

지능형 에이전트 집단을 위한 조정 이론 생성에 관한 연구

김 은 경[†]

요 약

지능형 에이전트 집단(Intelligent Agent Societies : IAS)을 구축함에 있어서 예상되는 여러 작업 조건과 요구사항에 따라 조정을 설계, 구현하는 것은 매우 중요하며, 조정은 IAS의 효과적인 운영을 위해 필요한 여러 가지 메카니즘들로 구성된다. 하지만 현재 이러한 과정에 도움이 되는 이론적인 지원이 거의 없는 것이 현실이다. 본 연구에서는 효과적이고 실질적인 IAS를 설계하는데 도움이 되는, 실험에 근거한 조정 이론을 개발하는 것을 최종 목표로, 우선 모든 에이전트가 공통된 목표를 공유하면서 전적으로 협력하는 분산문제해결 시스템으로 범위를 설정하고, 조정 이론을 생성하기 위한 기초 분석자료를 제공해 줄 시뮬레이션 모델인 "P-System"을 개발하였다. P-System에서 에이전트들간의 조정은 TE(tweakable entity)라 칭한 23개의 제어 변수에 종속적이며, 조정의 수준은 본 연구의 정의에 따라 수치로 표현된 QMC (Quality Measure of Coordination)라 칭한 종속 변수로 표현된다. 특히 본 연구에서는 P-System의 엄청난 전체 실험공간으로부터 편중되지 않은 서브셋을 선택하는 방법과 적절한 서브셋의 규모를 결정하는 방안에 대해서 연구하였다.

A Study to Generate a Theory of Coordination for Intelligent Agent Societies

Eun Gyung Kim[†]

ABSTRACT

In building Intelligent Agent Societies (IAS), it is very important to design and implement coordination in accordance with the known requirements and anticipated working conditions. Coordination consists of a set of mechanisms necessary for the effective operation of IAS. Currently, there is little theoretical support that could help in this process. The final goal of this research is to generate an empirically-based theory of coordination to help in designing efficient and effective IAS. For this final aim, first of all we are concerned with distributed problem solving systems in which all agents share an identical goal structure and fully cooperate. And we developed a simulation model called "P-System" which produces basic data to be used for statistical analysis to generate a theory of coordination. Coordination among agents in the P-System is dependent on 23 control variables called TEs (tweakable entities). And the level of coordination is represented by an independent variable called QMC (Quality Measure of Coordination) expressed in numerical terms according to the definition of this study. Also, we have studied how to select unbiased subset from the huge total experimental space of the P-System and how to decide the scale of the subset.

키워드 : 조정 이론(coordination theory), 경험적 접근방법(empirical approach), 지능형 에이전트 집단(intelligent agent societies), 정성적 설계(qualitative designs), 정량적 실험(quantitative experiments)

1. 서 론

협조형 시스템(Cooperative System) 및 분산인공지능(DAI)에 관한 연구는 1980년대부터 여러 분야에서 자연스럽게 발생하였으며, 최근 엄청난 응용가능성 때문에 지능형 에이전트 집단(Intelligent Agent Societies : IAS)에 대한 관심이 더욱 고조되고 있다. 따라서 이제 IAS를 구성하는 에이전트 사이의 조정(coordination)을 위한 신뢰할 수 있는 이론적인 기초가 필요한 시점이라고 판단된다. IAS는 한 에이전트의 행위의 결과가 다른 에이전트들의 행위에 종속되는 지능형 에이전트들의 집합이라고 정의할 수 있다

[1-8]. 지금까지 이러한 IAS에서의 특수한 현상들을 묘사하는 다양한 구조(construct)에 많은 연구가 수행되었으나, 조정에 관한 통일된 모델이 없는 것이 현실이다. 이제 대규모 에이전트 기반 시스템의 출현이 임박함에 따라, 개발자들이 IAS를 설계할 때 사용할 수 있는 신뢰할 수 있는 조정 이론이 절실히 요구될 것으로 예상된다[9].

본 연구에서는 이러한 요구에 부응하여 실험에 기반을 둔 조정 이론(empirically based theory of coordination)을 생성하는 것을 최종 목표로, 우선 조정 이론을 생성하기 위한 기초 분석 자료를 제공해 줄 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 이를 위해서 우선 모든 에이전트가 공통된 목표를 공유하면서 전적으로 협력하는(fully cooperated) 분산문제해결(Distributed Problem Solving : DPS) 시스템에 초점을 맞추

[†] 종신회원 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 교수
논문접수 : 2001년 10월 23일, 심사완료 : 2002년 2월 2일

있다. IAS는 크게 DPS 시스템과 다중 에이전트(Multi-agent) 시스템으로 구분할 수 있는데, 후자는 각 에이전트들이 서로 다른 목표를 가질 수 있으며, 모든 에이전트들이 전체적으로 또는 부분적으로 서로 경쟁한다는 면에서 전자와 구분된다[1, 9].

생산 시스템(Production System)은 모든 에이전트가 주문된 모든 최종 생산품(Final Product : FP)을 생산한다는 공통된 목표를 갖고 상호 협력, 조정한다는 점에서 대표적인 DPS 시스템이라고 할 수 있다[7, 9]. 생산 시스템의 주된 특징은 모든 에이전트들이 주문된 양만큼의 최종 생산품을 생산하기 위해서 서로 협조함과 동시에 그들의 행위를 조정해야 한다는 것이다. 이 시스템에서 각 에이전트는 다른 타스크(Task)를 가지는 한편, 이들 타스크들이 서로 관련되어 있기 때문에 조정은 필수적인 요소가 된다. 따라서 이러한 생산 시스템에서 조정의 질(quality)은 매우 높을 것으로 예상되며, 이러한 특징을 갖는 생산 시스템의 시뮬레이션 모델을 이용하여 DPS 시스템에서의 조정과 관련된 여러 가지 실험을 수행하는 것은 매우 타당할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 우선 이러한 생산 시스템의 대표적인 시뮬레이션 모델인 P-System('P'는 'Production'의 약자)[7, 9]을 개발하고, 추후 조정 이론의 생성에 필요한 기초 분석자료를 획득하는데 필요한 기본 실험 환경을 설정하였다.

