

HDEVS 형식론에 기반한 통합 하이브리드 모델 개발 방법론

권세중*, 성장호*, 송해상**, 김탁곤*, 황근철***

Integrated Hybrid Model Development Method Based on HDEVS Formalism

Se Jung Kwon, Changho Sung, Hae-Sang Song, Tag Gon Kim and Kun-chul Hwang

Abstract

A hybrid system is a combination of sub systems which have different types of state and time: a typical example is a combination of discrete event and continuous systems. A HDEVS formalism was proposed for modeling and analyzing a hybrid system. The HDEVS formalism allows modelers to construct a hierarchical and modular model based on the mathematical set theory. Because the HDEVS formalism was applied to the distributed and interoperated simulators, however, modelers should make several heterogenous models dividing a target system. Hence, this paper proposes an extended hybrid coupled model of HDEVS formalism and an integrated hybrid model development method in contrast to the existing simulation framework on interoperable simulators. By applying the proposed modeling method, a target system can be translated to a hybrid model in a similar form as the target system. This paper also contains a simulation environment for proposed modeling method and a case study.

Key Words : Hybrid Systems, Hybrid Modeling and Simulation, HDEVS formalism

* 한국과학기술원 전기및전자공학과

** 서원대학교 컴퓨터공학과

*** 국방과학기술원 제6기술연구본부 해양무기체계 M&S부

1. 서론

일반적으로 시스템의 행동을 분석하거나 모의하기 위해서는 각 시스템의 특성에 맞는 모델링 방법론을 적용하여 모델을 기술하고 알맞은 시뮬레이션 알고리즘이나 수학 공식을 이용하여 모델을 실행해야 한다. 예를 들어, 이산 사건 시스템은 주로 DEVS (Discrete Event systems Specification)[1]와 같은 형식론을 사용하여 모델을 기술하고 DEVS 실행 알고리즘을 통해 모의 결과를 얻으며, 연속 시간 시스템은 미분방정식 모델을 기술하고 수치해석 알고리즘을 통해 결과를 얻는다.

실세계의 시스템은 하나의 종류로만 이루어지기보다 두 종류 이상의 시스템이 혼재되어 있는 하이브리드 시스템인 경우가 많다. 예를 들어, 적 미사일을 타격하는 미사일 방어체계는 레이더, 미사일, C2체계, 피해 평가 분석 등의 다양한 부 시스템의 합으로 이루진다. 이중 레이더의 탐지나 미사일의 기동은 연속 시간에 이루어지는 시스템이며, C2나 피해 평가 분석은 사건 단위의 불규칙한 상태 천이가 일어나는 이산 사건 시스템이다. 이러한 하이브리드 시스템은 부 시스템들의 시간과 데이터의 종류가 각각 다르기 때문에 한 가지 M&S 방법론만으로는 효율적이고 정확한 결과를 얻기 어렵다. 따라서 이러한 시스템을 모의하기 위해서는 특수한 M&S 방법론이 필요하다.

이를 위하여 제안된 다양한 하이브리드 방법론에는, 대표적으로 혼합형 모델링 형식론을 제안한 ADEVS[2]와 MATLAB에 이산 사건 모델을 추가한 Simulink[3] 등이 있었다. 하지만 ADEVS와 같은 혼합형 모델링 방법은 기존 모델의 재사용이 어려웠으며, Simulink와 같은 경우는 연속 시간 모델 해석에 초점이 맞추어져 있어 위게임과 같은 대단위 시스템 시뮬레이션에는 부적합한 문제가 있었다.

이러한 문제를 해결하고자 HDEVS 기반 연

동형 M&S 방법론이 제안되었는데, 이는 서로 다른 시스템을 위한 시뮬레이터들을 연동하는 방식으로 형식론을 통한 시스템 이론과 함께 연동 이론을 적용하였다[4]. 때문에 구조적/계층적 모델링을 통한 대단위 시스템 시뮬레이션에 적합하며 각 단일 시뮬레이터 및 모델을 재사용할 수 있다는 장점이 있었다.

하지만 연동형 시뮬레이터에 대한 연구는 연동 구조에 초점을 맞추어, 각 모델에 맞는 시뮬레이션 모델을 분리하여 구현했기 때문에 통합된 모델 개발 환경을 제공할 수 없었다. 따라서 개발된 연동형 모델들은 단일 하이브리드 시스템을 그대로 표현하기보다 사용자에게 나누어진 이기종 모델들의 연동 형태로 표현했었다.

