

SNU 4541.664A Program Analysis Spring 2005 Note 7

Prof. Kwangkeun Yi

요약 해석(*abstract interpretation*)

요약 해석: 아이디어

요약 해석 틀: 개관

요약 해석 틀: 내용

요약 해석 틀: Theorem들

요약해석(*abstract interpretation*)

- 프로그램 분석 = 프로그램의 요약 실행
- 분석할 프로그램의 의미(실행)의 요약본 계산

일상에서의 요약해석

$128 \times 22 + (1920 \times -10) + 4$ 는 어떤 수 일까요?

- 0.1초 후: “정수입니다.”
- 2초 후: “짝수입니다.”
- 3초 후: “-10,000과 1,000 사이의 수입니다.”
- 5초 후: “음수입니다.”
- 1시간 후: “-1,6380입니다.”

요약 해석(*abstract interpretation*)의 파워

프로그램 분석기 디자인의 눈을 뜨게한 가장 강력하고 간단한 틀(*framework*).

- “틀”: 넣으면 좋은게 나온다, 재사용
- “가장 강력한”: 모든 분석이 이 틀안에서 이해됨 [CC95b,CC93,CC95,Co97b].
- “간단”: 틀 사용법이 간단
- “눈을 뜨게한”: 어떤 분석이건 결국은 xx를 요약한 것

요약의 필요성

분석할 프로그램의 요약된 실행 = 그 소스언어의 요약된 의미 구조(*semantics*)

- 요약이 필요한 이유?
 - 요약없이 실행해 보면(simulation)서 모두를 포섭할 수 없다
 - 요약없이 분석이 끝이 없다
- 요약은 생략이 아니다
 - 실제: $\{2, 4, 6, 8, \dots\}$
 - “짝수”(요약) vs “4의 배수”(대충)

요약 해석으로 분석하기

는 다음을 하는 것

1. 프로그램의 실제 실행의 정의: 어떻게 무엇으로
2. 프로그램의 요약 실행의 정의: 어떻게 무엇으로
3. 올바른 요약 실행인지 확인: 어떻게 무엇으로
4. 요약 실행을 계산하는 방법: 어떻게 무엇으로

요약해석의 주요 논문[CC77,CC79,CC92a,CC92b]의 정리

요약 해석 틀

실제 실행	$\llbracket C \rrbracket = \text{fix } F \in D$
요약 실행	$\llbracket \hat{C} \rrbracket = \lim_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\perp_{\hat{D}}) \in D$
올바름	$\llbracket C \rrbracket \approx \llbracket \hat{C} \rrbracket$
구현	$\llbracket \hat{C} \rrbracket$ 의 자동계산

틀이 요구하는 것:

- D 와 \hat{D} 사이의 어떤 관계
- $F \in D \rightarrow D$ 와 $\hat{F} \in \hat{D} \rightarrow \hat{D}$ 의 어떤 관계

틀이 보장하는 것:

- 올바름: $\llbracket C \rrbracket \approx \llbracket \hat{C} \rrbracket$
- 구현법: $\llbracket \hat{C} \rrbracket$ 자동 계산하는 법
- 자유로움: 맘대로 이 안에서

요약 해석 디자인: step 1

프로그램의 실제 실행을 정의

- 의미공간(*semantic domain*) CPO D 를 정의
- 실제 실행은 연속 함수 $F \in D \rightarrow D$ 의 최소 고정점(*least fixed point*) $lfp F$ 으로 정의

$$lfp F = \bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} F^i(\perp_D)$$

계획: $lfp F$ 를 포섭하는 요약된 물건 구하기

요약 해석 디자인: step 2

프로그램의 요약된 실행을 정의

- 요약된 의미공간(*abstract domain*) CPO \hat{D} 을 정의
 - D 와 \hat{D} 은 갈로아 연결(*Galois connection*)
- 요약된 실행함수 $\hat{F} \in \hat{D} \rightarrow \hat{D}$ 를 정의
 - \hat{F} 는 단조 함수(*monotonic function*)거나
 - \hat{F} 는 팽창 함수(*extensive function*)

계획: $lfp F$ 를 포섭하는 요약된 물건을 \hat{F} 가지고 구하기

요구1: 갈로아 연결(*Galois connection*)

D 와 \hat{D} 은 갈로아 연결(*Galois connection*)

$$D \begin{array}{c} \xleftarrow{\gamma} \\ \xrightarrow{\alpha} \end{array} \hat{D}$$

되어 있어야

- 갈로아 연결의 정의:

$$\forall x \in D, \hat{x} \in \hat{D} : \alpha(x) \sqsubseteq \hat{x} \iff x \sqsubseteq \gamma(\hat{x}).$$

- 갈로아 연결의 의미:
 - \hat{D} 에서 큰 원소일수록 보다 많은 것을 의미
 - α 는 실제를 요약하고(*abstraction function*)
 - γ 는 요약한 원소가 뜻하는 실제를 정의(*concretization function*).