2. 조정과 조정 이론

조정이란 에이전트 행위들 간의 종속성(dependency)을 관리하는 과정으로, 다음과 같은 3가지 기초적인 요소들로 구성된다[6, 8-10] :

- 1) 에이전트의 할당 및 자원의 할당,
- 2) 중간 결과(intermediate results)의 통신,
- 3) 목표(goals), 능력(capabilities) 및 계획(planning)을 조정하고, 환경에 관한 정보나 일부 메타 레벨(meta-level) 정보를 제공하는 것을 목표로 하는 통신 활동.

따라서 조정 이론은 IAS에서 종속성 관리 모델을 생성하기 위해서 사용되는 원리들(axioms)과 구조(constructs) 및 분석 기법들(analytical techniques)의 집합으로 정의할 수 있다[9].

3. 실험에 근거한 경험적 접근방법(Experimental-Empirical Approach)

본 연구의 기본 가정은 IAS에서 종속성은 IAS 행위의 여러 다른 측면들 사이의 관련성(relationships)에 의해서 표현된다는 것이다. 따라서 조정 이론은 반드시 이들 관련성을 포함하는 개념들을 기초로 해야 한다. 더욱이 그 이론이 실질적이고 유용하기 위해서는 반드시 실험이나 관찰(observation)등에 의한 경험적인 결과들(empirical results)로부터 유도된 논리적이거나 수학적인 개념에 의해서 표현되어야

한다. 따라서 본 연구에서는 다른 대부분의 접근방법과는 달리 출현하는 현상들을 상향식(bottom-up)으로 분석하는 실험에 근거한 경험적 방법(Experimental-Empirical Method)[9, 11, 12]을 선택하였다.

본 연구의 궁극적인 목표인 실험에 기반을 둔 조정 이론을 생성하기 위해서 전체적인 연구는 다음과 같은 단계로 진행될 예정이다 :

- 1) IAS의 대표적인 시뮬레이션 모델 설계 ;
- 2) 개별적인 값 또는 공동 값(joint value)이 조정 과정에 영향을 미칠 것으로 예상되는 제어 가능한 모든 특성(본 연구에서는 "Tweakable Entity"라 칭함)들 선택 ;
- 3) 모든 제어 가능한 특성을 포함하는 시뮬레이션 시스템 구현 ;
- 4) 최적의 시뮬레이션 환경 설정
- 5) 특성들의 값을 미세하게 조정하면서 일련의 실험을 수행하여 통계 분석의 기초 데이터 획득 ;
- 6) 다양한 통계적인 분석을 통해 여러 특성들 사이의 관련성(correlation) 분석 ;
- 7) 분석 결과를 토대로 최종적으로 조정 이론 생성.

본 논문에서는 현재까지 수행된 위의 5단계까지의 연구 결과에 대해서 기술하였다.

4. P-System 개요

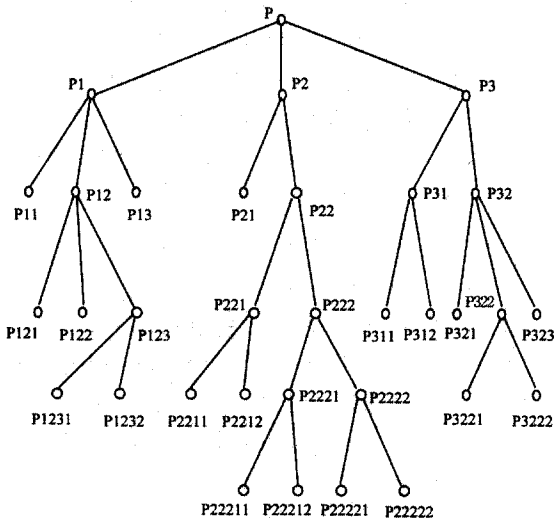
P-System은 공급 라인을 통해서 연결된 여러 에이전트들로 구성된 생산 시스템의 시뮬레이션 모델로서, 각 에이전트는 각각 다른 타스크를 수행하기 위해서 서로 다른 기능(skill)을 가지는 한편, 모든 최종 생산품을 생산한다는 공통된 목표를 달성하기 위해서 상호 협력하게 된다. 따라서 상호 협력하는 에이전트들 사이의 조정은 생산 업무의 효율성에 있어서 매우 결정적인 요인이 된다. 본 연구에서는 상호 협력하는 에이전트들 사이의 조정을 연구하는데 필요한 다양한 실험을 수행하기 위해 P-System을 사용하였다. 이러한 실험은 생산 시스템의 특성이 되는 여러 요소들의 값을 미세 조정하면서, 그 결과가 4.4절의 정의에 따라 수치로 표현된 조정의 수준에 어떤 영향을 미치는 지를 관찰함으로써 수행된다.

P-System의 원래 제조 공정 작업의 분산 제어를 위해 설계된 추상적인(abstract) 시스템으로[7], 초기 버전은 일부 제어 변수와 매우 제한적인 기능만을 포함하고 있으므로 본 연구의 최종 목표인 실험에 기반을 둔 조정 이론을 생성하기 위한 기초 분석데이터를 획득하기에는 충분하지 않다. 따라서 본 연구에서는 IAS의 대표적인 시뮬레이션 모델로서 P-System을 활용하기 위해서, 기존 P-System을 크게 수정, 확장하였다. 우선, 조정 과정에 영향을 미칠 것으로 예상되는 모든 제어변수들을 포함시키고, 실험 과정에서 이들을 미세하게 조정함으로써 후후의 분석 자료를 획득할 수

있도록 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 특히, 제어 변수의 증가로 인해 기하급수적으로 증가하게 되는 전체 실험 공간(experimental space)으로부터 실험결과가 편중되지 않은 서브셋(unbiased subset)을 획득할 수 있는 방안을 구현하고, 서브셋의 규모를 결정하는 방법에 대해서 연구하였다.

