

Vickrey 경매에 기초한 다중 에이전트 시스템에서의 작업 재할당

김 인 철[†]

요 약

수행할 다수의 작업을 에이전트들에게 자동으로 할당해주는 것은 다중 에이전트 시스템 분야에서 매우 중요한 문제이다. 많은 응용영역에서 작업처리 비용이 서로 다른 에이전트들간에 작업들을 새로이 재할당해줌으로써 상당한 비용절감을 얻을 수 있다. 이익-추구형 에이전트들간의 자동화된 작업 재할당을 위해서는 누가 무슨 작업을 할 지에 관한 합의에 도달하기 위해 에이전트들이 서로 어떻게 상호작용을 해야하는지를 규정해주는 공통의 협상프로토콜은 각 에이전트들이 사용해야 한다. 본 논문에서는 대표적인 다중 에이전트 작업 재할당 문제의 하나로서 다중 에이전트 외판원 여행 문제를 소개하고, 이 문제를 풀기 위한 에이전트간 협상프로토콜로서 Vickrey 경매를 제안하였다. 일반적으로 경매기반의 프로토콜들은 구현이 용이하고, 작업할당과정이 효율적이며, 에이전트들이 충분한 영역지식을 갖지 못한 경우에도 합의를 보장할 수 있다는 몇 가지 특성을 가지고 있다. 더욱이 Vickrey 경매는 각 에이전트들이 단 한번만 입찰하며 각자 진실한 가치평가를 그대로 입찰하는 등의 장점을 추가로 가진다. 이익-추구형 에이전트들간의 작업 재할당에 이와 같은 시장기반의 협상프로토콜을 적용하기 위해, 본 논문에서는 각 에이전트의 이익, 협상의 목표, 경매대상 작업, 각 에이전트의 입찰전략, 경매 진행순서 등을 정의하였다. 또한 다중 에이전트 외판원 여행 문제에 대한 몇 가지 실험을 통해, 이 협상프로토콜에 따르면 매 단계마다 작업 할당이 단조 향상되며, 최종적으로 최적의 작업 할당에 수렴할 수 있다는 것을 보인다.

Task Reallocation in Multi-agent Systems Based on Vickrey Auctioning

In-Cheol Kim[†]

ABSTRACT

The automated assignment of multiple tasks to executing agents is a key problem in the area of multi-agent systems. In many domains, significant savings can be achieved by reallocating tasks among agents with different costs for handling tasks. The automation of task reallocation among self-interested agents requires that the individual agents use a common negotiation protocol that prescribes how they have to interact in order to come to an agreement on "who does what". In this paper, we introduce the multi-agent *Traveling Salesman Problem (TSP)* as an example of task reallocation problem, and suggest the Vickrey auction as an inter-agent negotiation protocol for solving this problem. In general, auction-based protocols show several advantageous features: they are easily implementable, they enforce an efficient assignment process, and they guarantee an agreement even in scenarios in which the agents possess only very little domain-specific knowledge. Furthermore Vickrey auctions have the additional advantage that each interested agent bids only once and that the dominant strategy is to bid one's true valuation. In order to apply this market-based protocol into task reallocation among self-interested agents, we define the profit of each agent, the goal of negotiation, tasks to be traded out through auctions, the bidding strategy, and the sequence of auctions. Through several experiments with sample multi-agent TSPs, we show that the task allocation can improve monotonically at each step and then finally an optimal task allocation can be found with this protocol.

키워드 : 다중 에이전트시스템(Multi-agent Systems), 작업 재할당(Task Reallocation), 협상 프로토콜(Negotiation Protocol), Vickrey 경매(Vickrey Auction)

1. 서 론

다중 에이전트시스템 분야는 자율적으로 행동하고 상호

작용하는 다수의 에이전트들로 구성된 시스템들을 연구하는 분야로서 최근 십여년 동안 지속적으로 관심이 증가되어 왔다. 다중 에이전트시스템 분야에서 해결해야 할 핵심적인 문제 중의 하나는 처리해야 할 다수의 작업을 적절한 에이전트들을 찾아 자동으로 할당해주는 것이다. 일반적

※ 본 연구는 2001학년도 경기대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음
[†] 종신회원 : 경기대학교 전자계산학과
 논문접수 : 2001년 10월 4일, 심사완료 : 2001년 12월 24일

로 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. 따라서 많은 응용영역에서 작업처리 비용이 서로 다른 에이전트들간에 작업들을 새로이 재할당해줌으로써 전체적으로 상당한 비용절감을 얻을 수 있다. 일반적으로 하나의 작업 재할당 문제(task reallocation problem)는 아래의 [정의 1]과 같이 정의할 수 있다.