계획: 요약 분석은 $\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\perp)$ 의 윗뚜껑(*upper bound*)을 계산하기

요구2: \hat{F} 의 성질

- 요약된 실행함수 \hat{F} 는 단조(*monotonic*) 함수거나:

$$\forall \hat{x}, \hat{y} \in \hat{D} : x \sqsubseteq y \Rightarrow \hat{F}(x) \sqsubseteq \hat{F}(y)$$

팽창(*extensive*) 함수이어야:

$$\forall \hat{x} \in \hat{D} : x \sqsubseteq \hat{F}(x).$$

계획: 요약 분석은 $\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\perp)$ 의 윗뚜껑(*upper bound*)을 계산하기

요구3: F 와 \hat{F} 의 관계

- 실제 실행함수 F 와 요약된 실행함수 \hat{F} 사이는

$$\alpha \circ F \sqsubseteq \hat{F} \circ \alpha, \quad \text{다시 말해, } F \circ \gamma \sqsubseteq \gamma \circ \hat{F}$$

이거나

- 실제 실행함수 F 와 요약된 실행함수 \hat{F} 사이는

$$\alpha(f) \sqsubseteq \hat{f} \text{ 이면 } \alpha(F f) \sqsubseteq \hat{F} \hat{f}$$

이어야

계획: 요약 분석은 $\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\hat{\perp})$ 의 윗뚜껑(upper bound)을 계산하기

결과: 안전한 요약 분석

요약 분석 = $\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\hat{\perp})$ 의 윗뚜껑(*upper bound*)을 유한시간내에 계산하기

- 그러한 윗뚜껑(*upper bound*) \hat{A} 는 항상

$$\alpha(\text{lfp}F) \sqsubseteq \hat{A}, \quad \text{다시 말해}$$

$$\text{lfp}F \sqsubseteq \gamma\hat{A}$$

를 만족: Theorem[fixpoint-transfer, fixpoint-transfer2]

- 즉, 분석결과 \hat{A} 가 실제실행 $\text{lfp}F$ 을 “포섭한다.”

$\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\hat{\perp})$ 의 윗뚜껑 계산법

- 요약된 의미공간(*abstract semantic domain*) \hat{D} 의 높이가 유한하다면, 곧바로

$$\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\hat{\perp})$$

를 계산

- 요약된 의미공간(*abstract semantic domain*) \hat{D} 의 높이가 무한하다면, 다음을 만족하는

$$\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} (\hat{F}^i(\hat{\perp})) \sqsubseteq \lim_{i \in \mathbb{N}} (\hat{X}_i)$$

유한한 체인 $\{\hat{X}_i\}_i$ 를 계산

유한 체인 $\{\hat{X}_i\}_i$ 찾기

$$\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} (\hat{F}^i(\hat{\perp})) \sqsubseteq \lim_{i \in \mathbb{N}} (\hat{X}_i)$$

인 유한 체인 $\{\hat{X}_i\}_i$?

- \hat{F} 가 단조(monotonic) 함수이면, \hat{F} 에 축지법(widening operator) ∇ 를 적용한 체인:

$$\begin{aligned} \hat{X}_0 &= \hat{\perp} \\ \hat{X}_{i+1} &= \hat{X}_i & \hat{F}(\hat{X}_i) \sqsubseteq \hat{X}_i \text{ 이면} \\ &= \hat{X}_i \nabla \hat{F}(\hat{X}_i) \text{ 아니면,} \end{aligned}$$

축지법 ∇ 의 조건

조건

- $\forall a, b \in \hat{D} : (a \sqsubseteq a \nabla b) \wedge (b \sqsubseteq a \nabla b)$
- \forall 증가하는 체인 $\{x_i\}_i$: 체인 $y_0 = x_0, y_{i+1} = y_i \nabla x_{i+1}$ 는 유한

