Absztrakció:
Absztrakt interpretáció.
Predikátum absztrakció

Majzik István
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Bevezető

- A szoftverek bonyolultak: Hatalmas állapottér
  - Nagy értékkészletű változók (int, float, …)
  - Ciklusok
  - Függvényhívások, rekurzió
  - Objektumok dinamikus létrehozása és törlése
  - …
- Hogyan illeszthető az ellenőrzés a megismert „egyszerű” technológiákhoz?
  - Korlátozások bevezetése, pl.:
    - Ciklusleftások számának korlátozása (és így kihajtogatás)
    - Korlátos modellellenőrzés (pl. CBMC)
  - Absztrakció, pl.:
    - Absztrakt interpretáció: Statikus analízishez
    - Predikátum absztrakció: Program modellellenőrzéshez

Absztrakt interpretáció: absztrakt statikus analízis

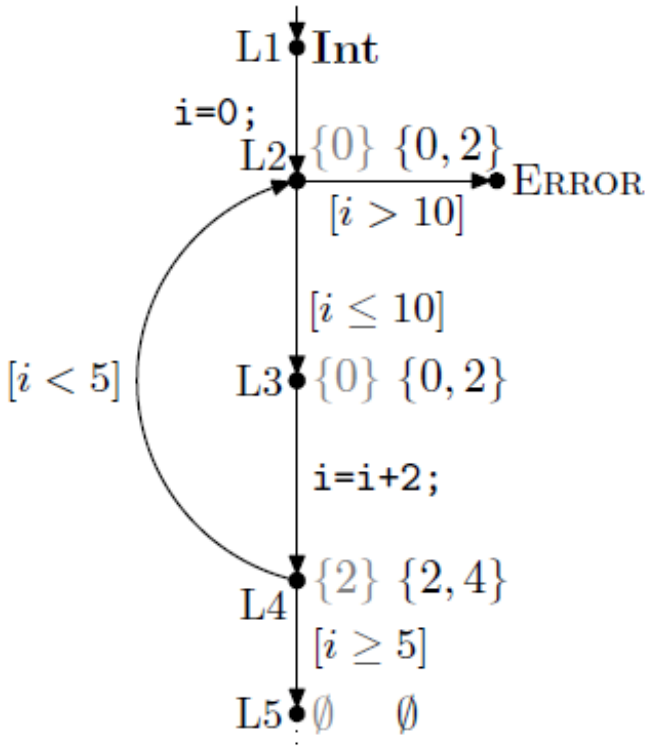
Statikus analízis (ismétlés)

- Alapötlet:
  - Változók lehetséges értékeinek terjesztése
  - Iteratív (amíg nem változik az értékkészlet)
- Felhasználási példák: Hibák detektálása
  - Tömbindexek túlcímzése
  - Nullával való osztás
  - Függvények értelmezési tartományának túllépése
  - …
- Absztrakció:
  - A program konkrét interpretációja helyett absztrakt interpretációja (kisebb bonyolultságú elemzési feladat)

Konkrét interpretáció

- Program példa:

```
int i=0;
do {
        assert (i<=10);
        i = i+2;
} while (i<5);
```



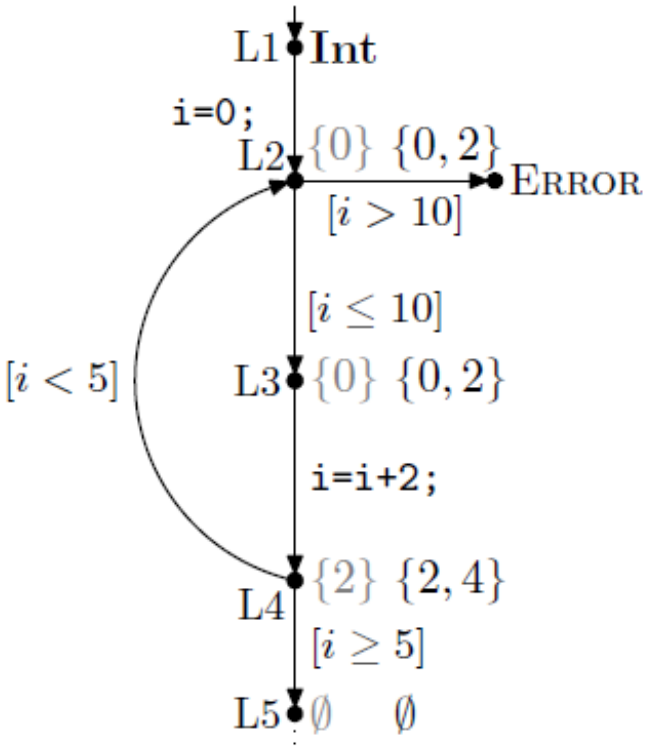
1. Konkrét interpretáció:
   - CFG jelölése: i értékei
     - 1. lépés: szürke
     - 2. lépés: fekete
     - L2 esetén unió (L1, L4-től)
     - Folytatás fixpontig