4.1 P-System의 특성

- 1) 에이전트들 간에 타스크나 자원 할당 등을 위한 통신은 비동기적이며, 전체에게 전달되거나(broadcast) 개인 에이전트 또는 특정 에이전트 그룹에 전달될 수 있다.
- 2) 한 생산품의 제조 공정 순서는 'P-tree'라고 칭한 계층 구조의 생산 트리(hierarchical production tree)[7, 9]로 정의되며, 이는 각 에이전트들이 반드시 따라야 하는 문제해결 계획에 해당한다. (그림 1)은 시뮬레이션을 위한 생산품 P의 제조 과정을 나타내는 P-tree이다. P-tree는 AND-tree로서, 각 노드는 조립(Assembly) 노드이며, 단말 노드들은 기초 재료(raw material)를 사용하고, 나머지 노드들을 대개 조립된 부품(subcomponent)을 요구하게 된다. (그림 1)은 13개의 부품과 14개 조립 노드, 19개의 기초 재료를 포함하고 있다.



(그림 1) 최종 생산품 P의 P-tree 구조

- 3) 계획은 시공간에 걸쳐서 생산/조립 작업에 자원을 할당하는 것과 같다.
- 4) 자원은 공유이며, 주어진 타스크에 따라 에이전트에게 할당된다. 또한, 더 높은 우선순위를 갖는 타스크가 할당된 에이전트가 보다 낮은 우선순위를 갖는 타스크가 할당된 에이전트에게 할당된 자원을 임시로 빌릴 수 있다. 더 낮은 우선순위의 타스크가 할당된 에이전트는 덜 만족스러운(비싸거나 느린) 자원을 갖고 실행하거나, 빌려준 자원이 반환되거나 대체될 때까지 기다려야 한다.
- 5) 자원은 다음과 같이 3개 계층으로 분류된다.
 - ① 자원 카테고리(Category) : 한 카테고리 안에 있는

모든 항목은 하나 이상의 타스크를 위해서 사용된다.

- ② 자원 타입(Type) : 한 자원 카테고리는 하나 이상의 자원 타입을 포함하며, 각 타입은 서로 다른 시간과 비용을 요구한다.
 - ③ 자원 인스턴스(Instance) : 실제 타스크에 할당되는 것으로, 각 자원 타입 안에는 하나 이상의 자원 인스턴스가 존재한다.
- 6) 타스크와 에이전트도 자원과 마찬가지로 3개 계층으로 분류된다.
 - 7) 자원의 유용성은 다음과 같이 4가지로 구분된다.
 - ① 실행불가능(infeasible) : 필수적인 자원의 부족으로 생산과정이 제기능을 못 하는 상태.
 - ② 불충분(deficient) : 어떤 자원이 적절한 순간(전송 비용과 부품 저장소 비용이 균형을 이루는) 에이전트 사이에 전달될 때만 생산 과정이 기능을 할 수 있는 상태.
 - ③ 드문(scarce) : 일부 타스크에 차선의(suboptimal) 자원타입이 할당된 상태.
 - ④ 풍부한(abundant) : 모든 타스크에 최적의(optimum) 자원타입이 할당된 상태.
 - 8) 자원 할당은 자원의 상태와 사용자가 설정한 생산전략(비용 최소화 또는 시간 최소화)에 따라 전체적인 최적화(global optimization)를 고려하여 이루어진다.

4.2 Tweakable Entity

P-System에서 에이전트들간의 조정은 에이전트의 수와 자원의 수, 수행해야 하는 타스크의 수 및 P-Tree의 구조 등과 같은 여러 가지 특성(property)에 종속적이다. 결국 이들 특성이 생산 시스템을 정의하는 것으로, 본 연구에서는 다음과 같이 조정과 관련된 23개의 제어 변수(control variable)들을 식별하였으며, 이를 "Tweakable Entity(TE)"라 칭하였다[9].

- 1) 에이전트(Agent) 관련
 - 에이전트 카테고리의 수
 - 각 카테고리에 속하는 에이전트 타입의 수
 - 각 에이전트 타입의 인스턴스 수
- 2) 타스크(Task) 관련
 - 타스크 카테고리의 수
 - 각 카테고리에 포함된 타스크 타입의 수
 - 각 타스크 당 필요한 자원의 수
- 3) 자원(Resource) 관련
 - 자원 카테고리의 수
 - 각 카테고리에 속하는 자원 타입의 수
 - 각 타입에 속하는 자원 인스턴스의 수
 - 한 타스크를 완성하기 위해 자원을 사용하는 비용
 - 한 타스크를 완성하기 위해 자원을 사용하는 시간
 - 에이전트 사이의 자원 전송 시간
 - 에이전트 사이의 자원 전송 비용
- 4) 기능(Skill) 관련

- 에이전트 기능(타스크, 자원, 통신 등과 관련된)의 총 수
- 5) 재고(Inventory) 관련
- 단위 시간당, 구성요소(component)당 저장 비용
 - 두 자원 전송 사이에 발생하는 구성요소 배치 사이즈(Component Batch Size)
- 6) 생산(Production) 관련
- 생산될 최종 생산 항목의 수
 - 생산 시간을 최소화했을 때 최종 생산품의 최대 총 생산 비용
 - 생산 비용을 최소화했을 때 최종 생산품의 최대 총 생산 시간
 - P-tree에서 레벨(level)의 수
 - P-tree의 평균 Branching Factor
- 7) 사건(Event) 관련
- 에이전트들에 대한 타스크 할당 모드(Preplanned 혹은 Reactive)
 - 에이전트들에 대한 자원 할당 모드(Preplanned 혹은 Reactive)

위의 사건 관련 TE를 제외한 나머지 TE들은 모두 정량적(quantitative) 성질을 갖고 있으며, P-System에서는 이들 TE들의 값을 미세하게 조정하면서 여러 가지 실험을 수행하기 위해서, 정량적 TE 값의 전체 범위를 5개의 정성적(qualitative) subrange(very low, low, medium, high, very high)로 구분하고, 이를 0~4로 표현하였다.

4.3 P-System의 구성

P-System은 서로 다른 기능을 갖고 상호 협력하는 에이전트들로 구성되며, 각 에이전트는 에이전트 타입이라 칭한 프로토타입(prototype)으로 정의된다. 각 에이전트 타입은 여러 특성들로 정의되고, 하나 이상의 인스턴스가 한 타입에 속할 수 있다.

4.3.1 타스크 할당 에이전트

최종 생산품이 주문되면 P-System에서는 먼저 타스크 할당 에이전트가 각 조립 에이전트에 타스크 할당을 시도하며, 현재 각 에이전트마다 하나씩의 타스크가 할당된다고 가정하였다. 한편, 각 타스크는 할당된 에이전트, 할당된 자원, 현재의 상태(Waiting, Ready, Working, Running, Finished), 완성 유무 등과 같은 특성을 갖는다.