[정의 1] 하나의 작업 재할당 문제는 하나의 튜플(tuple) (T, A, c_i, P^0) 로 정의할 수 있다. 여기서, T 는 작업들의 집합, A 는 에이전트들의 집합, c_i 는 각 에이전트 i 가 자신에게 할당된 작업들을 처리할 때 요구되는 비용을 구해주는 하나의 작업처리 비용 함수 $c_i: 2^T \rightarrow R \cup \{\infty\}$, P^0 는 각 에이전트에 주어진 작업 초기 할당 $P^0 = \langle T_1^0, \dots, T_n^0 \rangle$, $T_i^0 \subseteq T$ 을 나타낸다. 이때 문제의 해는 에이전트들간의 자율적인 작업 교환을 통해 에이전트들의 작업처리 총 비용이 최소가 되는 새로운 작업할당 P^* 을 찾는 것이다. 이때 임의의 작업할당 P^k 은 전체 작업집합 T 에 대한 하나의 파티션(partition)으로서, 다음과 같은 조건을 만족한다. $U_{i \in A} T_i^k = T, T_i^k \cap T_j^k = \emptyset$ for all $i \neq j$

자신의 이익에 따라 행동을 결정하는 이익-추구형(self-interested) 에이전트들간의 자동화된 작업 재할당을 위해서는 누가 무슨 작업을 할 지에 관한 합의(agreement)에 도달하기 위해 에이전트들이 서로 어떻게 상호작용을 해야하는지를 규정해주는 공통의 협상프로토콜(negotiation protocol)을 각 에이전트들이 사용해야 한다. 본 논문에서는 대표적인 다중 에이전트 작업 재할당 문제의 하나로서 다중 에이전트 외판원 여행 문제(multi-agent Traveling Salesman Problem, TSP)를 소개하고, 이 문제를 풀기 위한 에이전트간 협상프로토콜로서 Vickrey 경매를 제안하였다. 일반적으로 경매기반의 프로토콜들은 구현이 용이하고, 작업할당과정이 효율적이며, 에이전트들이 충분한 영역지식을 갖지 못한 경우에도 합의를 보장할 수 있다는 몇 가지 특성을 가지고 있다. 더욱이 Vickrey 경매는 각 에이전

트들이 오직 단 한번만 입찰하며 각자 진실한 가치평가 그대로 입찰하는 등의 장점을 추가로 가진다. 이익-추구형 에이전트들간의 작업 재할당에 이와 같은 시장기반의 협상 프로토콜(market-based negotiation protocol)을 적용하기 위해, 본 논문에서는 (1) 각 에이전트의 이익, (2) 협상의 목표, (3) 경매대상 작업, (4) 각 에이전트의 입찰전략, (5) 경매 진행순서 등을 정의하였다. 또한 다중 에이전트 외판원 여행 문제들에 대한 몇 가지 실험을 통해, 이 협상프로토콜에 따르면 매 단계마다 작업 할당이 단조 향상되며, 최종적으로 최적의 작업 할당에 수렴할 수 있다는 것을 보인다.

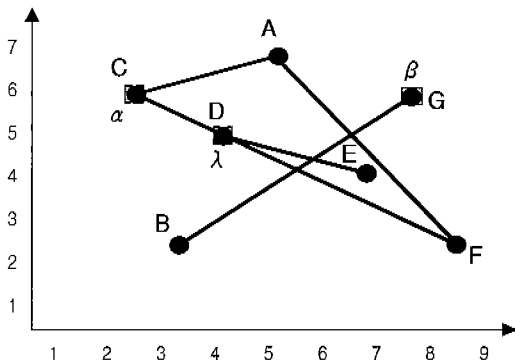
2. 관련 연구

지금까지 경제적 합리성(economic rationality)을 지닌 다수의 에이전트들 간의 자동화된 협상을 바탕으로 작업 할당이 자원 할당 문제를 해결하고자 시도한 많은 연구가 있어 왔다[7]. Rosenschein과 Zlotkin의 연구[9]에서는 TOD (Task-Oriented Domain)이라고 불리는 하나의 작업 할당 문제 유형을 정의하였다. 하나의 TOD에서는 어떤 에이전트도 정해진 비용을 지불하면 잠재적으로 어떤 작업군도 수행할 수 있다고 보았다. 그리고 이러한 환경에서 에이전트들이 부담해야 하는 비용을 낮추기 위해 작업을 재분할하는데 사용할 수 있는 몇 가지 프로토콜들의 성질을 분석하였다. Smith에 의해 처음 제안된 계약 망(contract net) 프로토콜은 하향식(top-down) 계층적 분할을 통해 작업할당을 시도한다. T.W. Sandholm의 연구[2, 3]에서는 보다 확장된 다양한 형태의 계약 망을 제안하고 적용방법과 효과를 다루었다. 경매는 그 동안 분산 컴퓨팅 환경에서 나타날 수 있는 다양한 자원 할당 문제들에 적용되어 왔다. SPAWN 시스템[5]은 활용도가 낮은 프로세서들을 동적으로 할당하기 위해 경매 프로토콜을 사용하였다. Walsh 등[6]은 공장 작업 스케줄링을 위한 자원 할당 문제를 역시 영국식 경매와 Vickrey식 경매의 적용을 제안하고 두 프로토콜의 성질을 분석하였다. Schwartz와 Kraus의 논문[4]에서는 통신 네트워크에 의해 연결된 다수의 정보 서버들간의 효율적인 데이터 집합(dataset) 할당을 위한 경매 입찰 전략을 제안하였다. Park 등의 연구[1]에서는 미시건 대학교 디지털도서관(UMDL) 환경에서 보다 효율적인 정보서비스를 제공하기 위해 에이전트들이 다중 경매에서 이용할 수 있는 p-strategy라 불리는 입찰전략을 제안하였다. 그 밖에 AuctionBot[8]이나 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 1)과 같이 몇 명의 외판원(salesman)들이 주어진 여러 도시들을 방문해야 한다. 각 도시는 단 한 명의 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 에이전트들 간에 방문해야 할 도시들을 서로 교환함으로써 에이전트들이 문제에 주어진 모든 도시들을 방문하는데 소요되는 총 비용을 최소화할 수 있는 최적의 방문도시 할당을 찾아내는 것이다.