Absztrakció

- Konkrét interpretáció:
  - Változók értékhalmazainak iteratív terjesztése
  - Hátrány: Nagy méretű halmazok lehetnek
- Absztrakt interpretáció:
  - A konkrét domén leképzése absztrakt doménre
    - Pl. tartományra képezni le az adatértékeket (értékhalmazt)
    - Pontos értékek „elvesznek”
  - Az absztrakt domén terjesztése az interpretáció során
    - Pl. tartományok uniójára való leképzés
- Analízis az absztrakt domén segítségével
  - Biztonságos a konkrét-absztrakt domén leképzés:
    - Az absztrakt domén lefedi a konkrét domént („érték nem vész el”)
    - De az absztrakt domén reprezentálhat olyan értékeket, amik nem fordulhatnak elő a konkrét esetben

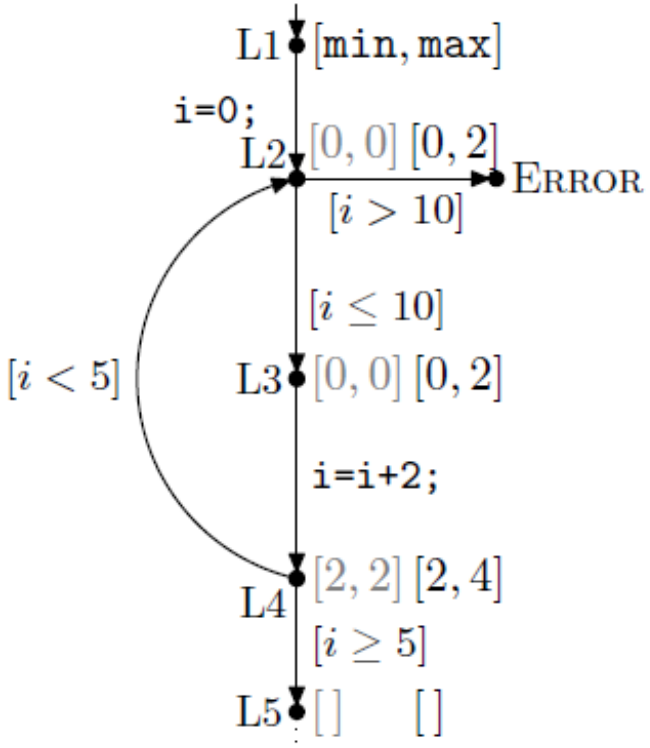
Absztrakt interpretáció példa: Intervallumok

1. Konkrét interpretáció:



1. lépés: szürke
2. lépés: fekete

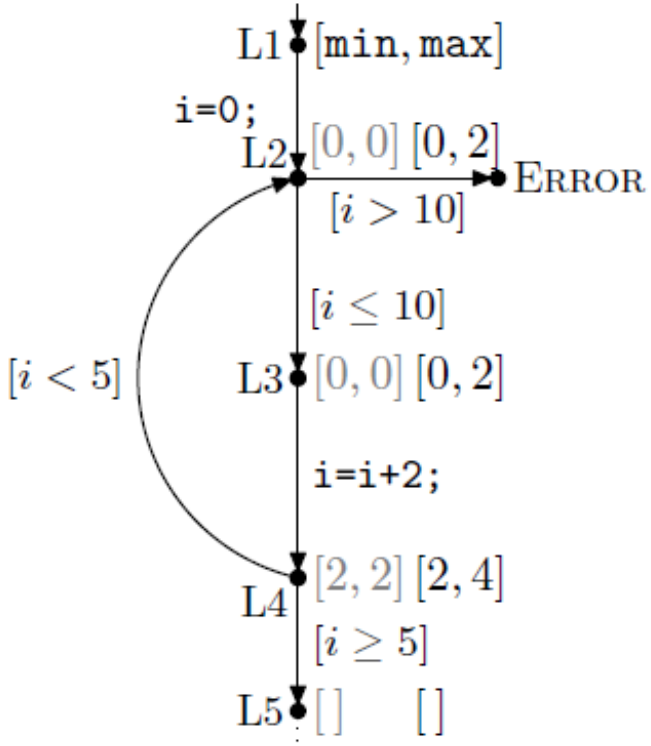
2. Absztrakt interpretáció:



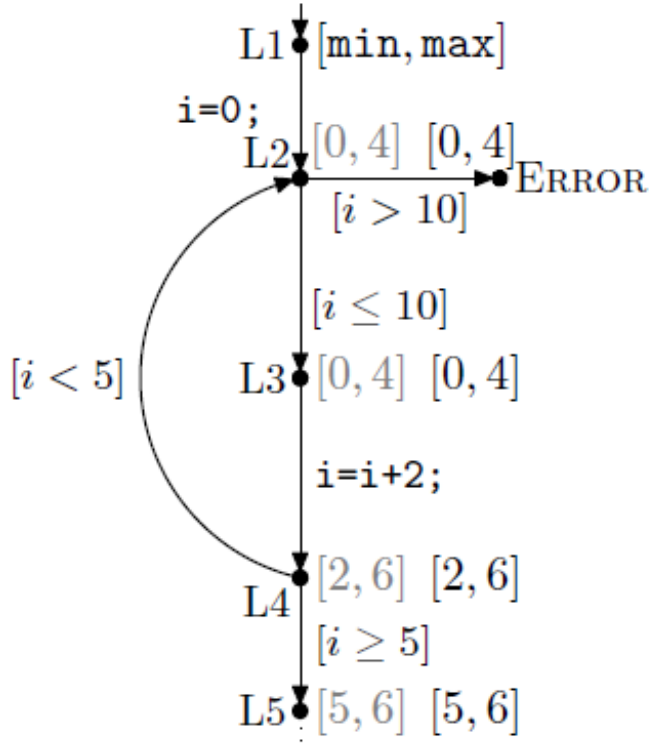
L2-nél intervallum egyesítés:
[0,0] és [2,2] esetén [0,2]
Így elveszett az az információ,
hogy i értéke nem lehet 1

Absztrakt fixpont elérése

2. Absztrakt interpretáció:



3. Absztrakt fixpont:



Intervallumok tovább nem nőnek

Absztrakt domének meghatározása

- Cél: Kijelentéseket tudjunk tenni numerikus változókra
  - Precízebb domén: Kevesebb információvesztés
  - Sokféle absztrakciót használhatunk (alkalmazásfüggő)
- Nem-relációs absztrakt domének:
  Változók közötti relációk nem őrizhetők meg
  (pl. x<y nem őrizhető meg az absztrakt doménben)
  - Előjelek: {Pos, Neg, Zero}
  - Intervallumok: Finomabb, mint az előjelek doménje
  - Paritás: Páros, páratlan
  - Kongruenciák: (v mod k) értékei alkotják
    - Egyenlőtlenségek kimutathatók
    - Pl. ha (x mod k) ≠ (y mod k) kimutatható, akkor az 1/(x-y) művelet nem vezet nullával való osztási hibához

További absztrakt domének

- Relációs domének: Relációk megtartása
  - Difference Bound Matrices (DBM):
    - $x-y \leq c$, $x \leq c$ és $-x \leq c$ formájú egyenlőtlenségek konjunkciója jelöli ki a doméneket (c egész)
    - Valósidejű rendszerek ellenőrzéséhez alkalmazzák (órák különbségei)
  - Octagon:
    - $ax+by \leq c$, alakú egyenlőtlenségek, ahol a és b -1,0,1 lehet, c egész
  - Octahedra: Egyenlőtlenségek több mint 2 változóra
  - Polyhedra:
    - $a_1x_1 + a_2x_2 + \ldots + a_nx_n \leq c$, alakú egyenlőtlenségek (a_i és c is egészek)
- Hierarchia a precizitás szempontjából:
  - Előjelek, Intervallumok, DBM, Octagons, Octahedra, Polyhedra
  - Használhatók egyenlőtlenségek vizsgálatára (pl. ciklus feltételek, valósidejű beágyazott rendszerek esetén)
- Ellipsoid domén: $ax^2+bxy+cy^2 \leq n$
  - Digitális szűrőkhöz használják
- Új absztrakt domének is definiálhatók (alkalmazásfüggő)