4.3.2 타스크 에이전트

각 타스크 에이전트에 할당되는 타스크는 특정 부품을 조립하는 것으로, 조립(Assembly) 에이전트라고도 칭할 수 있다. 일단 타스크가 할당되면, 할당된 타스크의 완성에 필요한 자원을 요구하는 메시지를 자원 할당 에이전트에게 보내게 되고, 요구한 자원이 할당되면 바로 부품 조립을 시작하게 된다. 또한 하나의 부품이 완성되면, 곧바로 다음

부품의 조립을 시작한다. 즉, 주문된 모든 최종 생산품이 완성될 때까지 자원을 요구하고 부품을 조립하는 과정을 반복하게 된다. 이러한 과정은 실제 생산 공장에 있는 조립 라인과 유사한 것이다. 즉, 각 직공은 하나의 부품 조립이 끝나면 다른 직공들의 업무 진행 속도와 상관없이 곧바로 다음 부품 조립을 시작한다. 물론 부품 조립에 필요한 재료나 다른 부품이 부족한 경우, 부품이 조달될 때까지 기다려야 한다. 각 타스크 에이전트는 현재의 유용성(availability), 할당된 타스크, 할당된 자원, 현재의 상태(Available, Allocated, Working) 등과 같은 특성을 갖게 된다.

4.3.3 자원 할당 에이전트

P-System에서 모든 자원은 특정 타스크 에이전트의 관할 하에 있지 않고 공용이므로 자원의 할당 및 관리를 담당하는 에이전트가 필요하다. 자원 할당 에이전트는 타스크 에이전트로부터 특정한 자원을 요구하는 메시지를 받으면, 적절한 자원을 검색하여 할당한 다음, 메시지 에이전트에게 메시지를 전달하게 된다. 만약 최적의 자원이 유용하지 않으면, 다른 자원으로 대체하거나 이미 할당된 에이전트에서 반납되기를 기다리게 된다. 또한, 모든 타스크에 자원을 할당한 다음, 설정된 생산 전략(시간 최소화 혹은 비용 최소화)에 따라 최종적으로 전역적(global) 최적화 단계를 거치게 된다. P-System에서 자원 할당 에이전트는 자원 카테고리 당 하나씩 생성하거나, 자원 타입 당 하나씩 생성할 수 있으며, 각 자원의 할당 상태는 Available, Allocated, In-Transit 등으로 구분된다. 한편, 각 자원의 유용성은 I(Infeasible), D(Deficient), S(Scarce), A(Abundant)로 구분되며, I의 경우 타스크를 완성할 수 없게 된다.

4.3.4 메시지 에이전트

이 에이전트는 타스크 에이전트들 사이나 자원 할당 에이전트들, 또는 타스크 및 자원 할당 에이전트 사이에 주고받는 메시지를 수집하는 역할을 한다. 즉, 모든 개별적인 메시지를 수집하여 메시지 관리자 에이전트에게 전달한다.

4.3.5 메시지 관리자 에이전트

이 에이전트는 메시지 에이전트가 전달한 메시지를 관리하는 중앙집중화된(centralized) 에이전트이다. P-System은 메시지 전달을 기본으로 직·간접적으로 조정을 하게 되므로, 에이전트들 사이에 주고받는 메시지는 조정과 관련된 다양한 정보를 포함하게 된다. 즉, 다른 종류의 메시지는 다른 종류의 조정과 관련되며, 각 메시지의 빈도는 조정과 관련된 중요한 정보를 제공하게 된다. 따라서 이러한 메시지 전달 과정을 모니터링하고 관리할 에이전트가 필요하며, 이는 에이전트들 사이의 메시지 전달을 모니터링함으로써 추후 고장점점(trouble-shooting)[9] 도구를 구현하는데 필수 요소가 된다.

4.4 QMC

본 연구에서는 21개 정량적 제어 변수들이 조정에 어떤

영향을 미치는 지를 관찰하기 위해서, 동기화(synchronization)와 공급 균형(supply balancing) 개념에 기초를 둔, QMC(Quality Measure of Coordination)라 칭한 조정의 수준을 다음과 같이 정의하였다.

$$QMC = [\sum_i l_i \sum_j (t_{ij} / t_i)] / \sum_j l_j$$

- l_j : P-tree의 레벨 l에서 왼쪽부터 j번째 프로세스 노드
- t_{ij} : 노드 l_j 에서 조립/생산하는데 필요한 최적의 시간
- t_{ij} : 노드 l_j 에서 지역적 및 전역적 최적화 후에 사용된 실제 시간

위 식의 분자에 있는 weighting factor, l은 해로운 계단식 영향력(cascading effect)을 표현하기 위해서 도입하였다. 즉, 어떤 노드에서의 불충분한 동기화와 공급 불균형은 문제 노드의 상위 레벨에서의 조정에 나쁜 영향을 미치게 되며, 이는 노드 레벨이 낮을수록 더욱 심각하다. 분모는 QMC를 0부터 1 사이 값으로 정규화시킨다.

QMC는 P-System에서 얼마나 조정이 잘 이루어졌는지를 표현하는 것으로, 만약 모든 부품들이 모든 노드에 적절한 순간에 정확히 도착하면 최적의 조정이 가능하며, QMC는 최고값 1을 갖게 된다. 또한, 총 생산 시간이나 비용도 최소화될 것이다. 만약 부품이 일찍 도착하면 부가적인 저장 비용(storage cost)이 발생하므로 QMC는 감소하며, 늦게 도착한 경우 전체 생산 과정을 지연시키므로 역시 QMC는 감소하게 된다. 결과적으로 QMC는 연속적인 생산 과정동안 조정이 얼마나 잘 이루어졌는지를 표시하게 된다.