(그림 1)은 2차원 좌표평면상에 7개 도시의 위치와 3명의 에이전트의 시작점과 초기 할당을 나타내고 있다 따라서 (그림 1)의 다중 에이전트 외판원 문제는 에이전트들의 집합 $A = \{\alpha, \beta, \gamma\}$ 과 작업(방문도시)들의 집합 $T = \{A, B, C, D, E, F, G\}$ 그리고 초기 작업할당 $P^0 = \{T_\alpha^0, T_\beta^0, T_\gamma^0\}$, $T_\alpha^0 = \{A, C, F\}$, $T_\beta^0 = \{B, G\}$, $T_\gamma^0 = \{D, E\}$ 로 모델링 할 수 있다.



(그림 1) 다중 에이전트 외판원 문제

그리고 각 에이전트 i 에게 할당된 도시들의 집합 T_i^j 에 대한 최소 여행비용을 $C_{TSP}(T_i^j)$ 로 표시한다면, 임의의 작업할당 P^j 에 따른 총 여행비용 $C(P^j)$ 은 아래의 식 (1)과 같다.

$$C(P^j) = C_{TSP}(T_\alpha^j) + C_{TSP}(T_\beta^j) + C_{TSP}(T_\gamma^j) \quad (1)$$

따라서 이 문제는 식 (2)와 같이 에이전트간의 도시 교환을 통해 총 여행비용 $C(P^j)$ 을 최소화할 수 있는 최적의 도시할당 P^* 를 찾는 작업 재할당 문제(task reallocation problem)이다.

$$P^* = \arg \min_{P^j \in \{P^0, \dots\}} C(P^j) \quad (2)$$

본 논문에서 다중 에이전트시스템에서의 작업 재할당 문제로 특별히 다중 에이전트 외판원 여행문제를 다루는 이유는 기존의 단일 에이전트 외판원 여행문제가 이미 널리 알려져 있을 뿐 아니라 다중 에이전트 외판원 여행문제 역시 간결하여 작업 재할당을 위한 협상프로토콜을 설명하기 쉽기 때문이다. 하지만 기존의 단일 에이전트 외판원 여행문제와 본 논문에서 설명한 다중 에이전트 외판원 문제는 몇 가지 큰 차이점이 있다. 먼저 계획단계와 실행단계로 나누어 이 문제들을 비교해보면 방문해야 할 도시수가 같은 경우 실행시 단일 에이전트에 의해 순차적으로 방문하는 것 보다 다수의 에이전트들이 이 도시들을 나누어 병렬적으로 방문하는 것이 훨씬 작업 효율을 높일 수 있다는 것은 자명하다. 즉 실행단계를 고려할 때는 다중 에이전트 외판원 여행문제가 더욱 효과적이다. 하지만 계획단계를 고려하면 단일 에이전트 외판원 문제의 경우 작업에 참여할 에이전트간의 작업분배를 위한 협상과 조정을 위한 비용은 전혀 필요치 않으며, 그럼에도 불구하고 최적의 방문계획을 수립하는 것은 잘 알려진 바와 같이 지수의 복잡도를 갖는다. 본 논문에서 소개하는 다중 에이전트 외판원 여행문제는 전체 도시개수보다 적은 수이기는 하지만 각 에이전트에 현재 할당된 도시들에 대한 최적 방문 계획수립을 위한 비용외에도 본 논문에서 연구대상으로 삼는 에이전트간의 작업분배를 위한 협상과 조정을 위한 부가노력을 필수적으로 요구한다. 이러한 차이점을 바탕으로 본 논문에서는 단순히 단일 에이전트 외판원 여행 문제의 계획비용을 더욱 낮추어 보려는 시도가 아니라 다중 에이전트 협상과 조정이 필요한 대표적인 하나의 새로운 문제유형으로서 다중 에이전트 외판원 여행문제를 다룰 예정이다.

4. Vickrey 경매기반의 협상프로토콜

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 결정되느냐, 최종 낙찰가가 최고 입찰가인지 두 번째 높은 입찰가인지 등에 따라 여러 가지 경매방식이 존재한다. 이에 따른 대표적인 4가지 단일경매방식으로는 영국식 경매, Vickrey 경매, 네덜란드식 경매, 최고가 비공개 경매(first-price, sealed bid

auction) 등이 있다.

