

Vickrey 경매에 기초한 다중 에이전트 시스템에서의 작업 재할당

이상기⁰ 김인철
경기대학교 전자계산학과
(sglee, kic}@kyonggi.ac.kr

Task Reallocation in Multi-agent Systems based on Vickrey Auctioning

Sang-Gi Lee⁰ In-Cheol Kim

Dept. of Computer Science, Kyonggi University

요 약

다수의 이익-추구형 에이전트들 간의 자동화된 협상 과정을 통해 합리적으로 작업 분배가 이루어질 수 있도록 조정하는 것은 대부분의 다중 에이전트 시스템에서 매우 중요한 문제이다. 본 연구에서는 대표적인 다중 에이전트 작업 재할당 문제의 하나로써 다중 에이전트 외관원 여행 문제를 설명하고, 이 문제를 풀기 위한 조정 매커니즘으로 Vickrey 경매 프로토콜의 적용을 제안하였다. 대표적인 시장기반의 조정 매커니즘인 Vickrey 경매의 적용을 위해 본 논문에서는 각 에이전트의 이익, 협상의 최종 목표, 경매대상, 각 에이전트의 입찰전략, 전체적인 경매 진행과정 등을 정의하였다. 이와 같이 설계된 시장기반의 조정 매커니즘의 장점은 각 에이전트의 이익만을 고려함으로써 문제를 단순화할 수 있고, 복잡도가 큰 중앙-집중식 제어 매커니즘이 필요치 않으며, 따라서 각 에이전트의 자율성을 최대한 보장할 수 있고, 큰 협상비용을 들이지 않고 최적의 할당에 도달할 수 있다는 점등이다. 본 논문에서는 하나의 다중 에이전트 외관원 여행문제에 대한 풀이과정을 통해 앞서 설계된 Vickrey 경매프로토콜의 진행방식을 설명하고 그 효과와 효율성을 예시하였다.

1. 서 론

최근 들어 전자상거래, 분산협동시스템 등과 같은 응용분야가 확대되고 관련 기술들이 발전함에 따라 자동화된 협상 프로토콜의 중요성이 점차 증가되고 있다. 이러한 응용 시스템들의 핵심부는 다수의 에이전트들이 협상을 통해 그들이 수행해야 하는 작업들을 효율적으로 할당하거나 혹은 재할당할 수 있는 능력이 된다. 일반적으로 작업들은 작업들 서로 간에도 의존성을 가질 뿐 아니라 이들을 수행할 에이전트들에 대해서도 의존성을 가진다. 즉, 어떤 작업들은 동일한 에이전트에 의해 한꺼번에 처리함으로써 더욱 용이하게 수행될 수 있고 그렇게 함으로써 시너지(synergy) 효과를 낼 수 있다. 반면에 어떤 작업들은 서로 부정적인 상호작용을 함으로써 오히려 서로 다른 에이전트들에 의해 나뉘어 수행되는 것이 더욱 좋을 수 있다. 또한 에이전트들은 일반적으로 서로 다른 자원들을 보유하고 있음으로써 동일한 작업들에 대해서도 서로 다른 처리비용을 요구하게 된다.

일반적으로 하나의 작업 재할당 문제(task reallocation problem)는 작업들의 집합 T , 에이전트들의 집합 A , 에이전트 j 가 몇 가지 작업들을 처리할 때 발생하는 비용을 구해주는 하나의 처리비용 함수

$c_j: 2^T \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ 와 각 에이전트에 작업 초기 할당이 $P^0 = \langle T_1^0, \dots, T_n^0 \rangle$ 와 같이 주어졌을 때, 에이전트들의 작업 처리 총비용이 최소가 되는 새로운 작업할당 P^* 을 찾는 것으로 정의할 수 있다. 이때 임의의 작업할당 P^* 은 전체 작업집합 T 에 대한 하나의 파티션(partition)으로서, 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\forall i \in A, T_i^i = T, T_i^i \cap T_j^j = \emptyset \text{ for all } i \neq j$$

이러한 작업 재할당 문제에 대해 우리는 다음과 같은 몇 가지 가정을 추가한다. 첫째 각 에이전트는 수행해야 하는 작업에 따라 처리비용은 다를지라도 어떠한 작업도 수행 가능한 것으로 가정한다. 둘째, 에이전트는 모두 자신의 이익에 따라 행동을 결정하는 이익-추구형(self-interested) 에이전트들이라고 가정한다. 셋째, 작업할당을 위한 별도의 중앙-집중식 조정 매커니즘이 없는 것으로 가정한다.