4.5 Experimental Design Generator 모듈

실험용 설계 생성자(Experimental Design Generator : EDG) 모듈은 P-System의 핵심 부분으로, 4.2절에 나열한 21개 정량적 TE와 QMC, 총생산 시간, 총생산 비용 등의 종속 변수 사이의 관련성을 분석할 수 있는 기초자료를 생성하기 위한 일련의 실험을 생성한다. 즉, EDG 모듈은 이들 21개 TE의 값을 각 TE가 가질 수 있는 전체 값의 범위 안에서 계속 변화시키면서, 그때마다 QMC와 총생산 시간 및 비용을 계산하는 일련의 실험을 수행하게 된다. EDG 모듈을 실행하기 위해서 사용자는 우선 각 TE 값의 정량적인 범위를 설정해야 하며, 이 값은 4.2절에서 언급한 5개의 정성적 subrange 값으로 매핑되어야 하므로 반드시 5로 나누어져야 한다. 예를 들면, “에이전트 카테고리 수”라는 TE의 정량적 값의 범위를 1부터 10으로 설정하면, very low는 1-2, low는 3-4, ..., very high는 9-10으로 각각 매핑된다. 현재 P-System은 이들 21개 TE의 정량적 값의 범위 등에 대한 디폴트 값을 설정한 디폴트 DB를 제공하고 있다.

EDG 모듈이 수행하는 실험은 다음과 같이 크게 두개 계층으로 구성되어 있다 :

- 1) 첫 단계에서는 각 TE의 값을 정성적 subrange 안에서 변화시킴으로써 일련의 정성적 설계(qualitative designs)

를 생성한다. 21개 TE 각각이 5개의 정성적 subrange를 가지므로, 전체 가능한 실험 공간(experimental space)은 5²¹이 된다. 즉, 5²¹개의 정성적 설계를 생성할 수 있다. 정성적 설계의 예를 들면 다음과 같다 : 110243420410430014342. 즉, 첫 번째와 두 번째 TE는 low, 세 번째 TE는 very low, 네 번째 TE는 medium 등으로 설계된 것을 나타낸다.

- 2) 다음 단계에서는 첫 단계에서 생성한 각각의 정성적 설계에 대해서, 각 TE의 subrange에 해당하는 정량적 값의 범위 안에서 무작위로 선택된 정량적 값을 각 TE에 할당함으로써 정량적 실험(quantitative experiment)을 수행한다. 만약 각 정성적 설계에 대해서 50개의 정량적 실험을 수행한다면 전체 실험 횟수는 50 * (5²¹)에 달하게 되며, 각 실험에 대해서 QMC와 총생산 시간 및 비용을 계산하게 된다. 위에서 예로든 정성적 설계에 대해 수행된 5개의 정량적 실험결과를 보면 다음과 같다 :

- 실험1 : 10 3 1 3 5 4 5 3 1 9 10 1 175 735 135 1 2 5 4 5 27 0.57 345 3615 S
- 실험2 : 10 3 1 3 5 4 5 3 1 9 10 1 195 795 195 1 2 5 4 5 24 0.63 398 3921 D
- 실험3 : 9 4 1 3 5 4 5 3 1 10 9 2 164 684 84 1 2 5 4 5 23 0.71 345 5906 D
- 실험4 : 9 4 1 3 5 4 5 3 1 10 9 2 164 644 44 1 2 5 4 5 20 0.82 451 9932 D
- 실험5 : 9 3 1 3 5 4 5 3 1 9 9 1 199 679 79 1 2 5 4 5 27 0.57 345 3615 S

첫 번째 실험의 경우, 첫 번째 TE의 정량적 값으로 10이 선택되었으며, 두 번째 TE의 경우 3이 선택되었고, 마지막 TE는 27이 선택되었다. 이러한 정량적 값은 각 TE에 설정된 정량적 값의 범위 안에서 정성적 subrange에 대응하는 값 가운데 임의로 선택된 것이다. 즉, 첫 번째 TE의 경우 정량적 값의 범위가 1~25로 설정되어 있으므로 정성적 sub-range ‘low’에 해당하는 6~10 사이 값 가운데 10이 임의로 선택된 것이다. 21개 TE의 정량적 값 이외에 각 실험 결과 마지막에 포함된 4개 값은 각각 실험에서 계산된 QMC, 총생산 시간, 총생산 비용 및 자원 상태를 나타내는 값이다.

5. 무작위 샘플링에 의한 서브셋 선택

시스템에 포함된 요소(factor)의 수가 증가할수록 그 요소들의 가능한 조합(combination)의 수는 빠르게 증가하게 되며, 결과적으로 매우 큰 실험 공간을 받게된다. 하지만, 때론 전체 실험의 일부분만을 수행하고도 동일한 기본 정보를 얻을 수 있다. P-System의 전체 실험 공간 역시 TE의 수가 21개에 달함에 따라 매우 크게 되며, 전체 실험 공간을 실행하기에는 엄청난 실행 시간을 요구하게 된다. 따라서 전체 실험 공간의 한 서브셋만을 수행할 필요가 있다.

하지만 추후의 통계적 분석 결과가 타당성을 갖기 위해서는 적절한 규모의 편중되지 않은 서브셋(unbiased subset)을 선택할 수 있어야 한다. 전체 실험 공간에서 서브셋을 선택하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 Fractional Factorial Design (FFD)[4,9]을 기반으로 하는 체계적 샘플링(systematical sampling) 방법이고, 다른 하나는 무작위 샘플링(randomized Sampling) 방법이다. 본 연구에서는 편중되지 않은 서브셋을 선택하기 위해서 이 두 가지 방법을 각각 구현하고, 이를 기초로 각각 획득된 서브셋을 비교, 분석하였다. 그 결과, 체계적 샘플링 방법을 통해서 선택된 서브셋의 경우 전체 실험 공간을 아주 작은 수의 블록으로 나누지 않는 이상 그 내용이 편중되어 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 서브셋에 포함된 많은 TE들이 항상 동일한 값을 유지하므로, 추후 이를 기초로 수행한 통계적 분석결과의 신뢰도를 크게 떨어뜨리게 된다. 한편, 무작위 샘플링을 통해서 획득된 서브셋의 경우, 모든 TE 값이 비교적 고르게 변화함을 확인할 수 있었다.

무작위 샘플링 방법을 통해서 전체 실험 공간을 줄이기 위해서 본 연구에서는 다음과 같은 단계로 수행하였다.