본 논문에서는 형식론 기반 연구의 장점을 가지면서도 연동형 구조에 따른 문제를 해결할 수 있도록 HDEVS 형식론에 기반을 둔 통합 모델 개발 방법론을 제안한다. 모델러는 하이브리드 시스템을 분석, 분리하여 각각의 구분된 모델을 설계하기보다 통합된 하이브리드 모델을 설계함으로써 좀 더 직관적인 모델 구현이 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 2장에서는 하이브리드 시스템과 DEVS에 대한 간단한 배경 지식을 다룬다. 그리고 3장에서 효과적인 통합 하이브리드 모델 개발 방법론을 제안한다. 4장에서는 제안하는 방법론을 따라 구현된 모델의 시뮬레이션 구현에 대해 간단히 살펴보고 예제를 통해 결과를 확인한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 배경 지식 및 관련 연구

2.1 하이브리드 시스템

하이브리드 시스템은 두 가지 이상의 다른 수준의 동적 시스템을 결합한 시스템으로서 두 가지 이상의 개념이 혼재되어 있는 시스템을 가리킨다. 본 논문에서는 주로 연속 시간

시스템과 이산 사건 시스템의 하이브리드 시스템을 다룬다. 특히 이는 공학급/교전급 연동과 같은 국방 M&S 분야에서 많이 다루어지는 형태의 하이브리드 시스템이다.

하이브리드 시스템 안에는 서로 다른 시스템의 데이터가 존재한다. 예로써, 연속 시간 시스템은 연속 시간에 이루어지는 신호를 입출력으로 사용하며 이산 사건 시스템은 불특정한 시간에 발생하는 메시지를 사용한다. 따라서 이들 사이의 데이터 교환을 위해 변환기가 필요하다. 연속 시간 시스템과 이산 사건 시스템의 데이터 교환을 위해서는 신호를 이벤트로 변환하는 A/E(Analog to Event) 변환기와 이벤트를 신호로 변환하는 E/A (Event to Analog) 변환기가 존재한다[4].

2.2 DEVS 형식론[1]

DEVS 형식론은 1976년 B. P. Zeigler에 의해 제안된 집합론에 근거한 형식론으로, 이산 사건 시스템을 모듈 별로 나누고 이를 계층적으로 연결하여 모델링 할 수 있는 수학적인 기반을 제공한다. 시스템 구성 기본 단위 요소를 나타내는 원자 모델과 여러 모델을 합쳐서 새로운 모델을 구성할 수 있는 결합 모델로 구성되어 있으며, 이 두 가지 종류의 모델을 사용하여 시스템을 계층적이고 모듈리하게 표현할 수 있다. 이러한 객체 지향적 모델링은 모델의 재사용성, 유지보수성, 신뢰성 등을 높일 수 있다.

2.3 HDEVS 형식론과 연동형 시뮬레이터

DEVS의 장점을 살려 하이브리드 시스템 모델링에 적용하고자 한 모델링 형식론이 Hybrid DEVS(HDEVS) 형식론이다. HDEVS 형식론은 DEVS 모델과 연속 시간 모델을 연동할 수 있는 이론적 배경이 된다. HDEVS 형식론은 기존의 DEVS 결합, 원자 모델에 상미분방정식을 푸는 연속 원자 모델, 연속 결

합 모델과 하이브리드 결합 모델을 추가하여 하이브리드 시스템을 계층적이고 모듈리한 형태로 모델링한다[4].

연속 원자 모델과 연속 결합 모델은 연속 신호를 입출력으로 하며, 연속 원자 모델은 상미분방정식으로 기술되는 상태 천이 함수를 가진다. 그리고 하이브리드 결합 모델을 통해 이산 사건을 위한 결합 모델과 연속 시간을 위한 연속 모델을 연동한다. 따라서 HDEVS 형식론의 전체 모델의 구조는 그림 2와 같은 형태가 된다. 연속 결합 모델과 원자 모델은 연속 신호를 데이터로 사용하며 DEVS는 이벤트 메시지를 데이터로 사용한다. 이때, 서로 다른 데이터를 변환하기 위해서 하이브리드 결합 모델 안에 A/E 변환기와 E/A 변환기가 추가된다.