Predikátum absztrakció

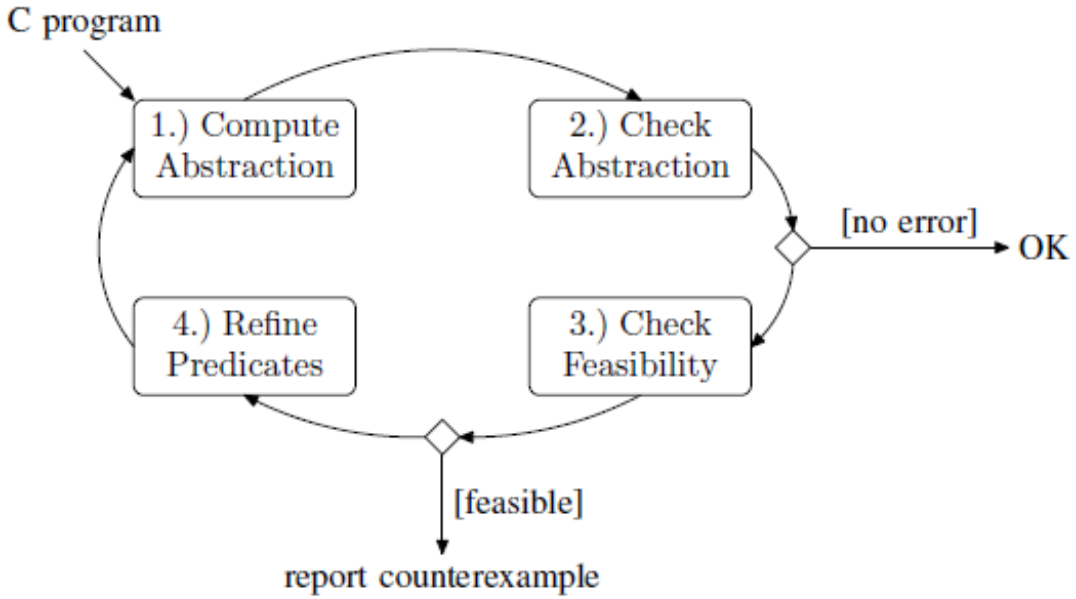
Bevezetés

- Legelterjedtebb absztrakciós technika a szoftver modellellenőrzésben
  - Ld. a SLAM eszközkészlet sikere
- Absztrakció:
  - Logikai predikátumok a program állapottér particionálására
  - Különbség az absztrakt interpretációhoz képest: Itt a programra specifikus lehet az absztrakció
  - Kihívás: A megfelelő predikátumok megtalálása
- Absztrakció finomítás:
  - Modellellenőrzés az absztrakt állapottéren: Hamis ellenpélda adódhat
  - Hamis ellenpélda alapján újabb predikátumok: Precízebb absztrakció

Ellenpélda által irányított absztrakció finomítás

Counterexample Guided Abstraction Refinement

1. Absztrakció
2. Verifikáció: Ellenőrzés az absztrakt programon
3. Szimuláció: Az ellenpélda vizsgálata
4. Predikátumfinomítás, ha hamis ellenpélda volt