특히 Vickrey 경매는 비공개 입찰을 통해 최고 입찰가를 제시한 입찰자가 낙찰자로 선정되지만 최종 낙찰가는 자신이 제시한 최고 입찰가가 아닌 두번째 높은 입찰가로 정해진다. 이와 같은 Vickrey 경매방식은 에이전트들 간의 과도한 경쟁과 불필요한 전략적 입찰을 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 목표, (3) 경매 대상, (4) 입찰 전략, (5) 경매 진행순서 등을 정의하여야 한다. 먼저 에이전트들간의 하나의 도시 교환은 한번의 Vickrey 경매에 의해 결정되며, 이때 도시를 양도할 에이전트가 경매인(auctioneer)의 역할을 수행하고 나머지 에이전트들은 이 도시를 양도받기 위한 입찰자(bidder) 역할을 수행한다. Vickrey 경매프로토콜에 따라 낙찰자가 결정되면 경매인과 이 낙찰자간에 해당 도시를 주고받음으로써 한번의 작업 재할당이 이루어진다. 이때 경매를 통해 도시를 양도하는 에이전트 측에서는 이 도시를 추가 작업으로 양도받는 측에 경제적 보상으로 일정한 양의 양도대가를 지불하는 것으로 가정한다. 대신 이 도시에 대한 낙찰가만큼의 비용을 낙찰자로부터 되돌려 받는 것으로 한다. 따라서 협상이 진행되는 과정의 입찰의 시점에서 각 에이전트의 이익은 [정의 2]와 같이 계산한다.

[정의 2] 다중 에이전트 외판원 여행문제를 풀기 위한 Vickrey 경매 기반의 협상 진행과정 중 입찰의 시점에서 각 에이전트의 이익은 일반적으로 (다른 에이전트로부터 받는 대가) - (다른 에이전트에게 지불하는 비용) - (결과적으로 자신에게 할당된 도시를 여행하는 최소 비용)으로 정의한다.

(그림 1)의 다중 에이전트 외판원 문제의 예에서는 초기 할당 후 각 에이전트의 최소방문비용 $C_{TSP}(T^0)$ 과 이익 U_i 은 <표 1>과 같다. 이 경우에는 아직 도시교환이 이루어지지 않은 상태이므로 각 에이전트의 이익은 단순히 각자에게 할당된 도시들에 대한 최소방문비용만을 뺀 것으로 계산한다.

<표 1> 초기 할당에서의 이익

	최소방문비용 $C_{TSP}(T^0)$	에이전트의 이익 U_i^0
에이전트 α	17.6	-17.6
에이전트 β	12.8	-12.8
에이전트 γ	6.4	-6.4
총 합	36.8	-36.8

다중 에이전트 외판원 문제에서 Vickrey 경매를 이용한 에이전트간 협상의 최종 목표 혹은 최종 합의점은 주어진 모든 도시들을 방문하는데 드는 총 방문비용이 최소가 되는 최적의 도시 할당이 되며, 이것은 곧 모든 에이전트들의 이익의 합이 최대가 되는 도시 할당을 의미한다. 다시 말해 에이전트들의 전체이익인 사회복지(social welfare)를 최대화하는 것이 협상의 최종 목표가 된다. 하지만 협상에 참여하는 각 에이전트는 모두 개별적인 합리성(individual rationality)을 지닌 에이전트들로서, 각자의 즉각적인 이익에는 민감하지만 다른 에이전트들의 이익에는 관심이 없을 뿐 아니라 알 수도 없다고 가정한다. 따라서 에이전트들의 전체이익의 증가를 직접적이고 명시적인 협상 목표로 삼지는 않는다. 대신 각 에이전트는 협상 과정 동안 자신의 이익을 최대한으로 증가시킬 수 있는 방향으로만 경매와 입찰을 통해 협상을 이끌어가고, 더 이상 에이전트의 이익 증가가 발생하지 않으면 협상은 합의점에 도달한 것으로 간주하여 종료된다.

[정의 3] 다중 에이전트 외판원 여행문제를 풀기 위한 Vickrey 경매 기반의 협상프로토콜의 최종 목표는 에이전트들의 전체이익인 사회복지(social welfare)의 최대화이다.

(그림 1)의 예제에서 초기할당 직후의 사회복지는 세 에이전트 α, β, γ 의 이익의 총합인 $(-17.6) + (-12.8) + (-6.4) = -36.8$ 이다. 이후 계속되는 작업 재할당 (도시 교환)을 통해 이 세 에이전트의 전체이익인 사회복지를 높여감으로써 최적의 도시 할당을 찾아간다.

한편, Vickrey 경매 기반의 협상프로토콜에 참여하는 각 에이전트는 현재 자신에게 할당된 도시 중에서 다른 에이전트에게 양도했을 때 예상되는 이익의 증가가 가장 큰 도시를 경매대상 도시로 선택해 경매에 부치며, 이때 예상되는 이익 증가분 전부를 양도대가로 함께 제공한다. 나머지 에이전트들은 해당 도시를 자신이 양도받았을 때 예상되는 이익 증가분을 계산한다. 그리고 이 에이전트들은 예상 이익 증가가 양(+)인 경우에 한해 입찰하며, 자신의 예상 이익 증가분의 절반만을 입찰가로 제시한다. 이 단위경매는 Vickrey 경매 방식을 따르므로 모든 입찰자들에 의한 단 한번의 비공개 입찰을 통해 낙찰이 결정된다. 즉 최고 입찰가를 제시한 에이전트가 낙찰자로 결정되고 대신 낙찰가는 제시된 입찰가중에 두 번째로 높은 입찰가로 결정된다. 단, 입찰자가 없거나 단일 입찰일 경우 자동 유찰되는 것으로 한다. 또한 이러한 도시 양도를 위한 단위경매의 기회는 각 에이전트마다 번갈아 가며 한번씩 갖는 것으로 한다.