본 논문에서는 이러한 작업 재할당 문제의 한 대표적인 예로서 다중 에이전트 외관원 여행 문제(Multiagent Traveling Salesman Problem)를 설명하고, 이 문제를 해결하기 위한 조정 매커니즘으로서 Vickrey 경매프로토콜의 적용방법을 설계하였다. 그리고 하나의 다중 에이전트 외관원 여행문제에 대한 풀이과정을 통해 Vickrey 경매프로토콜의 세부 진행방식을 설명하고 그 효과와 효율성을 예시하였다.

2. 관련 연구

지금까지 경제적 합리성(economic rationality)을 지닌 다수의 에이전트들 간의 자동화된 협상을 바탕으로 작업 할당이나 자원 할당 문제를 해결하고자 시도한 많은 연구가 있어 왔다[3]. Smith에 의해 처음 제안된 계약 망(contract net) 프로토콜은 top-down 방식의 계층적 분할을 통해 작업할당을 시도한다. T.W.Sandholm의 연구[1]에서는 보다 확장된 계약 망을 제안하고 이것을 바탕으로 본 논문에서 예제로 삼는 다중 에이전트 외관원 여행 문제에서의 적용방법과 효과를 다루었다. 경매는 그 동안 분산 컴퓨팅 환경에서 나타날 수 있는 다양

한 자원 할당 문제들에 적용되어 왔다. SPAWN 시스템은 활용도가 낮은 프로세서들을 동적으로 할당하기 위해 경매 프로토콜을 사용하였다. Walsh 등[2]은 공장 작업 스케줄링을 위한 자원 할당 문제를 역시 영국식 경매와 일반화된 Vickrey식 경매의 적용을 제안하고 두 프로토콜의 성질을 분석하였다. Schwartz와 Kraus의 논문에서는 통신 네트워크에 의해 연결된 다수의 정보 서버들간의 효율적인 데이터 집합(dataset) 할당을 위한 경매 입찰 전략을 제안하였다. Park 등의 연구에서는 미시건대학교 디지털도서관(UMDL) 환경에서 보다 효율적인 정보 서비스를 제공하기 위해 에이전트들이 다중 경매에서 이용할 수 있는 p-strategy라 불리는 입찰전략을 제안하였다. 그 밖에 AuctioBot이나 eMediator처럼 경매프로토콜과 다양한 입찰 전략들을 실제로 전자상거래 분야에 적용한 다수의 사례가 있다.

3. 다중 에이전트 외판원 여행 문제

다중 에이전트 외판원 여행 문제(Multi-agent TSP)는 다음과 같이 정의된다. 그림 1과 같이 몇 명의 외판원(salesman)들이 주어진 여러 도시들을 방문해야 한다. 각 도시는 단 한명의 외판원만이 방문할 수 있고, 각 외판원은 자신에게 할당된 모든 도시들을 방문한 뒤 처음 시작위치로 되돌아 와야 한다. 각 외판원은 자신에게 할당된 도시들에 대해서는 총 방문비용이 최소가 되는 최적의 순서로 방문해야 한다.

각 도시들의 위치와 도시간의 거리, 외판원들의 시작점, 그리고 초기에 각 외판원들에게 할당되는 도시들은 모두 임의적으로 선택된다. 이러한 초기 배정이 이루어진 후, 외판원들은 서로 도시들을 교환할 수 있다. 이 다중 에이전트 외판원 여행 문제의 목표는 에이전트들간에 방문해야 할 도시들을 서로 교환함으로써 에이전트들이 문제에 주어진 모든 도시들을 방문하는데 소요되는 총 비용을 최소화할 수 있는 최적의 방문도시 할당을 찾아내는 것이다.

