비통계적 학습 알고리즘을 사용하여 반복문 종료 분석하기

이원찬, 이광근 (서울대학교 프로그래밍 연구실)
Bow-Yaw Wang (INRIA and Academia Sinica)

1. 종료 분석이란?

무엇? ● 프로그램이 항상 종료함을 증명

```
i = j = 0;
while (i < 10 && j < 5) {
    if (*) i++;
    else   j++;
}
```

왜?
- 프로그램이 올바름을 보이는 마지막 단추
- 종료 안 하는 프로그램은 자원을 조용히 잠식
  - 메모리를 할당한 채 종료하지 않는 경우
  - 파일을 연 채 종료하지 않는 경우

어떻게?
- 반복문의 변화를 모두 포섭하는 이행 불변식(transition invariant) 찾기

  반복문 $\{\delta\}$ `while` κ `do` S `end`의 이행 불변식 $\mathcal{T}$는 다음 세 조건을 만족:

  (a) $Next(\delta, S) \Rightarrow \mathcal{T}$ (b) $Next(\mathcal{T}, S) \Rightarrow \mathcal{T}$ (c) $\mathcal{T} \Rightarrow \kappa$
- 이행 불변식이 종료를 증명하는 지 검사

  예) $\mathcal{T} = \underline{i < 10} \wedge j < 5 \wedge \underline{i' > i} \vee i < 10 \wedge \underline{j < 5 \wedge j' > j}$

  ➥ i'이 10이 되거나 j'이 5가 되면 반복이 끝남

2. 비통계적 학습 알고리즘으로 이행 불변식 찾기

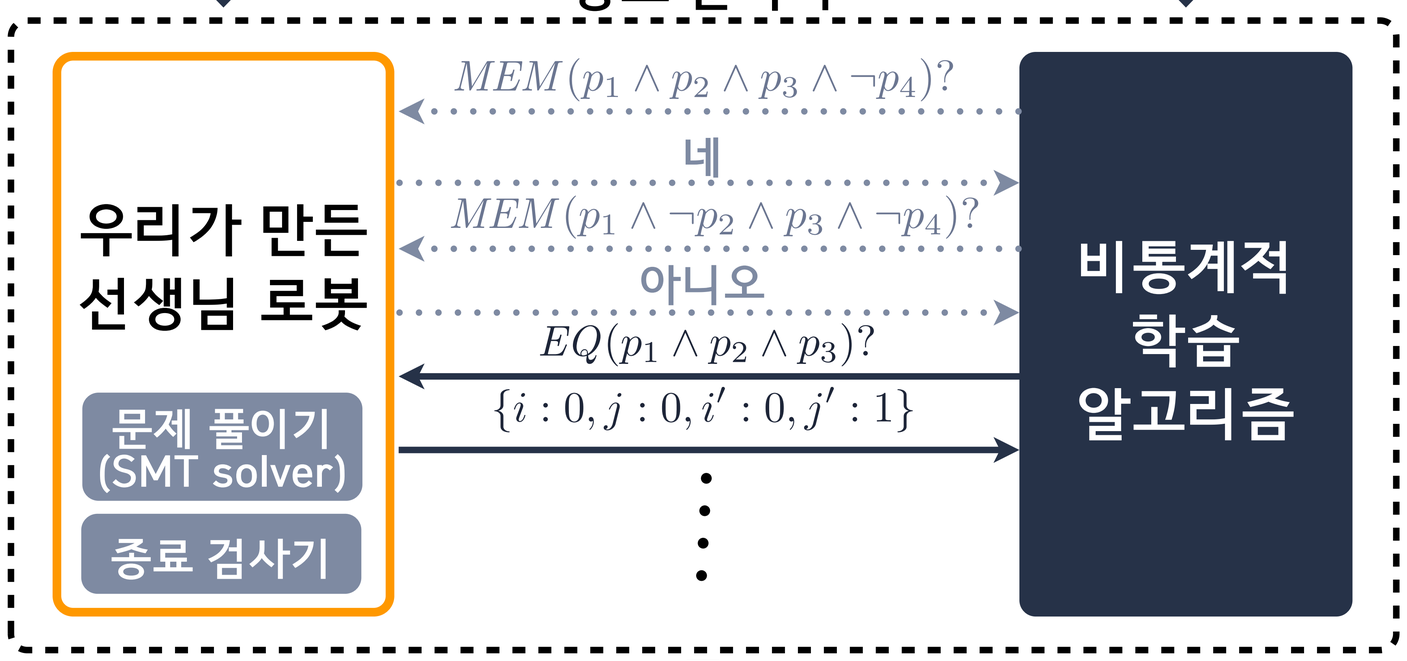
프로그램

```
i = j = 0;
while (i < 10 && j < 5) {
    if (*) i++;
    else   j++;
}
```

부품식 (atomic predicates)

$p_1 = i < 10 \quad p_2 = j < 5$
$p_3 = i' > i \quad p_4 = j' > j$

종료 분석기



학습 알고리즘의 두 가지 질문	선생님의 대답
$MEM(f)?$: f 가 불변식의 일부입니까?	• (c)를 어기는 경우: 아니오 • $f \Rightarrow Next(\delta, S)$ 인 경우: 네 • 그 외에: 네/아니오 임의로
$EQ(f)?$: f 가 불변식입니까?	• (a), (b), (c)를 만족하고 종료를 증명하는 경우: 네 • 만족 안 하는 조건 있으면: 반례를 돌려줌

$p_1 \wedge p_2 \wedge p_3 \vee p_1 \wedge p_2 \wedge p_4$

종료를 증명하는 이행 불변식

3. 실험 결과

- 윈도우즈 장치 드라이버에서 추출한 10개 예제
  - 2, 3, 9번은 종료하지 않음

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LoopFrog [1]	실패	실패	실패	0.0s	0.0s	실패	실패	실패	실패	실패
CTA [2]	초과	실패	실패	0.4s	0.4s	2.0s	8.9s	8.9s	실패	초과
우리분석기	**12s**	**실패**	**실패**	**0.1s**	**0.0s**	**7.3s**	**3.8s**	**3.1s**	**실패**	**0.0s**

[1] Loop summarization and termination analysis,
A. Tsitovich, N. Sharygina, C. M. Wintersteiger, and D. Kroening, *TACAS'11*
[2] Termination Analysis with Compositional Transition Invariants,
D. Kroening, N. Sharygina, A. Tsitovich, and C. M. Wintersteiger, *CAV'10*

* %.%s: %.%초만에 증명 성공
* 실패: 종료 증명 실패
* 초과: 시간 초과 (1시간)

4. 결론

- 종료 분석의 새로운 방법 제시
- 실제적인 예제들의 종료 증명 성공
- CAV'12 학회에 제출 예정

Programming Research Laboratory
http://ropas.snu.ac.kr
SEOUL NATIONAL UNIVERSITY
ACADEMIA SINICA