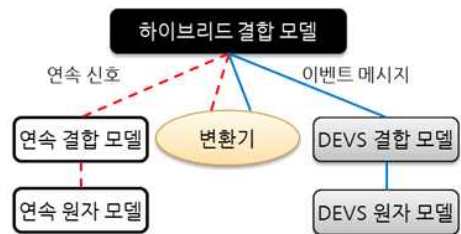


그림 2. 기존의 HDEVS 모델 구조

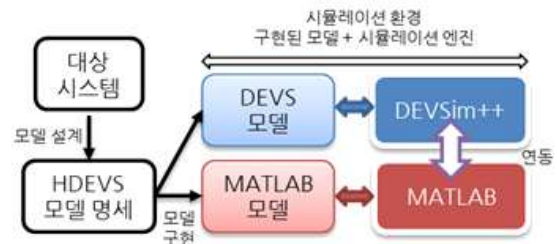


그림 3. 연동형 시뮬레이터 방식 M&S

그림 2와 같이 기술된 모델 명세는 그림 3과 같이 연동형 시뮬레이터로 구현된다. HDEVS로 기술된 각종 세부 모델을 분리하여 연속 모델 및 변환기를 MATLAB/Simulink를 통해 구현하고 DEVS 모델을 DEVSIM++을 통해 구현하였다[5]. 각각 모델을 정확히 실행할 수 있는 툴을 이용하여 모의하였다는 점에서 장

점이 있다. 그러나 HLA/RTI 연동에 따른 연동부하 증가와 하이브리드 시스템을 그대로 모델링하기보다 전체 시스템을 해체하여 시스템 종류별로 재구성한 형태로 모델링을 해야 한다는 문제점이 있다.

3. 제안하는 통합 모델 개발 방법론

제안하는 통합 하이브리드 모델 개발 방법론은 기존의 모델을 재사용할 수 있으면서도 통합된 하이브리드 모델을 구조적/계층적으로 구성할 수 있도록 한다. 연속 시간 시스템에 해당하는 컴포넌트는 미분방정식을 통해 연속 시간 모델로 기술하고 이산 사건 시스템에 해당하는 컴포넌트는 DEVS로 기술하여 재사용성을 높인다. 이러한 구조는 HDEVS 형식론과 비슷한 형태를 가지게 되지만, 모든 결합 모델을 확장된 하이브리드 결합 모델로 통합함으로써 최상위에 하이브리드 결합 모델이 단 하나만 존재하게 되는 연동형 HDEVS 형식론과 달리 시스템의 부분 부분이 모두 하이브리드 결합 모델이 될 수 있다.



그림 4. 통합 하이브리드 모델을 통한 M&S

그림 4는 제안하는 모델 개발 방법을 적용한 M&S 과정을 설명한다. 그림 3과 대조적으로 하나의 모델만이 구현되고 실행되는 것을 확인할 수 있다.

이러한 하이브리드 모델 개발을 위해 필요한 하이브리드 결합 모델의 구조는 그림 5와 같다. 하이브리드 결합 모델 내부에는 다수의 이산 사건 모델, 연속 시간 모델, 하이브리드 결합 모델 등이 모두 혼재되어 존재할 수 있다. 다만, 서로 다른 두 종류의 입출력이 존재

하기 때문에 입출력 포트 연결에 주의해야 하는데, 연속 시간 모델은 신호만을 다루고 이산 사건 모델은 메시지만을 다룬다. 신호와 메시지를 모두 다룰 수 있는 하이브리드 결합 모델에는 신호와 메시지 입출력 포트가 모두 존재한다.

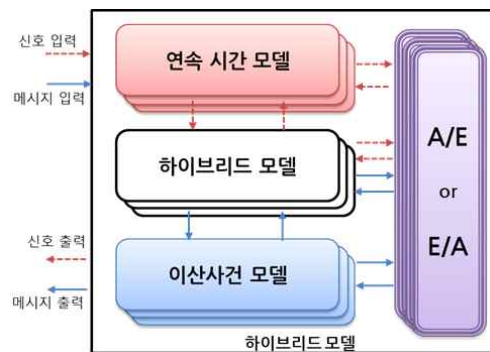


그림 5. 하이브리드 결합 모델 구조

만약 신호가 이벤트로 변환되거나 이벤트가 신호로 변환되는 것을 원할 때는 A/E 또는 E/A 인터페이스 모델을 통해 변환되어야 한다. A/E 모델은 신호 입력을 받아서 메시지 출력을 내놓으며, E/A 모델은 메시지 입력을 받아서 신호 출력을 내놓는다. 이러한 A/E, E/A 모델들도 객체지향적인 모델로 구성함으로써 모듈성을 높인다.

