

시스템 오브 시스템즈(SoS) 사례 분석을 통한 온톨로지 기반의 SoS 메타모델 개발

백영민^o, 박수민, 신용준, 배두환
한국과학기술원

{ ymbaek, smpark, yjshin, bae}@se.kaist.ac.kr

Development of Ontology-based System-of-Systems Meta-model Based on the Analysis of SoS Case Scenario

Young-Min Baek^o, Sumin Park, Yong-Jun Shin, Doo-Hwan Bae
School of Computing, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

요 약

현대의 소프트웨어 산업은 고차원의 기능과 서비스를 제공하기 위해 다양한 컴포넌트 시스템들의 협업을 필요로 한다. 이러한 요구에 대응하기 위해 여러 독립적인 구성 시스템들을 통합하여 다양한 분야에서 시스템 오브 시스템즈(System-of-Systems, SoS)가 연구 및 개발되고 있다. 하지만 SoS는 크기가 매우 큰 대규모 시스템이며 시스템 구성이 매우 복잡하기 때문에 SoS 전반에 걸친 체계적인 설계와 개발을 위해서는 모델 기반의 분석 기법이 요구된다. 본 연구는 SoS와 가장 유사한 시스템인 다중 에이전트 시스템(Multi-agent System)의 메타모델 기법을 분석하고 SoS 사례 시나리오를 조사함으로써 온톨로지 기반의 SoS 메타모델인 M2SoS(Meta-model for SoS)를 개발하고자 한다.

1. 서 론

시스템 오브 시스템즈(System-of-Systems, 이하 SoS)는 상위 수준의 목표를 달성하기 위해 여러 독립적인 시스템들을 통합하여 개발되는 대규모 복잡 시스템을 가리킨다. SoS는 개별 시스템이 달성할 수 없는 상위 수준의 공통 목표를 달성하기 위해, 여러 구성 시스템(Constituent System, 이하 CS)들을 통합하고 그로부터 상위 수준의 기능 및 서비스 수행 역량을 기대하는 시스템이다 [1, 2]. 이와 같이 복잡한 SoS의 개발과 검증에 위해, 다양한 모델 기반 소프트웨어/시스템 공학 기법들이 적용되고 있다. MBSE를 활용하여 SoS의 특성을 효과적으로 표현하기 위한 모델링 언어를 개발하거나 [2], SoS를 아키텍처 관점에서 분석하고 테스트 및 검증을 수행한 연구 [3] 등이 진행되어 왔다. 그러나 이들 연구는 SoS를 각각 다른 기반 모델로 표현하여 SoS의 부분적 특성을 표현하기 위한 기법을 제안하는 데에 그치고 있으며, SoS의 분석 및 개발에 앞서 대상 SoS의 핵심적인 특성을 포괄할 수 있는 모델 기반 기법 및 방법론 연구는 부족한 실정이다.

SoS와 가장 유사한 시스템으로 다중 에이전트 시스템(Multi-agent System, 이하 MAS)이 있다. MAS 역시 다수의 컴포넌트 에이전트가 협력하여 상위 수준의 서비스를 제공하는 특징을 갖기 때문에 SoS와 많은 특성을 공유한다. MAS를 연구한 다양한 분야에서는 에이전트 및 MAS의 핵심적인 특성을 포괄하는 모델 기반 기법 개발을 위해 메타모델(meta-model)을 적극 활용해 오고 있다 [5, 6]. 이들의 메타모델 기반 기법은 시스템의 분석 및 설계 단계에서 모델링의 대상이 되는 요소들을 철저하게 정의할 수 있도록 가이드라인을 제공해 줄 수 있을 뿐만 아니라, 대상 모델들 간의 관계 정의를 통해 체계적인 시스템 설계의 절차를 마련해 준다. 특히, 시스템 전반의 특징을 포괄적으로 표현할 수 있는 메타모델을 통해 시스템의 다양한 이해관계자가 공동된 이해를 바탕으로 지식을 구축하고, 분석, 설계 및 개발에 활용할 수 있다.

따라서 본 연구는 이러한 메타모델 기반 기법의 이점을 모델 기반 SoS 공학을 위해 활용하고자, 개발 대상 SoS를 효과적으로 표현할 수 있는 온톨로지

기반의 메타모델을 제안한다. 이를 위해 유사 시스템인 MAS의 대표적인 메타모델 기법을 분석하고 SoS 사례 시나리오를 분석함으로써 SoS 메타 모델을 개발하고 활용 가능성을 분석한다.