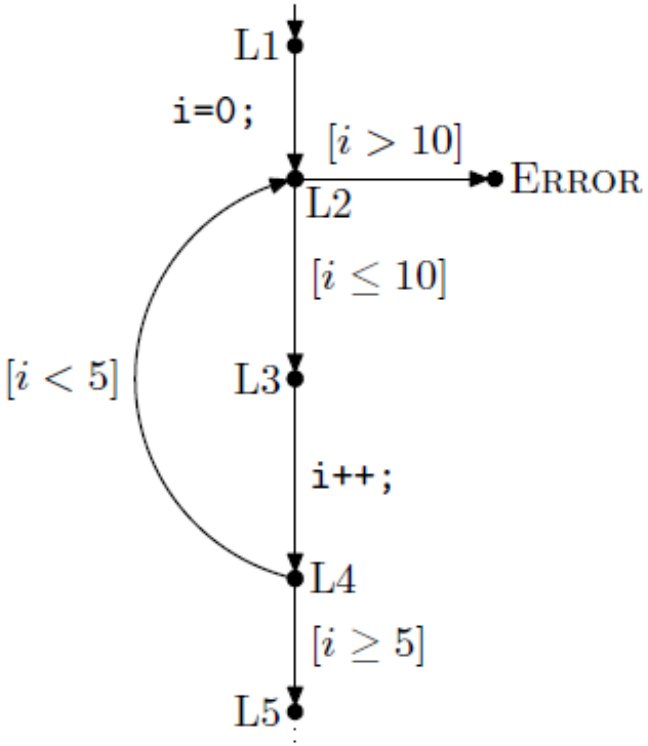


1. lépés: Predikátum absztrakció

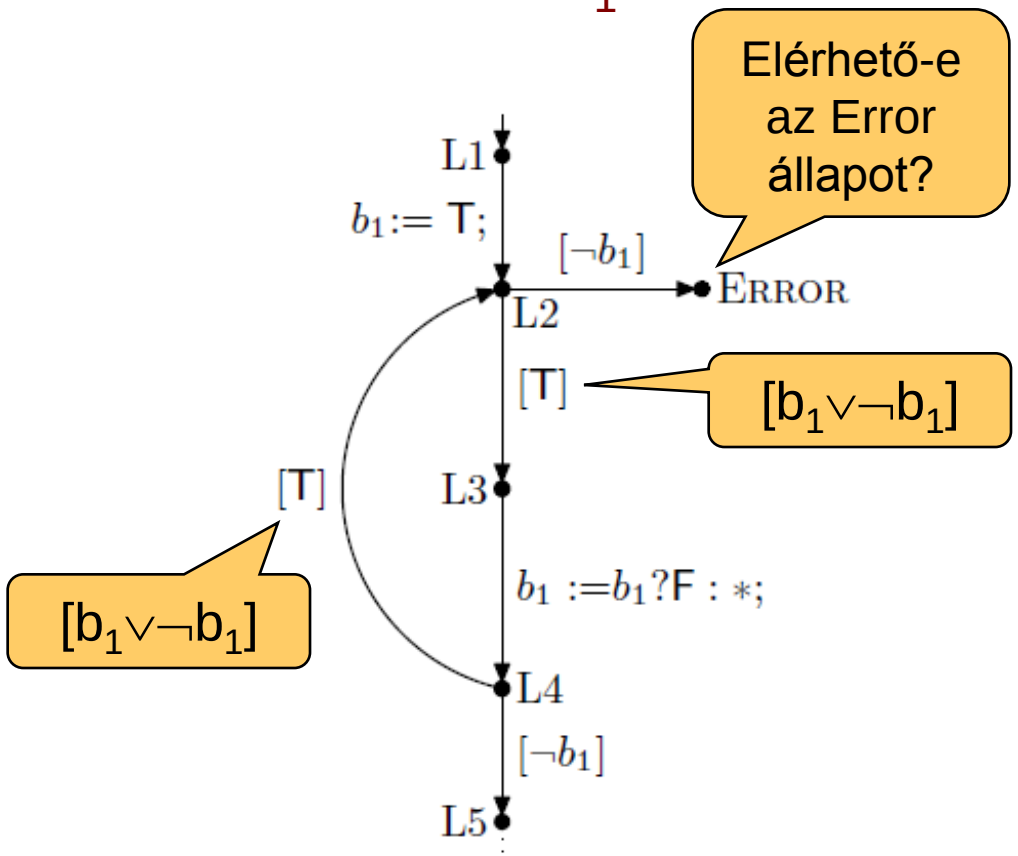
- Program (programgráf):
  - L1, L2, … programhelyek utasításokkal
  - R_{L1}, R_{L2}, … tranzíció relációk programállapotok között Li végrehajtásával
  - Ezek uniója: R tranzíció reláció programállapotok között
- Predikátum absztrakció: R' konstruálása
  - Predikátumok felírása a program változóira (pl. i==0)
  - Állapotok particionálása: Predikátumok igaz/hamis értéke alapján
    - A partíciók definiálják az absztrakt állapotokat
    - Átmenetek az absztrakt állapotok között:
      - Csak ha van átmenet a megfelelő konkrét állapotok között
    - Eredmény: Boole program (predikátum értéke Boole változóba)
      - Csak Boole változók, de eredeti vezérlési utasítások (függvények is)
  - Egzisztenciális jellegű absztrakció a programon, biztonságos az elérhetőségi tulajdonságokra
    - Ami a konkrét programban elérhető, az az absztraktban is elérhető (de az absztrakt programban több útvonal lehetséges)

1. Predikátum absztrakció

Konkrét program (int i):