- 1) 무작위 수 n_i 를 생성한다. 여기서, $1 \leq n_i \leq N(i = 1, 2, \dots, n_d)$, N 은 전체 정성적 설계의 수(5^{21}), n_d 는 무작위로 선택될 정성적 설계의 수이다.
- 2) 무작위 수 n_i 를 오진수로 변경하여 하나의 정성적 설계를 생성한다.
- 3) $i = n_d$ 일 때까지 위의 단계를 반복한다.

예를 들어, 무작위로 선택된 수가 246574171739364이면, 이를 오진수로 변경하면 224304332400431124423₅이 되고, 이를 이용하여 생성된 정성적 설계는 다음과 같다: 2 2 4 3 0 4 3 3 2 4 0 0 4 3 1 1 2 4 4 2 3. 무작위 수의 획득 범위가 1부터 5^{21} 사이이므로 샘플의 수가 아주 크지 않은 이상 동일한 샘플이 획득될 확률은 매우 낮다. 따라서 최종적으로 본 연구에서는 무작위 샘플링 방법을 통해서 전체 실험 공간의 서브셋을 선택하도록 결정하였다.

6. 서브셋의 규모 결정

P-System의 전체 실험 시간을 좌우하게 되는 서브셋의 규모는 생성할 정성적 설계의 수와 각각의 정성적 설계에 대해서 수행할 정량적 실험의 횟수에 좌우된다. 예를 들어, 5^{21} 개의 전체 정성적 설계 가운데 5^{15} 개를 생성하고, 각 설계에 대해서 50개씩의 정량적 실험을 수행하는 경우, 서브셋의 규모는 $(5^{15}) * 50$ 이 된다. 너무 적은 설계를 선택하는 경우 실험 결과가 편중되어 추후 분석 결과의 신뢰도가 떨어지게 되고, 너무 많은 설계를 선택하는 경우 실험 시간이 지나치게 길어질 우려가 있다. 서브셋은 21개 TE, 즉 제어 변수와 QMC라는 종속 변수로 표현된 조정간의 관련성을 분석하기 위한 기초 자료에 해당하므로, QMC 값의 분산(variance)은 자료의

편중 여부를 판단할 수 있는 주요 기준이 된다. 원래 분산이나 표준 편차(standard deviation)는 모집단의 분산 또는 집중화 정도를 측정하는 수단이다. 하지만 분산은 상대적인 개념으로, 어떤 분산이나 표준 편차 자체가 큰지 작은지를 평가할 수 있는 절대적인 기준이 없다. 따라서 어떤 분산이 다른 분산에 비해 상대적으로 크다면, 그 모집단의 분산 정도는 상대적으로 크다고 볼 수 있다. P-System에서 QMC 값의 전체 분산은 세가지 요소에 종속되며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V(QMC) = V(QE) + V(QD) + \text{random component}$$

- 1) $V(QE)$: 동일한 정성적 설계에 속하는 다른 정량적 실험들의 QMC의 분산
- 2) $V(QD)$: 다른 정성적 설계의 평균 QMC의 분산
- 3) random component : 기타 무작위 요인

위의 식은 수학적인 동식 관계를 표현하는 것은 아니며, 분산 요인들간의 종속성을 간단히 표현한 것이다. 본 연구에서는 두 가지 주요 분산만을 고려하였으며, 이 두 분산의 비율(ratio)과 전체 실행가능한 시간을 고려하여 서브셋의 규모를 선택하고자 하였다. 즉, $V(QD)$ 가 상대적으로 크다면, 모든 가능한 정성적 설계 가운데서 더 많은 샘플을 선택하는 것이 바람직하며, $V(QE)$ 가 상대적으로 크다면, 각 정성적 설계에 대해 수행할 정량적 실험을 위해 더 많은 시간을 할당하는 것이 바람직하다. 예를 들어, <표 1>과 같이 5개의 정성적 설계와 각 정성적 설계 당 3개의 정량적 실험을 수행한 경우, $V(QE)$ 와 $V(QD)$ 및 두 분산의 비율은 다음과 같이 계산된다:

$$V(QE) = \text{Avg}(\text{Var}(Q_{ij}), i \leq 5, j \leq 3)$$

$$V(QD) = \text{Var}(\text{Avg}(Q_{ij}), i \leq 5, j \leq 3)$$

$$r = V(QD) / V(QE)$$

<표 1> 처리시간 분할 방법에 대한 설명

정성적 설계	각 정량적 실험의 QMC	QMC의 평균 ($1 \leq i \leq 3$)	QMC의 분산 ($1 \leq i \leq 3$)
1	Q_{11}, Q_{12}, Q_{13}	$\text{Avg}(Q_{1i})$	$\text{Var}(Q_{1i})$
2	Q_{21}, Q_{22}, Q_{23}	$\text{Avg}(Q_{2i})$	$\text{Var}(Q_{2i})$
3	Q_{31}, Q_{32}, Q_{33}	$\text{Avg}(Q_{3i})$	$\text{Var}(Q_{3i})$
4	Q_{41}, Q_{42}, Q_{43}	$\text{Avg}(Q_{4i})$	$\text{Var}(Q_{4i})$
5	Q_{51}, Q_{52}, Q_{53}	$\text{Avg}(Q_{5i})$	$\text{Var}(Q_{5i})$

서브셋의 규모를 결정하기 위한 기초 자료로서 정확한 r 값을 계산하기 위해서는 우선 동일한 정성적 설계에 대해 수행된 동일한 정량적 실험을 기초로 $V(QE)$ 와 $V(QD)$ 가 계산되어야 한다. 또한, 각 정성적 설계에 대해 실행하는 정량적 실험의 수가 미치는 영향을 고려해야 한다. 이를 위해 우선 동일한 정성적 설계를 기초로 정량적 실험의 회수만을 변경시키면서 실험할 수 있어야 하는데, 본 논문에서는 EQE (Effect of the number of Quant. Exp. per qual. design)라는 별도의 모듈을 구현하였다. EQE 모듈은 이미 생성된 정성적 설계를 재사용하여 정량적 실험의 회수만을 변경시키면서 실험한 결과를 생성한다. 본 논문에서는 한 정성적 설

계에 대해서 수행할 정량적 실험의 수가 각각 5, 10, 15, ..., 30인 경우에 대해서 EQE 모듈을 실행시켰으며, 이 실험 결과 가운데 각각 동일한 정성적 설계를 기초로 하는 100개씩의 케이스(정량적 실험의 집합)를 임의로 선택하여 <표 2>와 같이 각각의 V(QE)와 V(QD)를 계산하고, 그들의 평균치를 이용하여 두 분산의 비율 r을 계산하였다.

