

SMT 를 이용한 자바 메모리 모델 시뮬레이션¹⁾

이태훈⁰, 권기현
경기대학교 정보과학부
{taehoon, khkwon}@kyonggi.ac.kr

Java Memory Model Simulation using SMT solver

Taehoon Lee⁰, Gihwon Kwon
Department of Computer Science, Kyonggi University

1. 서 론

다중 스레드 프로그램의 중요성이 증가함에 따라서 다중 스레드 프로그램의 정확한 실행 의미를 정의하고 실행 의미를 바탕으로 다중 스레드 프로그램의 검증을 수행하는 것도 중요하다. 메모리 모델은 프로그램의 메모리 행위가 어떻게 동작하는지를 명세하여 프로그램이 어떻게 실행될지를 명세 한다. 일반적으로 널리 사용되는 메모리 모델은 순차 일관성 메모리 모델(Sequential Consistency Memory Model)이다[1]. 하지만 순차 일관성 메모리 모델은 소프트웨어의 최적화를 표현하지 못한다. 이를 해결하기 위해서 자바 메모리 모델이 제안되었다[2]. 자바 메모리 모델은 주어진 프로그램과 주어진 실행 결과(Execution)를 받아들여서 프로그램에서 실행결과가 허용되는지를 알려준다. 현재 자바 메모리 모델은 자바 표준으로 정의되었다[3].

아직까지 자바 메모리 모델에 대한 여러 연구가 진행되어왔지만 검증 도구를 개발한 사례는 존재하지 않는다. 자바 메모리 모델을 지원하는 검증 도구를 개발하기 위해서 Jeremy Manson 에 의해서 개발된 자바 메모리 모델 시뮬레이터[4]를 SMT 기반으로 구현하였다. 기존에 만들어진 자바 메모리 모델 시뮬레이터는 스레드 개수가 많아지거나 구문의 개수가 많아질 경우 계산에 걸리는 시간이 증가한다. 본 논문에서는 자바 메모리 모델에서 가능한 실행 결과를 효율적으로 계산하기 위해서 SMT 기반으로 자바 메모리 모델의 행위를 표현하였다.

2. 배경 지식

자바메모리 모델은 동기화 되지 않은 소프트웨어와 실행 경로가 주어졌을 때 실행 경로가 소프트웨어에서 올바른 실행 경로인지 판단한다. 만일 잘 동기화된 소프트웨어의 경우 주어진 소프트웨어의 구문 순서대로 실행 하여도 된다. 하지만 동기화 되지 않은 소프트웨어의 경우 컴파일러 혹은 하드웨어 등에서 최적화를 수행할 수 있고 최적화를 수행하면 예상하지 못한 결과가 발생 할 수 있다. 이런 모든 경우를 고려하면서 모든 가능한 모든 실행 결과를 표현하기 위해 자바에서는 자바 메모리 모델을 표준 메모리 모델로 제정하였다.

3. SMT 기반 자바 메모리 모델 시뮬레이션

자바 메모리 모델의 잘 구성된 실행 결과를 기호적으로 표현하기 위해서 우리는 SMT 를 이용한다. 기호적 표현은 2단계로 표현한다. 첫 번째 단계는 수행된 행위의 집합을 기호적으로 표현한다. 두 번째 단계에서는 잘 구성된 실행결과가 되기 위한 조건을 기호적으로 표현한다.

1) 본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터사업의 일환으로 수행하였음[2007-081-7, 효과적인 디지털 콘텐츠 서비스를 위한 상황 인식 정보 처리 기술]

자바 메모리 모델에서는 수행된 집합 C 를 반복적으로 계산한다. 수행된 행위의 집합을 표현하기 위해 행위가 현재 수행된 집합 C 에 속해있는지를 나타내는 변수를 도입한다. 모든 행위 $a \in A$ 에 대해서 이진 변수 a_i 는 현재 i 번째 단계에서 행위가 수행된 집합에 포함되는지를 나타낸다. 이후 메모리 모델에서 설명하는 규칙을 SMT에 알맞게 표현하고 주어진 멀티 스레드 소프트웨어 구성에서 $|A|$ 번 단계만큼 반복적으로 계산하게 하면 SMT 해결기에서는 하나의 실행 결과를 알려준다. 이때 나온 실행 결과를 부정한 식을 원래 식에 추가하면 이전에 나온 결과 이외의 다른 실행 결과가 생성된다. 이 과정을 불만족(Unsat)이라는 결과가 나올 때 까지 반복적으로 수행하면 모든 가능한 실행 결과를 계산할 수 있다.

4. 사례 연구

아래의 표에서 기존 자바 메모리 모델 시뮬레이터[11]와 SMT 기반 자바 메모리 모델 시뮬레이터의 수행 시간을 비교한다. SMT 해결기는 Yices를 이용하였고 동일한 컴퓨터에서 검사를 수행하였다.

표1. 시뮬레이터의 성능 비교

테스트 모델	기존 시뮬레이터	SMT 기반 구현
cnflictingWrites	38.3 초	0.21초
CompilerOpt2	0.01 초	0.01초
CompilerOpt3	149.2 초	0.52초

표 1에서는 총 3개의 프로그램에 대해서 기존 자바 메모리 모델 시뮬레이터와 SMT 기반 메모리 모델 시뮬레이터의 성능 비교를 수행한다. 첫 번째 예제에서 자바 메모리 모델 시뮬레이터에서는 38초의 시간이 걸려서 15 개의 실행 결과를 계산하였다. SMT 기반 자바 메모리 모델 시뮬레이터를 이용할 경우 동일한 개수의 실행결과를 0.2 초 정도의 시간 만에 결과를 얻을 수 있었다. 두 번째 예제는 기존 자바 메모리 모델 시뮬레이터로 실행 결과를 계산할 경우 0.01 초 이내에 결과를 얻는다. 하지만 만일 두 번째 스레드와 동일한 스레드를 추가하여 총 3개의 스레드가 실행 될 경우 실행 결과를 계산하는데 걸리는 시간은 149초로 증가한다. 하지만 SMT 기반 자바 메모리 모델 시뮬레이터에서는 1초 이내의 시간에 모든 결과를 계산할 수 있었다.

5. 결론

기존의 대부분의 멀티 스레드 소프트웨어 모델 체크 도구는 멀티스레드 소프트웨어의 모든 행위를 검사하지 못했다. 이를 위해 본 논문에서는 멀티 스레드 소프트웨어의 모든 행위를 계산하는 시뮬레이터를 개발하였고 기존 개발된 도구가 몇 분의 시간이 필요한 것에 비해 약 1초정도에 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

하지만 실행 결과를 계산할 수 있는 프로그램은 실제 자바 소프트웨어가 아니라 멀티스레드 소프트웨어의 간략화된 표현이다. 따라서 실제 멀티 스레드 자바 소프트웨어를 검증할 수 있도록 확장하는 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] Lamport, L. "How to make a multiprocessor computer that correctly executes multiprocess programs", IEEE Transactions on Computers 9, 29, 690-691, 1979.
- [2] Jeremy Manson, William Pugh, Sarita V. Adve " The Java Memory Model", In the Proceedings of the POPL 2005 ,pp378-391, 2005.
- [3] J. Gosling, B. Joy, G. Steele and G. Bracha, "The Java Language Specification Third Edition", Addison-Wesley, 2005.
- [4] Jeremy Manson and William Pugh. "The Java Memory Model Simulator", In Workshop on Formal Techniques for Java-like Programs, in association with ECOOP. June, 2002.