[정의 4] 다중 에이전트 외판원 여행문제를 풀기 위한 Vick-

rey 경매 기반의 협상 진행과정 중 에이전트 α 가 도시를 양도할 순서이고 이때 α 에 할당된 도시들의 집합이 $T'_\alpha = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ 라고 가정하면, 각 도시 a_i 에 대해 예상 이익 증가분을 $\Delta U'_\alpha(a_i) = C_{TSP}(T'_\alpha) - C_{TSP}(T'_\alpha - \{a_i\})$ 와 같이 계산하여 예상 이익 증가분이 최대가 되는 도시 a^* 가 경매 대상 도시가 된다. 즉 경매대상 도시 a^* 는 다음과 같이 정의한다:

$$a^* = \operatorname{argmax}_{a_i \in T'_\alpha} \Delta U'_\alpha(a_i) = \operatorname{argmax}_{a_i \in T'_\alpha} (C_{TSP}(T'_\alpha) - C_{TSP}(T'_\alpha - \{a_i\}))$$

그리고 이때 양도대가 P_{offer} 는 예상 이익 증가분 $\Delta U'_\alpha(a^*)$ 이다. 즉 $P_{offer} = \Delta U'_\alpha(a^*)$.

(그림 1)의 예제에서 도시를 양도할 기회가 에이전트 α 부터 시작되어 순차적으로 주어진다고 하면, 에이전트 α 는 <표 2>와 같이 자신에게 할당된 도시들 중 하나를 양도했을 때의 각각 예상 최소 방문 비용을 계산해본다. 그리고 최소 방문 비용의 변화량을 기초로 예상 이익 증가분 $\Delta U'_\alpha$ 을 산출해본다. 이어서 에이전트 α 는 자신에게 할당된 도시들 중에서 이와 같이 계산된 예상 이익 증가분이 가장 큰 도시를 선택해 경매에 부치며, 예상 이익 증가분 $\Delta U'_\alpha$ 모두를 낙찰자에게 제공할 양도대가로 내놓는다. 이와 같은 방식으로 도시 F가 경매에 부칠 도시로 선택되고 이 도시를 다른 에이전트에게 양도했을 때 얻어질 예상 이익 증가분 11.2가 양도대가로 결정된다.

<표 2> 경매도시와 양도대가

<ul style="list-style-type: none"> 도시 A를 양도할 때 최소방문비용 $C_{TSP}(T'_\alpha - \{A\}) = C_{TSP}(\{C, F\}) = 16.0$ 예상 이익 증가분 $\Delta U'_\alpha = C_{TSP}(T'_\alpha) - C_{TSP}(T'_\alpha - \{A\}) = 17.6 - 16.0 = 1.6$ 도시 F를 양도할 때 최소방문비용 $C_{TSP}(T'_\alpha - \{F\}) = C_{TSP}(\{A, C\}) = 6.4$ 예상 이익 증가분 $\Delta U'_\alpha = C_{TSP}(T'_\alpha) - C_{TSP}(T'_\alpha - \{F\}) = 17.6 - 6.4 = 11.2$
<ul style="list-style-type: none"> 경매대상 : 도시 F 양도대가 : $P_{offer} = 11.2$

[정의 5] 다중 에이전트 외판원 여행문제를 풀기 위한 Vickrey 경매 기반의 협상 진행과정 중 에이전트 α 가 도시 A를 양도대가 P_{offer} 와 함께 경매에 부쳤다

고 가정하면, 현재 할당된 도시들의 집합 T'_β 을 가진 입찰 후보 에이전트 β 는 경매도시 A에 대해 예상 이익 증가분을 $\Delta U'_\beta(A) = C_{TSP}(T'_\beta) - C_{TSP}(T'_\beta \cup \{A\}) + P_{offer}$ 와 같이 계산하여 $\Delta U'_\beta(A) > 0$ 이면 입찰하고, $\Delta U'_\beta(A) \leq 0$ 이면 입찰하지 않는다. 이때 입찰가는 $P_{bid}(\beta, A) = \Delta U'_\beta(A)/2$ 로 정의한다.

(그림 1)의 예제에서 에이전트 α 에 의해 양도대가 11.2와 더불어 도시 F가 경매에 부쳐지면, 다른 에이전트 β, γ 는 각각 <표 3>과 같이 도시 F를 받아왔을 때 예상되는 자신의 예상 이익 증가분을 계산하고 이것에 따라 입찰여부와 적절한 입찰가를 결정한다. 이때, 에이전트 β, γ 는 방문해야 할 도시의 증가로 인한 최소 방문 비용의 증가와 양도대가 11.2도 함께 고려하여 예상되는 이익 증가분을 각각 7.5와 5.8로 계산한다. 따라서 에이전트 β 와 γ 는 각각 3.6와 2.9의 입찰가로 입찰하며, 그 결과 낙찰가 2.9에 에이전트 β 가 낙찰자로 결정된다.