Absztrakció b_1 változóra:



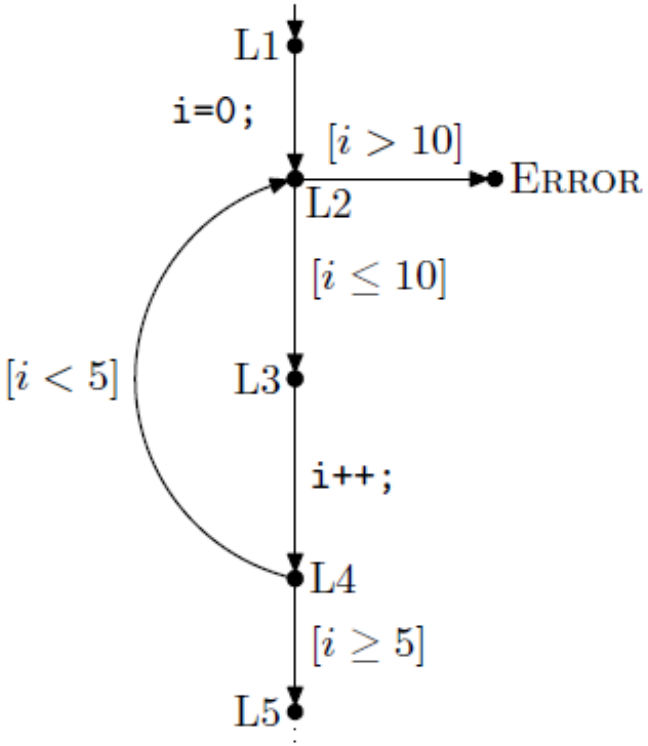
Predikátum: (i==0)

A predikátum értéke b_1 változó értéke

* jelöli az ismeretlen értéket

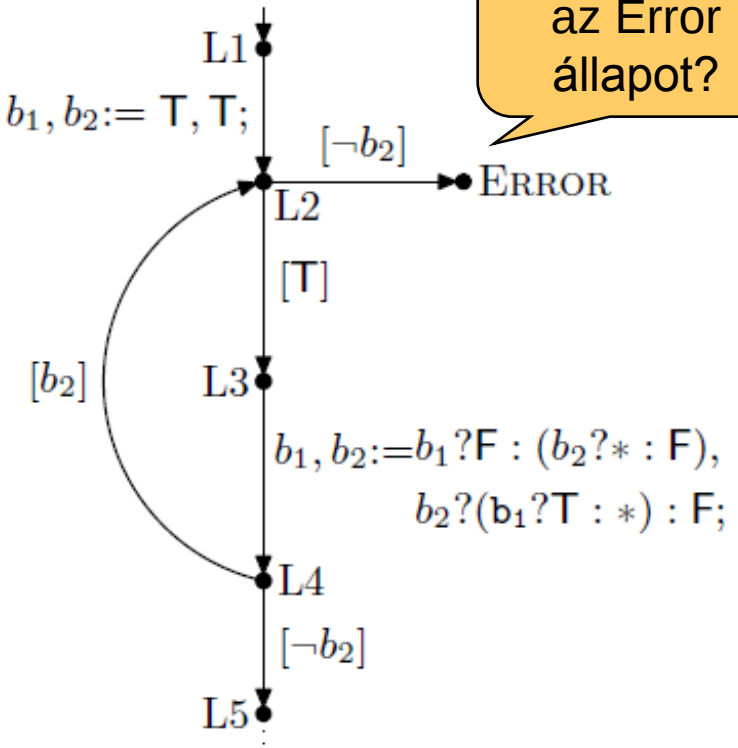
Finomabb absztrakció

Konkrét program (int i):



Absztrakció b_1, b_2 változóra:

Elérhető-e az Error állapot?