(그림 1)의 다중 에이전트 외판원 문제는 에이전트들의 집합 $A = \{a, \beta, \gamma\}$ 과 작업(방문도시)들의 집합 $T = \{A, B, C, D, E, F, G\}$ 그리고 초기 작업할당 $P^0 = \{T_a^0, T_\beta^0, T_\gamma^0\}$, $T_a^0 = \{A, C, E\}$, $T_\beta^0 = \{D, G\}$, $T_\gamma^0 = \{B, F\}$ 이 주어졌다. 그리고 각 에이전트 i 에게 할당된 도시들의 집합 T_i' 에 대한 최소 여행비용을 $C_{TSP}(T_i')$ 로 표시한다면, 임의의 작업할당 P' 에 따른 총 여행비용 $C(P')$ 은 아래의 (식 1)과 같다.

$$C(P') = C_{TSP}(T_a') + C_{TSP}(T_\beta') + C_{TSP}(T_\gamma') \quad (식 1)$$

따라서 이 문제는 (식 2)와 같이 에이전트간의 도시 교환을 통해 총 여행비용 $C(P')$ 을 최소화할 수 있는 최적의 도시할당 P^* 를 찾는 작업 재할당 문제이다.

$$P^* = \underset{P' \in (P^0, \dots)}{\operatorname{arg\,min}} C(P') \quad (식 2)$$

4. Vickrey 경매를 이용한 조정

일반적으로 경매방식은 상품 제공자, 혹은 구매자 어느 한쪽에서만 입찰이 가능한가 아니면 양측 모두 입찰이 가능한가에 따라 크게 단일경매 (single auction) 방식과 이중경매(double auction) 방식으로 나뉜다. 단일경매방식에서도 입찰가를 공개하느냐 하지 않느냐, 입찰가가 올라가면서 낙찰이 결정되느냐 내려가면서 결정되

느냐, 최종 낙찰가가 최고 입찰가인지 두 번째 높은 입찰가인지 등에 따라 여러 가지 경매방식이 존재한다. 이에 따른 대표적인 4가지 단일경매방식으로는 영국식 경매, Vickrey식 경매, 네덜란드식 경매, 최고가 비공개 경매(first-price, sealed bid auction) 등이 있다.

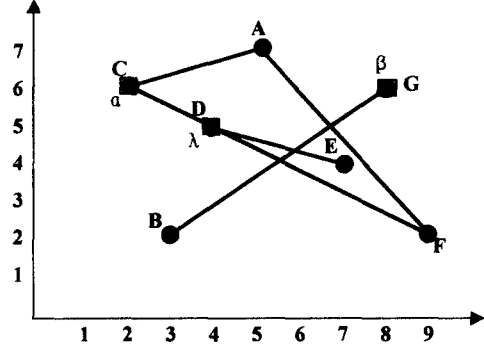


그림 1 다중에이전트 외판원 문제

특히 Vickrey식 경매는 비공개 입찰을 통해 최고 입찰가를 제시한 입찰자가 낙찰자로 선정되지만 최종 낙찰가는 자신이 제시한 최고 입찰가가 아닌 두번째 높은 입찰가로 정해진다. 이와 같은 Vickrey식 경매방식은 에이전트들 간의 과도한 경쟁과 불필요한 전략적 입찰가 계산과 제시를 막아 주는 장점이 있다. 즉 경매에 참여하는 각 에이전트들이 어느 정도의 전략적 가감없이 자신의 입찰 제한가(limit price)를 한번에 제시하도록 유도함으로써 단 한차례의 비공개 입찰을 통해 효과적으로 낙찰자를 결정할 수 있는 특징을 가지고 있다.