2. 배 경

2.1 시스템 오브 시스템즈(System-of-Systems)

기존의 다양한 SoS 공학 연구 문헌들에서 시스템 오브 시스템즈(이하 SoS)는 ‘하위 시스템 수준에서는 개별적으로 달성하기 어려운 상위 수준의 목표를 달성하기 위해 독립적으로 운영 및 관리되는 시스템들로 구성/통합된 대규모 복잡 시스템’으로 정의된다 [1, 2, 7]. 또한 SoS를 기존의 다른 시스템들과 구분 짓기 위해 주요 특징들을 통해 분석되었는데, CS들이 운영 및 관리 독립성을 갖는 특징이 있으며, 자율적인 CS들이 통합되면서 소속성/연대성, 연결성, 다양성, 창발성 등을 주요 특징으로 갖는다. 또 다른 연구에서는 모델 기반 SoS 공학을 위한 분석 기준으로 8가지 차원(dimension)을 자율성, 독립성, 분산, 진화, 동적 재구성, 창발적 행위, 상호의존성, 상호운용성으로 정의했다 [7].

2.2 다중 에이전트 시스템(MAS)과 메타모델 기반 기법

SoS와 많은 공통 특성을 공유하고 있는 다중 에이전트 시스템(Multi-agent System, 이하 MAS)은 공통 목표를 달성하기 위해 자율적인 행동과 의사 결정을 수행하는 에이전트들로 구성된 상위 수준 시스템이다. MAS를 대상으로 한 메타모델 기반 방법론으로는 Gaia 방법론과 O-MaSE 방법론이 대표적이며 [5, 6], 이들은 MAS를 이루는 컴포넌트들과 그들 사이의 관계를 정의하고 있다. Gaia 방법론은 객체 지향 기법에 기반하여 MAS를 하나의 조직으로 간주하여, 이를 설계하기 위한 조직 구조 모델, 역할 모델, 상호작용 모델, 에이전트 모델, 서비스 모델 등을 명세할 수 있도록 가이드라인을 제공해 준다. 또 다른 대표적인 MAS 메타모델인 O-MaSE 역시 에이전트의 조직 및 상호작용 관점에서 MAS에 대한 표현력을 높이고자 제안된 기법이다. O-MaSE는 각 에이전트가 특정한 MAS 수준의 목표(Goal)에 따라 역량(Capability)과 역할(Role)을 명세할 수 있도록 체계적인 가이드라인과 모델링 기법을 제공한다.

*이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원(No. R0126-18-1101, (SW 스타랩) 모델 기반의 초대형 복잡 시스템 분석 및 검증 SW 개발)과 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-차세대정보·컴퓨팅기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2017M3C4A7066212)

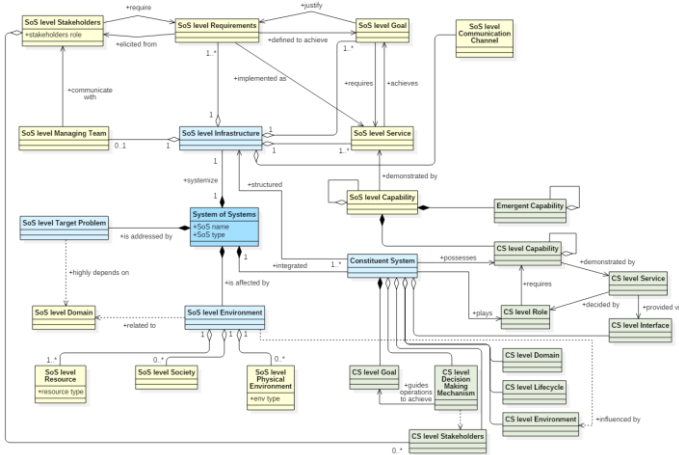


그림 1. SoS 온톨로지 표현을 위한 M2SoS (간략화된 M2SoS)

