 집중적 자원 분배 전략을 따랐을 때, 최적의 자원 분배 지점을 찾는 데 필요한 시간을 나타낸다. 중앙 집중적 자원 분배 전략을 따르면 평균 11.483s, 최대 18.747s, 최소 4.335s가 필요하지만, 제안 전략은 평균 0.031s, 최대 0.053s, 최소 0.005s가 필요하여 계산 복잡도를 현저히 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 시변하는 공통 자원에 따라 계산 복잡도가 민감하게 달라지는 중앙 집중적 전략과 달리 제안하는 전략은 일정 수준의 시간이 필요한 것을 확인할 수 있다.

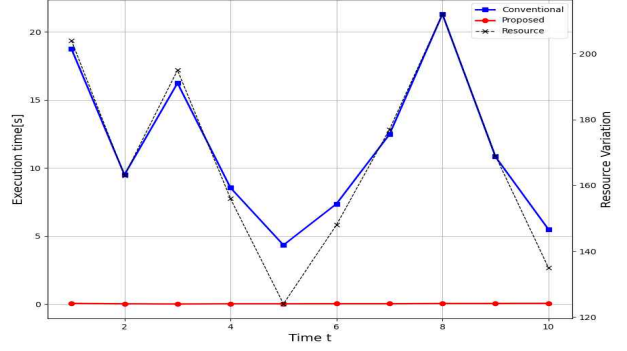


그림 1 동적 시스템에서 최적의 자원 분배 지점 계산에 필요한 시간

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$R(t)$	204	163	195	156	124	148	177	212	169	135	
NP	Centralized	8.03	3.27	25.33	16.03	3.70	3.13	5.25	0.56	0.79	0.44
	Decentralized	6.82	2.12	23.25	5.87	1.19	2.82	4.68	0.50	0.62	0.27
RMSE	1.21	1.12	2.08	10.16	2.51	0.31	0.56	0.05	0.16	0.16	

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

표 1은 중앙 집중적 자원 분배 전략과 제안하는 전략을 통해 찾은 자원 분배 협상 지점에서의 NP와 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 나타낸다. 표 1의 RMSE를 통해 제안하는 분산적 교대 제안 협상 전략을 사용하여 최적의 자원 분배 지점을 찾아도 대부분 정확도를 크게 잃지 않는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 다중 사용자에게 공통 자원을 분배하기 위해 사용자의 요청 서비스에 기반한 집단들의 순차적 자원 분배 지점 제안 및 협상 타결 의사 결정을 통한 교대 제안 협상 전략을 제안하였다. 제안한 협상 전략은 동적 시스템에서 집단이 순차적으로 자원 분배 지점을 제안하며, 타 집단은 제안된 자원 분배 지점에서의 효용이 자신의 협상 제안 시점에서의 효용보다 큰 경우 제안을 수락한다. 이 외의 경우에는 제안을 거절하고 효용을 일정 간격 감소시켜 자원 분배 지점을 제안한다. 시스템 내 모든 집단이 자원 분배 지점을 수락할 때까지 교대 제안 협상을 반복함으로써 자원을 분배한다. 실험을 통하여 중앙 집중적 자원 분배 전략보다 제안한 교대 제안 협상 전략이 자원 분배에서 정확성을 잃지 않고 시변하는 공통 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, No.2024-00344830, 6G 네트워크 구조/산업융합 표준기술 개발 및 표준화)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] H. Park and M. van der Schaar, "Bargaining strategies for networked multimedia resource management," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 7, pp. 3496 - 3511, 2007.
- [2] 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.
- [3] C. Cha and H. Park, "Service-based optimal group resource allocation strategy," in *Proc. Int. Conf. Ubiquitous Future Netw.*, 2023, pp. 576 - 579.