다중 에이전트 외판원 여행문제에 Vickrey 경매프로토콜을 적용하기 위해서는 (1)각 에이전트의 이익, (2)협상의 최종목표, (3) 경매대상, (4) 입찰 전략, (5) 전체적인 경매 진행과정 등을 정의하여야 한다. 먼저 각 에이전트의 이익은 (다른 에이전트의 도시를 양도받을 때, 받는 대가) - (다른 에이전트에게 자신의 도시를 양도할 때, 지불하는 비용) - (자신에게 할당된 도시를 여행하는 최소 비용)으로 계산한다. 협상의 최종목표는 이 문제에 참여하는 모든 에이전트들의 이익의 총합(social welfare)을 최대화하는 것으로 정의한다. 그리고 각 에이전트는 현재 자신에게 할당된 도시 중에서 다른 에이전트에게 양도했을 때 예상되는 이익의 증가가 가장 큰 도시를 경매대상 도시로 선택해 경매에 부치며 예상 이익 증가분 전부를 양도대가로 함께 제공한다. 나머지 에이전트들은 해당 도시를 자신이 양도받았을 때 예상되는 이익 증가분의 절반을 입찰가로 제시하는 입찰전략을 사용하며, 이때 낙찰은 Vickrey 경매방식에 따라 결정된다. 또한 이러한 도시 양도를 위한 단일경매의 기회는 각 에이전트마다 번갈아 가며 한번씩 갖는 것으로 한다.

(그림 1)의 다중 에이전트 외판원 문제에서 초기 할당에 따른 각 에이전트 단위의 최소방문비용 $C_{TSP}(T_i^0)$ 과 이익 U_i 은 [표 1]과 같다. 이 때 순차적으로 선택된 에이전트 a는 [표 2]와 같이 자신에게 할당된 도시들을 하나씩 제외한 각각의 최소 방문 비용을 구하게 된다. 이때 에이전트 a의 예상 이익 증가분 ΔU_a 은 최소방문비용의 변동분으로 하여, 이 예상 이익 증가분이 가장 큰 도시가 경매에 부칠 도시로 선택되고 예상 이익 증가분 ΔU_a 가 양도대가가 된다. 경매에 부칠 도시와 양도 대가가 결정

되면, 다른 에이전트 β, γ 는 [표 3]과 같이 입찰가를 계산하게 된다. 이 때의 예상 이익 증가분 ΔU_i^1 의 절반을 입찰가로 한다. 이렇게 해서 입찰을 하게 되면 Vickrey 경매 방식에 따라 비공개로 제출된 입찰가들을 바탕으로 최고 입찰가를 제시한 에이전트가 낙찰자로 결정되고 대신 낙찰가는 제시된 입찰가중에 두 번째로 높은 입찰가로 결정된다. 단, 단일 입찰일 경우 자동으로 낙찰을 하는 것으로 하였다.

표 1 초기 할당에서의 이익

	최소방문비용 $C_{TSP}(T_i^0)$	에이전트의 이익 U_i^0
에이전트 a	17.6	-17.6
에이전트 β	12.8	-12.8
에이전트 γ	6.4	-6.4
이익의 총합	$-(17.6 + 12.8 + 6.4) = -36.8$	

표 2 경매도시와 양도대가

<p>■ 도시 A를 양도할 때 최소방문비용 $C_{TSP}(T_a^1) = C_{TSP}(T_a^1(C,F)) = 16$ 예상 이익 변동분 = $-(\text{최소방문비용 변동분})$ $\Delta U_a^1 = -(C_{TSP}(T_a^0-(A))-C_{TSP}(T_a^0)) = -(16-17.6)=1.6$</p>
<p>■ 도시 F를 양도할 때 최소방문비용 $C_{TSP}(T_a^1) = C_{TSP}(T_a^1(C,F)) = 16$ 예상 이익 변동분 = $-(\text{최소방문비용 변동분})$ $\Delta U_a^1 = -(C_{TSP}(T_a^0-(F))-C_{TSP}(T_a^0)) = -(6.4-17.6)=11.2$</p>
<p>■ 경매대상 : 도시 F ■ 양도대가 : 11.2</p>