$$r = V(QD) / V(QE) = 2.507E-02 / 4.202E-04 \approx 60$$

<표 2> 정성적 설계 당 수행한 정량적 실험의 수에 따른 V(QE)와 V(QD)

n _e	Var(QMC) Avg(QMC)					V(QE)	V(QD)
	QD1	QD2	QD3	...	QD100		
5	1.8E-04 (0.84)	3.0E-05 (0.84)	1.8E-04 (0.84)	...	2.3E-03 (0.86)	5.38E-04	9.20E-03
10	1.07E-04 (0.84)	2.78E-05 (0.84)	1.07E-04 (0.84)	...	6.68E-04 (0.83)	1.82E-04	1.10E-02
15	9.2E-05 (0.85)	2.67E-05 (0.84)	1.46E-04 (0.84)	...	2.39E-03 (0.87)	6.97E-04	1.214E-02
20	1.46E-04 (0.84)	2.53E-05 (0.83)	1.21E-04 (0.85)	...	2.14E-03 (0.85)	3.064E-04	1.20E-02
25	1.11E-04 (0.84)	2.57E-05 (0.83)	1.11E-04 (0.84)	...	2.17E-03 (0.85)	4.836E-04	1.225E-02
30	1.28E-04 (0.84)	2.58E-05 (0.83)	1.28E-04 (0.84)	...	1.29E-03 (0.85)	3.144E-04	1.106E-02
Avg	1.27E-04 (0.84)	2.69E-05 (0.825)	1.32E-04 (0.84)	...	1.83E-04 (0.85)	4.202E-04	2.507E-02

<표 2>에서 알 수 있듯이 V(QD)가 상대적으로 크므로 보다 많은 정성적 설계를 생성하는데 더 많은 시간을 할당하는 것이 바람직하다. 한편, 정성적 설계의 수(Number of Qual. Design : NQD)는 실험의 범위(scope)를 넓히는 반면, 각 정성적 설계에 대해서 수행할 정량적 실험의 수(Number of Quant. Exp. : NQE)는 추후 생성할 조정 이론의 신뢰도와 관련되므로, 이 두 샘플의 크기가 적절한 균형을 이루는 것이 중요하다. 하지만 위와 같은 분석 결과를 토대로 주어진 실행 시간 안에 생성할 두 샘플의 크기를 결정할 수 있는 방법은 통계학 분야에서도 그 해답을 찾을 수 없는 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 두 분산의 비율 r을 이용하여 전체 실행 시간을 기준으로 다음과 같이 NQD와 NQE를 분할하는 방법을 채택하였다. 전체 실행 시간을 T, 한 정량적 실험을 수행하는데 필요한 실행 시간을 t, NQD를 n이라고 하면, 각 정성적 설계에 대해서 수행할 NQE와 T안에 획득되는 전체 NQE는 다음과 같다.

$$NQE \text{ per QD} = n / 60$$

$$Total \ NQE = n * (n/60)$$

t는 clock speed 500MHz PC 상에서 약 0.3초인 것으로 확인되었으며, 따라서 T와 n은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = (n^2) / 60 * t$$

$$n = \text{SQR}(T * 60) / \text{SQR}(t)$$

만약 T를 3일(259,200초)로 설정한 경우, NQD와 NQE는

다음과 같다.

$$259200 = (n^2) / 60 * 0.3$$

$$n = \text{SQR}(259200 * 60 / 0.3) \approx 7200$$

$$NQD \approx 7,200, \ NQE \approx 7200/60 = 120$$

$$Total \ NQE = 7200 * 120 = 864,000$$

한편, QE의 성공적인 수행률은 평균 66%이다. 즉, 100개 QE 가운데 평균 34개가 자원의 상태가 실행불가능(infeasible)이기 때문에 실패하였다. 따라서, P-System을 3일 동안 실행하여 약 864,000개의 성공적인 QE를 획득하기 위해서는 1,309,133(≈ 864,000 * 100/66)개의 QE를 실행해야 하고, 1,309,133개의 QE를 얻기 위해서는 10,910(≈ 1,309,133 / 120)개의 QD를 생성해야 한다.

7. 통계적 분석의 간단한 예

P-System을 이용한 실험 결과를 다음 연구 단계에서 어떻게 활용할 것인지 보이기 위해, 각 TE와 QMC와의 통계적 상관관계(correlation)를 분석하였다. 이를 위해 우선 최종 생산품 P의 주문 수량을 '4'로 하고, 각 정성적 설계에 대해 120회의 정량적 실험을 수행하며, 전체 약 11,000개의 정성적 설계를 생성하는 조건하에서 P-System을 수행하였다. 그 결과, 860,282개의 성공적인 정량적 실험 결과를 얻을 수 있었으며, 전체 수행 시간은 clock speed 500MHz인 PC 상에서 약 4일 정도 소요되었다. 여기서 '성공적'의 의미는 자원이 할당되어 최종 생산품이 모두 생산되었음을 의미한다. 다음으로, 정량적 TE 가운데 하나인 "자원 카테고리 당 자원 타입의 수(RESTYPE)"와 QMC의 통계적 상관관계를 SPSS[14]를 이용하여 분석한 결과, <표 3>과 같이 0.01 수준에서 양의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 물론 이러한 분석은 앞으로 수행하게 될 가장 초보적인 수준의 통계 분석의 예이며, 다음 연구 단계에서는 1:1의 상관관계 분석 뿐만 아니라 주요 요인 분석(principle component analysis)과 다중 회귀분석(multiple regression analysis)[15] 등과 같은 고차원의 통계분석이 요구된다.