3. SoS 사례 분석을 통한 온톨로지 기반의 SoS 메타모델 개발

3.1 다중손상사고(MCI) 대응 시스템 사례 분석

다중손상사고(Mass Casualty Incident, 이하 MCI)는 매우 높은 수의 사상자와 피해자를 발생시키며 기존 의료 및 구조 자원으로 해결이 어려운 대형 사고나 자연 재난을 의미한다. 이러한 MCI 상황은 단시간 내에 통합되지 않은 개별 시스템의 역량과 자원으로 해결하기 어렵기 때문에, 적절한 시스템들의 협업에 기반해 지속적인 의료/구조 자원을 제공할 수 있도록 SoS 수준의 시스템 구축이 요구된다. 본 연구에서는 이와 같이 MCI에 대응하기 위한 시스템을 MCI 대응 SoS (MCI Response SoS, 이하 MCIRSoS)로 정의하며, 실제 SoS 사례가 포함하는 요소를 철저히 도출해 내기 위해 2000년 이후에 발행된 약 30개의 MCI 관련 문헌(부록 참조)을 문헌 조사를 수행했다.

문헌 조사를 통해 실제 MCI 대응 시스템을 구성하는 요소(entity)를 분석하고 실제 SoS 사례가 갖는 특징을 분석할 수 있었다. 첫째, MCIRSoS는 명시적으로 SoS 수준 목표, 요구사항, 서비스, 행동, 통신 요소를 포함하고 있으며, SoS 수준 목표를 달성하기 위해 CS들의 역량에 기반한 구체적인 역할 할당을 통해 임무를 수행한다. 둘째, 이를 위해 SoS 수준 요소와 CS 수준 요소를 명확하게 구분하여 정의하고 있으며 SoS 수준 공학자/관리자와 CS 수준 공학자/관리자의 역할이 뚜렷이 구분된다. 셋째, MCI는 높은 불확정성을 갖는 환경 요소를 포함하고 있기 때문에, 많은 문헌들에서 철저한 환경 요소 분석을 통한 대응 프로시저를 정의하고 있다. 넷째, MCIRSoS를 이루고 있는 요소들은 계층적으로 구성되어 있으며, 제일 상위 수준 요소는 SoS 수준 대상 문제, SoS 수준 인프라(Infrastructure), SoS 수준 환경, 그리고 다수의 CS로 이루어진 조직으로 구분할 수 있었다.

3.2 SoS 메타모델 개발 요구사항 정의 및 단계별 요소 정의

앞서 수행한 조사 결과를 바탕으로 우리는 다음과 같이 메타모델 설계의 네 가지 요구사항을 정의할 수 있었다:

- i. SoS 수준 요소와 CS 수준 요소의 구분
- ii. SoS 수준 목표, 요구사항, 서비스, 행위와 CS 수준 역할 역량간 명시적 관계 정의
- iii. SoS 운영 시 분석이 필요한 환경 요소 분류 및 정의
- iv. 온톨로지 표현이 가능한 SoS 메타모델 개발

위의 요구사항을 바탕으로 개발한 SoS 메타모델인 M2SoS (Meta-model for System-of-Systems)는 그림 1에 간략하게 표현하였다(전체 버전은 부록 참조). 그림과 같이, M2SoS는 MCIRSoS 사례 분석을 통해 도출한 SoS의 상위 수준 구성 요소를 포함하고, 명시적으로 SoS 수준 요소와 CS 수준 요소를 구분하고 있다. 또한 SoS 수준 환경 요소를 SoS 수준 최상위 요소로 정의함과 동시에, SoS 수준 자원(resource), 사회(society), 물리적 환경(physical environment)으로 분류하여 명세하였다. 그리고, M2SoS는 개발 대상 SoS의

온톨로지를 표현할 수 있도록 SoS를 이루는 구성 요소와 그 관계를 정의함으로써 도메인-일반적인(domain-general) 메타모델의 역할을 수행할 수 있다. 다시 말해, 본 메타모델을 활용하여 SoS의 다양한 이해관계자들이 공통된 SoS에 대한 이해를 수행하기 위한 온톨로지를 구축할 수 있다.