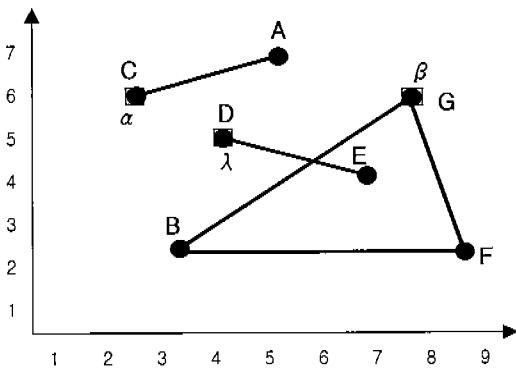
<표 3> 에이전트의 입찰가

<ul style="list-style-type: none"> 에이전트 β의 입찰 최소여행비용 $C_{TSP}(T'_\beta - \{F\}) = C_{TSP}(\{B, G\}) = 16.5$ 예상 이익 증가분 $\Delta U'_\beta = C_{TSP}(T'_\beta) - C_{TSP}(T'_\beta - \{F\}) + P_{offer} = 12.8 - 16.5 + 11.2 = 7.5$ 입찰가 : $P_{bid}(\beta, F) = \Delta U'_\beta/2 = 7.5/2 = 3.6$ 에이전트 γ의 입찰 최소여행비용 $C_{TSP}(T'_\gamma - \{F\}) = C_{TSP}(\{D, E, F\}) = 11.8$ 예상 이익 증가분 $\Delta U'_\gamma = C_{TSP}(T'_\gamma) - C_{TSP}(T'_\gamma + \{F\}) + P_{offer} = 6.4 - 11.8 + 11.2 = 5.8$ 입찰가 : $P_{bid}(\gamma, F) = \Delta U'_\gamma/2 = 5.8/2 = 2.9$

[정의 6] 다중 에이전트 외판원 여행문제를 풀기 위한 Vickrey 경매 기반의 협상 진행과정 중 에이전트 α 가 도시 A를 양도대가 P_{offer} 와 함께 경매에 부쳤고 이 경매에서 입찰 에이전트 β 가 낙찰가 $P_{clear}(\beta, A)$ 로 낙찰되었다고 가정하자. 그러면 에이전트 α 의 새로운 이익은 $U'_\alpha^{j+1} = U'_\alpha + P_{clear}(\beta, A)$ 와 같이 계산되고, 반면에 에이전트 β 의 새로운 이익은 $U'_\beta^{j+1} = U'_\beta + \Delta U'_\beta(A) - P_{clear}(\beta, A)$ 와 같이 계산된다. 이때 두 에이전트의 새로운 도시 할당은 각각 $T'_\alpha^{j+1} = T'_\alpha - \{A\}$ 와 $T'_\beta^{j+1} = T'_\beta \cup \{A\}$ 가 된다. 나머지 에이전트들의 이익과

도시 할당은 불변이다.

(그림 1)의 예제에서는 위에서 설명한 바대로 일단 낙찰이 결정되어지면 두 에이전트 α 와 β 간에 작업도시 F의 교환과 더불어 양도대가 11.2, 그리고 낙찰가 2.9 등이 서로에게 지불된다. 따라서 이때 두 에이전트의 새로운 이익은 <표 4>와 같이 각각 $-17.6 + 2.9 = -14.7$ 와 $-12.8 + 7.5 - 2.9 = -8.2$ 로 바뀌며 이와 같은 1차 작업 재할당의 결과는 (그림 2)와 같다. <표 4>를 통해 거래가 이루어지지 않은 에이전트 γ 의 실제이익은 불변이나 에이전트 α 의 실제이익은 낙찰가만큼 증가되고, 에이전트 β 의 실제이익은 예상 이익 증가분에서 낙찰가를 뺀 만큼 증가하였다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 한 차례의 작업 재할당을 통해 손해가 발생한 에이전트는 아무도 없으며 대신 오히려 도시 교환이 이루어진 에이전트들의 경우 모두 이익이 증가하는 현상을 보였다. 또한 결과적으로 작업도시 F의 교환으로 인해 에이전트들의 전체이익도 -36.8에서 -30.3으로 증가하였음을 - 따라서 실제 필요한 총 여행경비도 36.8에서 30.3으로 감소하였음을 - 확인할 수 있다. 이와같은 Vickrey 방식의 단위 경매를 경매에 부칠 도시가 있는 에이전트들에 대해 차례대로 번갈아 가면서 더 이상 에이전트들의 전체이익의 변동이 없을 때까지 반복한다. (그림 3)은 에이전트 β 의 도시 B가 경매를 통해 에이전트 γ 에게 양도된 2차 작업 재할당의 결과를 보여주며, (그림 4)는