이러한 하이브리드 모델을 사용하여 사용하는 하이브리드 모델의 계층 구조를 모델링할 수 있다. 이러한 모델링 방법은 객체 지향적이고 구조적/계층적인 국방 시스템 등 다양하고 복잡한 하이브리드 시스템을 있는 형태 그대로 기술할 수 있기 때문에 더 폭넓은 하이브리드 시스템 모델링이 가능하다.

4. 시뮬레이션 환경 및 예제 적용

4.1 시뮬레이션 환경

지금까지 연동형 시뮬레이터와 달리 통합된 모델을 사용한 개발 환경에 대해 소개하였다. 하지만 구현된 통합 모델을 실행하기 위한 시

물레이션 엔진은 하나의 시물레이션 방법으로 이루어질 수 없다. 연속 시간 시물레이션은 연속된 시간의 흐름을 따라 시간 진행이 일어나며, 이산 사건 시물레이션은 이벤트 발생에 따라 시물레이션이 진행되기 때문에 동일한 시간 흐름에 따라 통합 시물레이션을 진행하게 되면 상당히 비효율적으로 시간을 관리하게 된다. 따라서 통합된 하나의 모델을 구현하더라도 시물레이션 엔진은 내부적으로 각각의 실행 엔진을 두고 모델을 분리하여 실행해야한다. 즉, 시물레이션 엔진의 전처리 기능으로 사용자가 구현한 모델을 연속시간 모델과 이산 사건 모델로 분리하는 작업이 필수적이다. 이러한 작업은 사용자의 관점에서는 보이지 않기 때문에 통합 모델링의 목적을 훼손하지는 않는다.

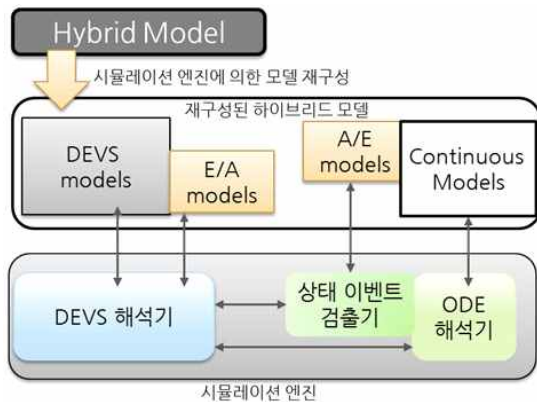


그림 6. 시물레이션 환경

그림 6은 시물레이션 사용자가 구현한 하이브리드 모델을 실행하는 환경의 구조를 표현한다. 하나로 통합되어 있는 하이브리드 모델은 시물레이션 엔진에 의해 재구성되어 DEVS 모델과 연속 시간 모델로 분리되고 E/A, A/E 모델들이 식별된다. 또한 통합 시물레이션 엔진은 DEVS 해석기와 상미분방정식 풀이를 위한 ODE 해석기를 통해 각각의 모델을 실행한다.

이때 서로 다른 두 시물레이터 사이의 시간 관리는 Pre-Simulation 알고리즘을 사용한다. Pre-Simulation은 DEVS 실행 엔진의 t_N (전체 모델의 다음 실행 시간)까지 미리 연속 시간 엔진을 진행시킴으로, 메시지 발생 여부를 확인하는 알고리즘이다[5]. 또한 서로의 데이터 교환을 담당하는 상태 이벤트 검출기와 신호 생성기 관리기가 존재하게 된다. 상태 이벤트 검출기는 연속 신호가 A/E 모델에 기술된 조건을 만족시키는지 여부를 검사하며, 신호 생성기 관리기는 E/A 모델에 의해 발생한 연속 신호를 전달한다.

본 논문에서는 DEVS 해석기로서 기개발된 DEVSim++[6]를 사용하였으며 ODE 해석기에는 4차 룽게-쿠타 알고리즘[7]을 적용하였다.

4.2 물탱크 조절 예제

제안하는 모델 개발 방법론을 바탕으로 구현된 시물레이션 환경을 물탱크 조절 예제에 적용했다.

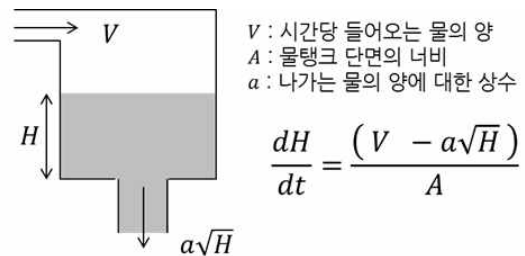


그림 7. 물탱크 조절 예제

물탱크 조절 시스템은 그림 7과 같은 내용으로 일정 양의 물이 들어오고 나가는 물탱크의 높이가 일정 높이를 넘어가지 않도록 입력을 조절한다. 이때, 물탱크의 높이는 그림 7의 수식과 같이 미분방정식으로 표현되고, 물이 일정 높이를 넘어가지 않도록 하는 컨트롤러는 DEVS 모델로 표현되며 두 모델 사이에 데이터 변환은 A/E 변환기와 E/A 변환기에 의해서 이루어진다.