표 3 에이전트의 입찰가

<p>■ 에이전트 β의 입찰 최소여행비용 $C_{TSP}(T_\beta^1) = C_{TSP}(T_\beta^1(B,F,G)) = 16.5$ 예상이익 변동분 = $-(\text{최소방문비용 변동분}) + \text{양도대가}$ $\Delta U_\beta^1 = -(C_{TSP}(T_\beta^0-(F))-C_{TSP}(T_\beta^0)) + \text{양도대가}$ $= -(16.5-12.8) + 11.2 = 7.5$ 입찰가 = 예상이익 변동분/2 = 3.8</p>
<p>■ 에이전트 γ의 입찰 최소여행비용 $C_{TSP}(T_\gamma^1) = C_{TSP}(T_\gamma^1(E,E,F)) = 11.8$ 예상이익 변동분 = $-(\text{최소방문비용 변동분}) + \text{양도대가}$ $\Delta U_\gamma^1 = -(C_{TSP}(T_\gamma^0-(F))-C_{TSP}(T_\gamma^0)) + \text{양도대가}$ $= -(11.8-6.4) + 11.2 = 5.8$ 입찰가 = 예상이익 변동분/2 = 2.9</p>
<p>■ 낙찰자 = β에이전트 ■ 낙찰가 = 2.9</p>

일단 낙찰이 결정되어지면 두 에이전트간에 작업도시교환이 이루어지고 따라서 한번의 단위경매가 끝나게 된다. 이때 작업 재할당 결과는 (그림 2)와 같고, 각 에이전트의 이익 및 이익의 총합은 [표 4]와 같이 변동된다. 이러한 단위경매를 경매에 부칠 도시가 있는 에이전트들에 대해 차례대로 번갈아 시행하며, 이러한 과정은 더 이상 에이전트들의 총 이익의 변동이 없을 때까지 반복된다.

다중 에이전트시스템의 작업 재할당을 위한 이와 같은 Vickrey 경매프로토콜의 적용은 다음과 같은 장점을 가

질 수 있다. 먼저 각 에이전트의 이익만을 고려함으로써 문제를 단순화할 수 있고, 복잡도가 큰 중앙-집중식 제어 메커니즘이 필요치 않으며, 따라서 각 에이전트의 자율성을 최대한 보장할 수 있고, 큰 협상비용을 들이지 않고 최적의 할당에 도달 할 수 있다는 점등이다.

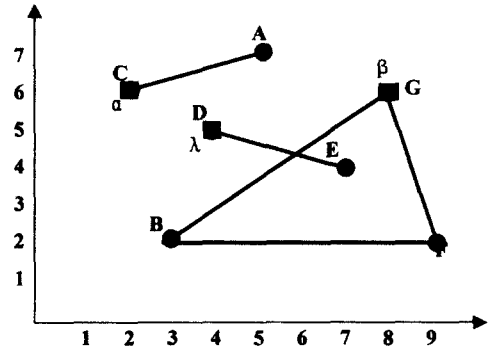


그림 2 1차 재할당 결과

표 4 1차 재할당 후의 이익

	최소방문비용 $C_{TSP}(T_i^1)$	에이전트의 이익 U_i^1
에이전트 a	6.4	-3.5
에이전트 β	116.5	-8.2
에이전트 γ	6.4	-6.4
이익의 총합	$-(3.5 + 8.2 + 6.4) = -18.1$	

5. 결론

본 연구에서는 대표적인 다중 에이전트 작업할당문제의 하나로써 다중 에이전트 외판원 여행 문제를 설명하였고, 이 문제를 풀기 위한 조정 메커니즘으로 Vickrey 경매프로토콜을 적용하였다. 계획하고 있는 향후연구로는 실험을 통해 다중 에이전트 외판원 여행 문제영역에서 다른 조정메커니즘들과 비교하여 설계된 Vickrey 경매프로토콜의 효율성을 분석해보는 것이다.

참고 문헌

- 1 T.W. Sandholm, "Contract types for satisficing task allocation: I theoretical results", AAAI Spring Symposium Series: Satisficing Models, pp 68-75, 1998.
- 2 W.E. Walsh and M.P. Wellman, "A market protocol for decentralized task allocation", Proceedings of the 3rd ICMAS, pp 325-332, 1998.
- 3 G. Weiss, "Multiagent Systems: A modern approach to distributed artificial intelligence", MIT Press, 1999.