(그림 2) 1차 재할당의 결과

<표 4> 1차 재할당 후의 이익

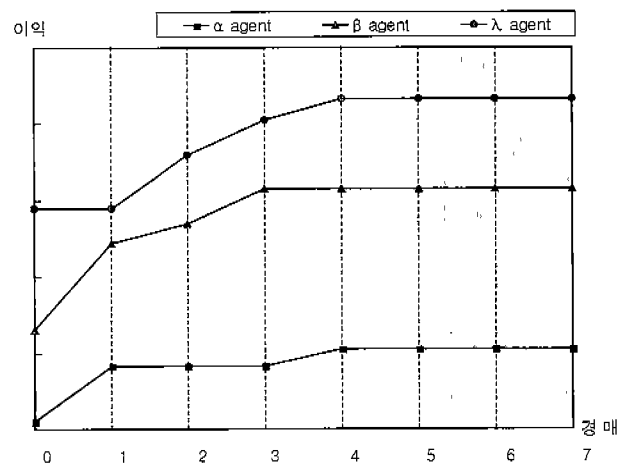
	에이전트의 이익 U_i^t
에이전트 α	$U_\alpha^0 + P_{clear}(\beta, F) = U_\alpha^0 + P_{bid}(\gamma, F)$ $= -17.6 - 2.9 = -14.7$
에이전트 β	$U_\beta^0 + \Delta U_\beta' - P_{clear}(\beta, F)$ $= U_\beta^0 + \Delta U_\beta' - P_{bid}(\gamma, F)$ $= -12.8 - 7.5 - 2.9 = -8.2$
에이전트 γ	$U_\gamma^0 = -6.4$
총 합	-30.3

4차 작업 재할당 후 얻어진 최적의 작업할당을 보여준다.

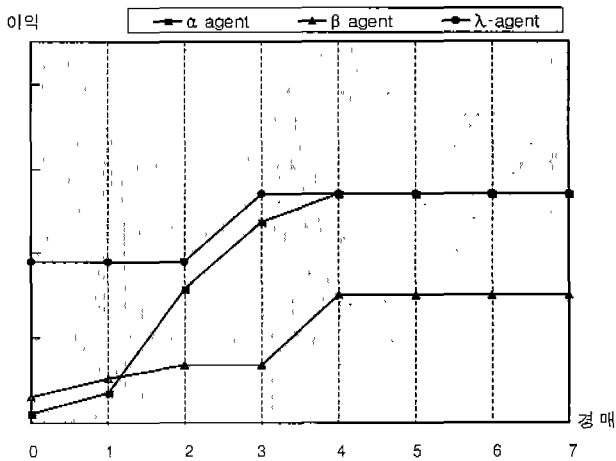
5. 실험

본 논문에서 제안한 다중 에이전트시스템에서의 작업 재할당을 위한 Vickrey 경매프로토콜의 효율성을 분석하기 위해 몇 가지 다중 에이전트 TSP 문제들에 대한 실험을 전개하였다. 실험에 사용된 문제들은 모두 3명의 에이전트에 7개의 도시를 할당하는 문제들로서, 도시의 위치, 초기 할당, 에이전트의 시작점등을 임의로 선정하여 만들었다. 이렇게 만들어진 문제들은 초기할당에 따라 각각 ACF-BG-DE문제, CEG-AF-BD문제, BC-AEG-DF문제 등으로 부른다. 이 각각의 문제에 대해 앞서 제안한 경매프로토콜을 적용하면서 작업 재할당이 이루어지는 매 단계마다 각 에이전트의 개인 이익과 전체 이익의 변화를 추적함으로써 작업 할당이 어떻게 개선되는지를 조사하였다.

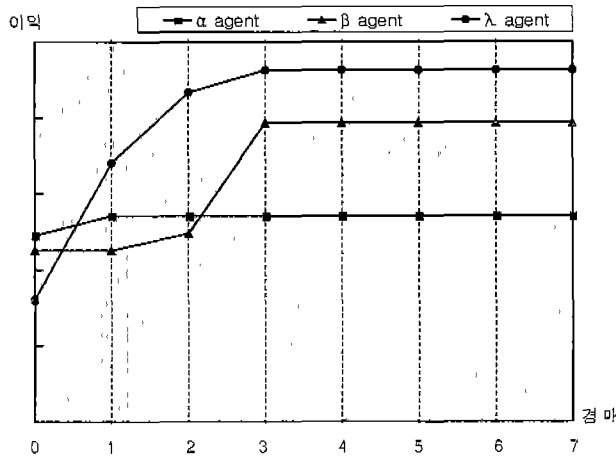
(그림 5), (그림 6), (그림 7)은 각각 ACF-BG-DE문제, CEG-AF-BD문제, BC-AEG-DF문제에 대한 실험결과로서 각 에이전트의 이익의 변화를 나타내고, (그림 8)은 이 세 문제에 대한 에이전트 전체 이익의 변화를 함께 보여준다. 각 그림에서 보듯이 ACF-BG-DE문제와 CEG-AF-BD문제의 경우에는 총 네 번의 연속된 경매를 통해, BC-AEG-DF문제의 경우에는 총 세 번의 연속된 경매를 통해 최적의 작업 할당에 도달할 수 있었음을 알 수 있다. 또 이 세 문제 모두 최적의 작업 할당에 이를 때까지 각 에이전트의 개인 이익과 에이전트들의 이익의 총합인 전체 이익이 모두 단조 증가하고 있음을 보여준다. 또한 매 단계마다 도시 교환이 이루어진 두 에이전트간에는 이익 증가 폭에 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있으며, 이것은 작업 재할당으로 인해 발생한 이익에 대해 두 에이전트간에 비교적 공평한 분배가 이루어졌다는 것을 의미한다.