그림 8은 그림 7의 시스템을 통합 하이브리드 모델을 통해 나타낸 모델이다. 하나의 하이브리드 결합 모델 안에 연속 시간 모델과 DEVS 모델이 존재하며 그들 간의 데이터 교환을 E/A, A/E 변환기를 통해 수행한다.

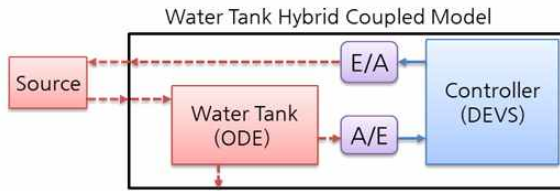


그림 8. 물탱크 하이브리드 모델 설계

A/E 변환기는 물탱크의 높이가 일정 높이를 넘어가는 순간 컨트롤러에게 메시지를 보내고 컨트롤러는 E/A 컨버터를 통해 신호를 발생시켜 입력되는 물의 양을 조절한다. 그림 9는 C++로 구현하여 시뮬레이션 엔진을 통해 실행된 결과를 그린 그래프이다. 물이 넘치는 순간(1m)과 높이가 0m가 되는 순간에 컨트롤러가 정상 동작한 것을 확인 할 수 있었으며, 이 결과는 기존의 연동형 시뮬레이터로 구현된 결과와 일치함을 확인했다.

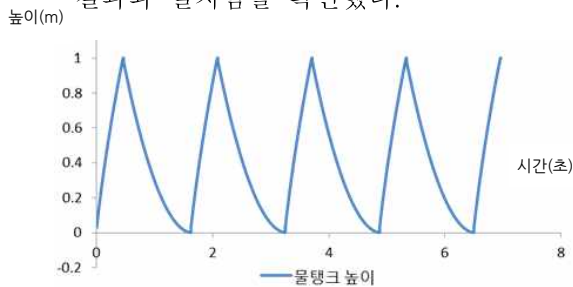


그림 9. 실험 결과

5. 결론

지금까지 HDEVS 형식론에 기반한 통합 모델 개발 방법론을 제안하고 간단한 시뮬레이션 환경 구조와 예제 결과를 보였다.

제안된 하이브리드 방법론은 기존의 연동형 HDEVS 형식론을 보완함으로 하이브리드 결합 모델을 통해 서로 다른 원자 모델들이 혼

재된 형태의 모델을 구현할 수 있으며 이를 통해 하이브리드 시스템을 보다 정확하게 기술할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소 핵심연구사업의 지원으로 수행되었습니다. (계약번호 UD110037DD)

참고문헌

- [1] Zeigler B. P., H. Praehofer., and T.G. Kim, *Theory of Modeling and Simulation*, Second Edition, Academic Press, 2000.
- [2] J. Nutaro, *A Discrete Event system Simulator*, <http://www.ornl.gov/~1qn/adevs/adevs-docs/manual.pdf>, September 7, 2011.
- [3] *SimEvents: Model and simulate discrete-event systems*, <http://www.mathworks.co.kr/products/simevents/index.html>.
- [4] 임성용, 김탁근, "하이브리드 시스템 모델링 및 시뮬레이션 - 제1부:모델링 및 시뮬레이션 방법론," *한국시뮬레이션학회 논문지*, Vol. 10, No. 3, pp. 1 - 14, 2001년 9월.
- [5] Chang Ho Sung and Tag Gon Kim, "Framework for Simulation of Hybrid Systems: Interoperation of Discrete Event and Continuous Simulators Using HLA/RTI," *25th ACM/IEEE/SCS Workshop on PADS 2011*, Nice, France, June 14-17, 2011.
- [6] Tag Gon Kim and Sung Bong Park, "The DEVS Formalism: Hierarchical Modular Systems Specification in C++," *1992 European Simulation Multiconference*, York, United Kingdom, pp. 152 - 156, June, 1992.
- [7] Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S. A., and Vetterling, W.T. *Numerical Recipes in C* 3rd ed., Cambridge Univ. Press, 2007.