4. M2SoS 분석 및 확장 방안

MAS의 분석과 설계를 위한 다양한 메타모델들(예, Gaia, O-MaSE)은 에이전트 기반의 시스템과 상호작용을 명세하는 데에는 효과적이었지만, 구성 시스템의 운영/관리 독립성을 가지며 복잡도가 높은 SoS를 표현하는 데에는 한계가 존재했다. 우선, MAS 대상 기법은 컴포넌트 시스템(Agent 혹은 CS) 수준 요소와 상위 시스템(MAS 혹은 SoS) 수준 요소를 명시적으로 구분하지 못한다. 둘째, MAS 대상 기법은 컴포넌트 시스템의 운영 및 관리 독립성을 고려하지 않아도 되므로 SoS의 CS가 독립적인 목표 하에 운영 및 관리되기 위한 요소(CS 수준 목표, 생명주기 등)를 표현하지 못한다. 셋째, MAS 대상 기법은 전반적으로 개발 대상 SoS의 온톨로지를 정의하기 위한 요소들을 모두 포함하고 있지 않은 반면, M2SoS는 SoS의 핵심 특성을 충실히 반영할 수 있도록 설계되었다. 표현력 비교 분석 결과는 부록에 첨부하였다.

5. 결론 및 향후 연구

대규모 복잡 시스템인 시스템 오브 시스템즈(System-of-Systems, SoS)의 개발을 위해서 개발 대상 SoS를 체계적으로 분석하기 위한 기법이 요구되는데, 본 연구는 이러한 문제를 메타모델 기반 접근 방식으로 다루었다. 본 연구에서 제안한 SoS 메타모델인 M2SoS (Meta-model for SoS)는 다중 에이전트 시스템의 메타모델 기반 기법에 기반하여 기본 뼈대를 구성하고, SoS 사례 시나리오인 다중손상사고 대응 SoS 문헌 분석을 통해 요소를 정의하여 개발되었다. 본 M2SoS는 SoS의 다양한 이해관계자가 개발 대상 SoS에 대한 공통된 지식을 구축하는 데에 온톨로지로 활용이 가능하며, SoS를 설계하는 단계에서 모델링의 대상이 되는 요소와 요소 사이의 관계를 파악하는 데에 활용될 수 있다. M2SoS는 향후 SoS의 모델 기반 시뮬레이션 및 통계적 검증에도 활용될 예정이며, M2SoS에 정의된 요소들에 대한 구체적인 모델링 기법이 개발될 예정이다.

참고 문헌

[1] J. Boardman, and B. Sauser, "System of Systems - the Meaning of Of," IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering (SoSE), 2006.

[2] W. C. Baldwin, and B. Sauser, "Modeling the Characteristics of System of Systems," IEEE International Conference on System of Systems Engineering 2009 (SoSE 2009).

[3] M. Hause, "The Unified Profile for DoDAF/MODAF (UPDM) Enabling Systems of Systems on Many Levels," Systems Conference, San Diego, CA, USA, 2010.

[4] C. Bernon, M. Cossentino, and J. Pavon, "Agent-Oriented Software Engineering," 2005 Cambridge University Press, vol. 20, issue 2, pp. 99-116, 2005.

[5] S. A. DeLoach, J. C. Garcia-Ojeda, "O-MaSE: A Customizable Approach to Designing and Building Complex, Adaptive Multi-agent Systems," International Journal of Agent-Oriented Software Engineering, vol. 4, issue 3, 2010.

[6] F. Zambonelli, N. R. Jennings, M. Wooldridge, "Developing Multiagent Systems: The Gaia Methodology," Journal of ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM), vol. 12, issue 3, 2003.

[7] C. B. Nielsen, P. G. Larsen, J. Fitzgerald, J. Woodcock, and J. Peleska, "Systems of Systems Engineering: Basic Concepts, Model-Based Techniques, and Research Directions," Journal of ACM Computing Surveys (CSUR), vol. 48, issue 2, 2015.