<표 3> 한 TE(RESTYPE)와 QMC의 상관관계 분석 결과

Correlations			
		RESTYPE	QMC
RESTYPE	Pearson Correlation	1.000	.507**
	Sig. (2-tailed)	.	.004
	N	30	30
QMC	Pearson Correlation	.507**	1.000
	Sig. (2-tailed)	.004	.
	N	30	30

** Correlation is significant at th 0.01 level

8. 결 론

본 연구에서는 효과적이고 실질적인 지능형 에이전트 집단

(IAS)의 설계를 지원할 수 있는, 실험에 기반을 둔 조정 이론을 생성하는 것을 최종 목표로, 우선 모든 에이전트가 공통된 목표를 공유하면서 전적으로 협력하는 분산 문제해결(DPS) 시스템에 초점을 맞추고, 조정 이론을 생성하기 위한 기초 분석 자료를 제공해 줄 시뮬레이션 모델인 P-System을 개발하였다. 한편, 생산 시스템은 모든 에이전트가 주문된 모든 최종 생산품을 생산한다는 공통된 목표를 갖고 상호 협력, 조정한다는 점에서 대표적인 DPS 시스템이라고 할 수 있다. 이 시스템에서 모든 에이전트들은 주문된 모든 생산품을 생산하기 위해서 서로 협조함과 동시에, 각 에이전트에 할당된 TASK들이 서로 관련되어 있기 때문에 조정은 필수적인 요소가 된다. 따라서 이러한 생산 시스템에서 조정의 질은 매우 높을 것으로 예상되며, 이러한 특징을 갖는 생산 시스템의 시뮬레이션 모델을 이용하여 IAS의 조정과 관련된 여러 가지 실험을 수행하는 것은 매우 타당할 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 특히 P-System의 엄청난 전체 실험공간으로부터 편중되지 않은 서브셋을 선택하기 위해서, 체계적인 샘플링 방법과 무작위 샘플링 방법을 비교, 분석하였다. 그 결과 무작위 샘플링 방법에 의해 획득된 서브셋이 편중되지 않음을 확인하고, 이를 기반으로 서브셋을 획득하도록 구현하였다. 한편, 서브셋의 규모는 정성적 설계의 수와 각 정성적 설계에 대해서 수행될 정량적 실험의 수에 의해서 결정되는데, 주어진 실험 시간 안에 획득할 정성적 설계의 수와 각 정성적 설계에 대해 수행할 정량적 실험의 수를 결정하는 것은 추후 통계적 분석 결과의 신뢰도와 직접 관련됨으로 매우 중요한 이슈이다. 본 연구에서는 동일한 정성적 설계에 속하는 다른 정량적 실험들의 QMC의 분산과 다른 정성적 설계의 평균 QMC의 분산의 비율을 기초로, 주어진 실험 시간 안에 수행할 정성적 설계의 수와 정량적 실험의 수를 결정하였다. 다음으로, 이러한 조건하에서 약 4일 동안 P-System을 실행하여 획득한 실험 결과를 토대로, 본 연구의 접근 방법을 보이기 위해 SPSS를 이용하여 21개 제어 변수와 QMC 간의 1:1의 상관관계를 분석하였다. 앞으로 여러 가지 고차원적인 통계 분석을 거쳐 21개 제어 변수와 QMC와의 상관관계를 분석하고, 주요 요소 분석 및 다중 회귀분석 등을 통해 21개 제어 변수의 상위 요소를 발견하고 해석할 계획이다. 그리고 이러한 단계를 거쳐 본 연구에서 최종적으로 생성하게 될 조정 이론은 새로운 IAS의 설계를 지원할 뿐만 아니라, 최적의 기능을 수행하지 못하는 기존 IAS들을 위한 고장 점검 도구를 제공할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Gasser, L., "DAI approaches to coordination," In Gasser, L., editors, Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis, Kluwer, pp.31-51, 1992.
 [2] Jennings, N. R., "Commitments and conventions: The foundation of coordination in multi-agent systems," Knowledge Engineering Rev., 81323-250, 1993.

[3] Decker, K. S., "Tfims: A framework for analysis and design of coordination mechanisms," In O'Hare, G. & Jennings, N., eds., Foundations of DAI, Wiley, 1995.
 [4] Jennings, N. R., "Controlling cooperative problem solving in industrial multi-agent systems using joint intentions," Artificial Intelligence, 75: pp.195-240, 1993.
 [5] Findler, N. V. and Elder, G. D., "Multi-agent coordination and cooperation in a dynamic environment with limited resources," Artificial Intelligence in Engineering, 9, pp.229-238, 1994.
 [6] Findler, N. V. and Malyankar, R. M., "A methodology for modeling coordination in intelligent agent societies," Computational and Mathematical Organization Theory, 4, pp. 317-345, 1998.
 [7] Peter, S. H., An Empirically-Based Theory of Coordination for Intelligent Agent Societies, Master dissertation, Dept. of Computer Science and Eng., Arizona State University, 1998.
 [8] Findler, N. V. and Malyankar, R. M., "Social structures and the problem of coordination in intelligent agent societies," Invited talk at the Special Session on Agent-Based Simulation, Planning and Control in IMACS World Congress, pp.122-132, 2000.
 [9] Findler, N. V. and Malyankar, R. M., "An Empirical Approach to a Theory of Coordination Part I: Design Principles and First Results," Computational and Mathematical Organization Theory, 6, pp.119-144, 2000.
 [10] Findler, N. V. and Malyankar, R. M., Heck, P. S., "The effects of satisficing models on coordination," AAI Spring Symposium, pp.39-45, 1998.
 [11] Findler, N. V. and Lo, R., "Empirical studies on distributed planning for air traffic control. Part II: Experimental results," Journal of Transportation Engineering, 119, pp.681-692, 1993.
 [12] Cohen, P. R., Empirical Methods for Artificial Intelligence, The MIT Press, pp.1-103, 1995.
 [13] Axelrod, R., The Evolution of Cooperation, Basic Books, NY, 1984.
 [14] Nurusis, M. J., SPSS 10.0 Guide to Data Analysis, Pearson Pub., 2000.
 [15] D. G. Kleinbaum and L. L. Kupper, Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods, Duxbury Press, 1978.

김 은 경

e-mail: egkim@kut.ac.kr

1984년 숙명여대 물리학과 졸업(이학사)
 1987년 중앙대학교 대학원 전자계산학과 졸업(이학석사)
 1991년 중앙대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학박사)



1992년~현재 한국기술교육대학교 부교수
 2001년~2002년 아리조나 주립대학교 방문교수
 관심분야: 분산인공지능, 지능형에이전트시스템, 지식관리시스템, 전문가시스템 등