이면

- $\{\hat{X}_i\}_i$ 은 유한 체인
- 그 끝($\hat{F}(\hat{X}) \sqsubseteq \hat{X}$ 인 \hat{X} (why?))은

$$\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} (\hat{F}^i(\hat{\perp})) \sqsubseteq \lim_{i \in \mathbb{N}} (\hat{X}_i)$$

을 만족: Theorem[widen's safety]

축지법 결과 다듬기

\hat{F} 가 단조(*monotonic*) 함수라면,

- 축지법을 써서 계산된 $\hat{A} \stackrel{\text{let}}{=} \lim_{i \in \mathbb{N}} (\hat{X}_i)$ 를
- 좁히기(*narrowing operator*) Δ 을 써서 정교하게 다듬을 수 있다.
- 다음의 체인 $\{\hat{Y}_i\}_i$ 을 계산

$$\begin{aligned}\hat{Y}_0 &= \hat{A} \\ \hat{Y}_{i+1} &= \hat{Y}_i \Delta \hat{F}(\hat{Y}_i)\end{aligned}$$

좁히기 Δ 의 조건

조건

- $\forall a, b \in \hat{D} : x \sqsupseteq y \Rightarrow x \sqsupseteq (x \Delta y) \sqsupseteq y$
- \forall 감소하는 체인 $\{x_i\}_i$: 체인 $y_0 = x_0, y_{i+1} = y_i \Delta x_{i+1}$ 는 유한

이면

- $\{\hat{Y}_i\}_i$ 은 유한 체인
- 그 끝은

$$\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} (\hat{F}^i(\hat{\perp})) \sqsubseteq \lim_{i \in \mathbb{N}} (\hat{X}_i)$$

을 만족: Theorem[narrow's safety]

Fixpoint Transfer Theorems

왜 위와 같이만 하면 올바른 분석이 되는가?

Theorem (fixpoint transfer)

D 와 \hat{D} 는 각각 CPO이고 갈로아 연결이 되어있다. 함수 $F : D \rightarrow D$ 는 연속함수이고 $\hat{F} : \hat{D} \rightarrow \hat{D}$ 는 단조함수이거나 팽창함수이다. $\alpha \circ F \sqsubseteq \hat{F} \circ \alpha$ 이다. 그러면,

$$\alpha(\text{lfp}F) \sqsubseteq \bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\hat{\perp}).$$

Theorem (fixpoint transfer2)

CPO D 와 \hat{D} 는 갈로아 연결 $D \xrightleftharpoons[\alpha]{\gamma} \hat{D}$ 되어있다. $F : D \rightarrow D$ 이고 $\hat{F} : \hat{D} \rightarrow \hat{D}$ 이다. $\alpha f \sqsubseteq \hat{f}$ 이면 $\alpha(F f) \sqsubseteq \hat{F} \hat{f}$ 이다. 그러면,

$$\alpha(\text{lfp}F) \sqsubseteq \bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\hat{\perp}).$$

Widening/Narrowing Theorems

왜 위와 같이만 하면 올바른 분석이 되는가?

Theorem (widen's safety)

\hat{D} 는 CPO 이고, $\hat{F}: \hat{D} \rightarrow \hat{D}$ 는 단조(monotonic) 함수이고, $\nabla: \hat{D} \times \hat{D} \rightarrow \hat{D}$ 는 축지법 조건을 만족하고 축지해서 정의되는 체인 $\{\hat{X}_i\}_i$ 은 유한하고 그 끝은 $\lim_{i \in \mathbb{N}} \hat{X}_i \sqsupseteq \bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\hat{\perp})$ 이다.

Theorem (narrow's safety)

\hat{D} 는 CPO 이고, $\hat{F}: \hat{D} \rightarrow \hat{D}$ 는 단조(monotonic) 함수 이고, $\Delta: \hat{D} \times \hat{D} \rightarrow \hat{D}$ 는 좁히기 조건을 만족하고 $\hat{F}(\hat{A}) \sqsubseteq \hat{A}$ 이면, 좁히기로 정의되는 체인 $\{\hat{Y}_i\}_i$ 은 유한하고 그 끝도 $\lim_{i \in \mathbb{N}} \hat{Y}_i \sqsupseteq \bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \hat{F}^i(\hat{\perp})$ 이다.