부 록

부록 A. 다중손상사고 조사 문헌

번호	문헌 이름	문헌 작성 기관	연도
1	Rogers Fire Department Standard Operating Procedures - Policy Title: Mass Casualty Incidents	Rogers Arkansas	2013
2	Emergency Medical Services Policies and Procedures - Policy Title: Multi Casualty Incident Response	County of Ventura Health Care Agency	2014
3	Mass Casualty Incident	Shao Foong Chong	2013
4	Planning & Triage	Peds (Pediatrics in Disasters)	
5	Florida Field Operations Guide - Mass Casualty	Florida State	2012
6	Dane County Regional Mass Casualty Incident Response Plan	Metropolitan Medical Response System (MMRS)	2006
7	MCI PLAN - Franklin County Multiple Casualty Incident Response Plan	Franklin County EMS, MCI Planning Committee	2009
8	The Massachusetts Emergency Medical Services (EMS) Mass Casualty Incident (MCI) Plan	The Massachusetts Department of Public Health	2016
9	Integrated Explosive Event and Massive Casualty Event	Greater New York Hospital Association	-
10	Emergency Management Plan for Mass Casualty Incidents	-	-
11	Mass Casualty Incident Plan - Adopted by the Marion County Fire Defense Board	Marion County Fire Defense Board	2001
12	Mass Casualty Response: NHS Tactical Command Framework	NHS England Cumbria Northumberland Tyne and Wear Area Team	2014
13	Appendix N - Detailed Sample Scenarios	-	-
14	Multi-Casualty Incident (MCI) Response Plan	Santa Barbara County - Emergency Medical Services Agency	2013
15	Mass Casualty Management Systems - Strategies and Guidelines for Building Health Sector Capacity	World Health Organization (WHO)	2007
16	National Incident Management System	Homeland Security	2008
17	MCI Triage Drill	Alabama Fire College Workplace Safety Training Program	-
18	Utah Department of Health Bureau of EMS and Preparedness Emergency Operations Plan	Utah Department of Health	2011
19	Recommendations of the Standing Committee on Multiple Casualty Incident Planning and Evaluation	The Commonwealth of Massachusetts	2004
20	Emergency Medical Services - Multi-Casualty Incident Plan	Contra Costa County	2012
21	Multiple Casualty Incident (MCI) Response Plan	Monterey County EMS	2014
22	MCI Operational Policy - Clear Creek County Emergency Services	Clear Creek Fire Authority/ Clear Creek EMS	2011
23	Multi-Casualty Incident Policy	San Francisco Emergency Medical Services Agency	2005
24	Mass Casualties Incident Plan for NHS Scotland	NHS Scotland Resilience	2015
25	Multi-Casualty Incident Policy	NPS EMS Field Manual	2016
26	ODEMSA Mass Casualty Incident (MCI) Plan	Heidi M. Hooker, ODEMSA	2014
27	SUFFOLK Mass Casualty Plan	Suffolk NHRP on behalf of Suffolk Resilience Forum	2015
28	Operational Templates and Guidelines for EMS Mass Incident Deployment	FEMA	2012
29	Hospital Medical Surge Planning for Mass Casualty Incidents	Florida Department of Health	-
30	Mass Casualty Incident (MCI): An Overview	Jim Thomas, Captain	-
31	2017 소방전술 I: 신입교육과정(화재3)	중앙소방학교(NFSA)	2017

부록 C. MAS 메타모델과 M2SoS의 표현력 비교 분석

구성 요소	MAS 메타모델		M2SoS
	Gaia	O-MaSE	
컴포넌트 시스템(Agent or CS) 수준 요소			
컴포넌트 시스템	Agent (Organizational Agent)		Constituent System (CS)
컴포넌트 역할	Role AgentType	Role	CS-level Role
컴포넌트 목표	×	×	CS-level Goal
컴포넌트 서비스	Service Activity Action Responsibility Permission	Action	CS-level Service
컴포넌트 역량	×	Capability	CS-level Capability
컴포넌트 인터페이스	×	×	CS-level Interface
컴포넌트 의사결정 매커니즘	Permission	Plan, Action	CS-level Decision Making Mechanism
컴포넌트 이해관계자	×	×	CS-level Stakeholder
컴포넌트 도메인	×	Domain Model	CS-level Domain
컴포넌트 생명주기	×	×	CS-level Lifecycle
컴포넌트 환경	Environment	Environment Object, Property	CS-level Environment
상위 시스템(MAS or SoS) 수준 요소			
상위 수준 시스템	MAS		SoS
상위 시스템 조직	Organizational Rule, Structure	Organization	×
상위 시스템 인프라	×	×	SoS-level Infrastructure
상위 시스템 행위	×	×	SoS-level Service
상위 시스템 통신	Communication, Protocol	Protocol	SoS-level Communication
상위 시스템 관리자	×	(Actor)	SoS-level Managing Team
상위 시스템 목표	×	Goal	SoS-level Goal, Target Problem, Requirements
상위 시스템 정책	×	Policy	SoS-level Policy
상위 시스템 도메인	×	×	SoS-level Domain
상위 시스템 환경	×	×	SoS-level Environment
상위 시스템 관리	×	×	Management of CS, Resource, Dynamics, Risk,
시스템 위험	×	×	SoS-level Risk, Hazards