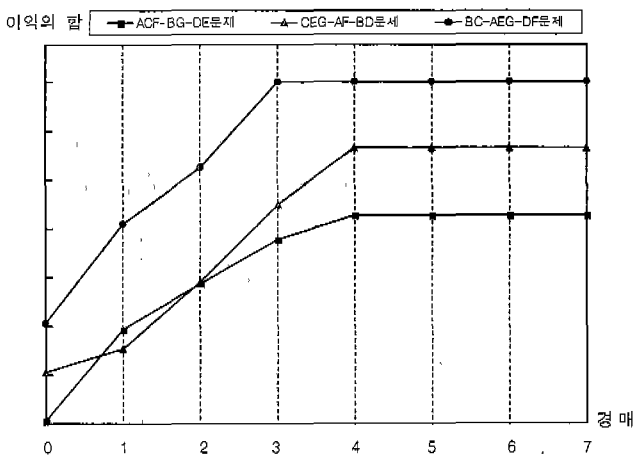
(그림 5) 각 에이전트의 이익 : ACF-BG-DE 문제



(그림 6) 각 에이전트의 이익 : CEG-AF-BD 문제



(그림 7) 각 에이전트의 이익 : BC-AEG-DF 문제



(그림 8) 에이전트 이익의 합

6. 결 론

본 논문에서는 대표적인 다중 에이전트시스템의 작업

재할당 문제의 하나로서 다중 에이전트 외판원 여행 문제를 소개하고, 이 문제를 풀기 위한 에이전트간 협상프로토콜로서 Vickrey 경매를 제안하였다. 이익-추구형 에이전트들간의 작업 재할당에 이와 같은 시장기반의 협상프로토콜을 적용하기 위해, 본 논문에서는 각 에이전트의 이익, 협상의 목표, 경매대상 작업, 각 에이전트의 입찰전략, 경매 진행순서 등을 정의하였다. 또한 다중 에이전트 외판원 여행 문제들에 대한 몇 가지 실험을 통해, 이 협상프로토콜에 따르면 매 단계마다 작업 할당이 단조 향상되며, 최종적으로 최적의 작업 할당에 수렴할 수 있다는 것을 보였다. 이러한 중요한 특성 외에도 본 논문에서 제안한 Vickrey 경매기반의 협상프로토콜은 구현이 용이하고, 각 에이전트들의 단 한번의 입찰로 바로 낙찰을 결정할 수 있어 효율이 매우 높고, 에이전트들이 충분한 영역지식을 갖지 못한 경우에도 합의를 보장할 수 있다는 장점을 가진다. 계획하고 있는 향후연구로는 다중 에이전트 외판원 여행 문제영역을 비롯한 다양한 다중 에이전트 작업 재할당 문제영역에서 실험을 통해 계약 망(contract net)과 같은 대표적인 다른 협상프로토콜들과 효율성을 비교 분석해보는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. J. Park, et al, "Emergent Properties of A Market-Based Digital Library with Strategic Agents," Proc. of ICMAS-98, 1998.
- [2] T. W. Sandholm, "An Implementation of The Contract Net Protocol based on Marginal Cost Calculations," Proc. of AAAI-93, 1993.
- [3] T. W. Sandholm, "Contract Types for Satisficing Task Allocation : I Theoretical Results," Proc. of AAAI Spring Symposium Series : Satisficing Models, pp. 68-75, 1998.
- [4] R. Schwartz and S. Kraus, "Negotiation on Data Allocation in Multi-agent Environments," Proc. of AAAI-97, 1997.
- [5] C. A. Waldspurger, et al, "Spawn : A Distributed Computational Economy," IEEE Transactions on Software Engineering, Feb. 1992.
- [6] W. E. Walsh and M. P. Wellman, "A Market Protocol for Decentralized Task Allocation," Proc. of ICMAS-98, pp.325-332, 1998.
- [7] G. Weiss, "Multiagent Systems : A Modern Approach to

Distributed Artificial Intelligence,” MIT Press, 1999.

- [8] P. R. Wurman, et al, “The Michigan Internet AuctionBot : A Configurable Auction Server for Human and Software Agents,” Proc. of the 2nd International Conference on Autonomous Agents, pp.301-308, 1998.
- [9] G. Zlotkin and J. S. Rosenschein, “Mechanism Design for Automated Negotiation and its Application to Task Oriented Domains, Artificial Intelligence,” Vol.86, No.2, pp.195-244, 1996.



김 인 철

e-mail : kic@kyonggi.ac.kr

1987년 서울대학교 대학원 전산과학과
(이학석사)

1995년 서울대학교 대학원 전산과학과
(이학박사)

1989년~1995년 경남대학교 전산통계학과
조교수

1996년~현재 경기대학교 정보과학부 전자계산학전공 부교수
관심분야 : 지능형 에이전트, 분산인공지능, 데이터마이닝