Predikátum b_1-hez: (i==0)
Predikátum b_2-höz: (i<5)

Absztrakt program származtatása

- Automatikus absztrakció: Tranzíció reláció számítása
  - El kell dönteni, hogy egy absztrakt állapotból az adott utasítással milyen absztrakt állapotba juthatunk el
    - Ez határozza meg a Boole változók értékének változását
    - Pl. L3→L4 esetén (i++ utasítás):
      $\neg(i==0)\wedge\neg(i<5)$ –ből nem lehet tranzíció $\neg(i==0)\wedge(i<5)$ állapotba
- Hátrány:
  - n predikátum esetén 2^n absztrakt állapot lehet
  - $(2^n)^2$ döntés kell az absztrakt állapotok közötti absztrakt tranzíció reláció számításához
- Közelítés: Cartesian abstraction
  - Minden predikátumra külön-külön absztrakció számítás
  - Az eredményül kapott absztrakt relációk szorzata
- Döntések számítása:
  - Elsőrendű logikai tételbizonyítók, aritmetikával kombinálva
    - Pl. ZAPATO, Simplify
  - SAT (SMT) megoldók bit-szintű formula kezeléshez

2. lépés: Verifikáció

- Elérhetőségi probléma: Boole programokra eldönthető
- Technológia: Szimbolikus modellellenőrzők
  - BDD alapú megvalósítások
  - SAT alapú eszközök: Csak korlátos ellenőrzésre
  - Speciális eszközök:
    - Quantified Boolean Formulas (QBF) megoldók
- Példa: Error nem elérhető az előbbi konkrét programban
  Modellellenőrzés az absztrakt programokon:
  - P={b_1} absztrakció esetén, ahol b_1: (i==0)
    - L2 állapot esetén fennálló absztrakt állapotok: b_1, $\neg b_1$
    - Így Error állapot elérhető (ez hamis ellenpélda)
  - P={b_1, b_2} absztrakció esetén, ahol b_1: (i==0), b_2: (i<5)
    - L2 állapot esetén fennálló absztrakt állapotok: $b_1 \wedge b_2$, $\neg b_1 \wedge b_2$
    - Így Error állapot nem érhető el

3. lépés: Szimuláció

- Modellellenőrzés eredménye:
  - Nincs ellenpélda: OK (konkrét programban sincs)
  - Van ellenpélda: Hamis lehet
- Ellenpélda (útvonal) ellenőrzése
  - Szimuláció a konkrét programon
  - Hamis ellenpélda: Nem bejárható útvonal
- Példa az útvonal ellenőrzésére
  - P={b_1} esetén (L1, L2, L3, L4, L2, Error) útvonal
    - Az absztrakt programban bejárható (Error elérhető)
    - Konkrét programban nem járható be
- Technológia: Szimbolikus szimuláció
  - Absztrakt állapot „terjesztése” az ellenpélda alapján bejárva a program állapotokat

4. lépés: Absztrakció finomítás

- Hamis ellenpéldák forrásai:
  - Hamis útvonal: A predikátumok nem elégségesek az állapotok megfelelő megkülönböztetéséhez
  - Hamis átmenetek: Közelítő absztrakció (Cartesian)
- Finomítás kivitelezése:
  - Hamis útvonalra:
    - További predikátumok (heurisztikus) hozzáadása
  - Hamis átmenetekre:
    - Kényszerek hozzáadása az absztrakt átmenet relációhoz
- Példa a hamis útvonalra:
  - P={b_1} absztrakció esetén (L1, L2, L3, L4, L2, Error) hamis ellenpélda
    - Itt (i==0) és (i<5) predikátumok elégségesek, hogy az absztrakt programban elkerülhető legyen (b_1, b_2 absztrakció)

Absztrakciót támogató eszközök

Statikus analízis, modellellenőrzés, BMC

Tool name	Tool developer	Symbolic analysis	Abstraction	Counterexample	BMC	Concurrency	Languages
ASTRÉE	École Normale Supérieure	×	×				C (subset)
CODESONAR	Grammatech Inc.	×	×				C, C++, ADA
PolySpace	PolySpace Technologies	×	×			×	C, C++, ADA, UML
PREVENT	Coverity	×	×			×	C, C++, Java
BLAST	UC Berkeley/EPF Lausanne	×	×	×		×	C
F-SOFT (abs)	NEC	×	×	×			C
Java PathFind.	NASA	×		×	×	×	Java
MAGIC	Carnegie Mellon University	×	×	×		×[1]	C
SATABS	Oxford University	×	×	×		×	C, C++, SpecC, SystemC
SLAM	Microsoft	×	×	×		×	C
SPIN	Bell Labs[2]			×	×	×	PROMELA, C[3]
ZING	Microsoft Research			×	×	×	ZING (object oriented)
CBMC	CMU/Oxford University	×		×	×		C, C++, SpecC, SystemC
F-SOFT (bmc)	NEC	×		×	×		C
EXE	Stanford University	×		×	×		C
SATURN	Stanford University	×		×	×		C

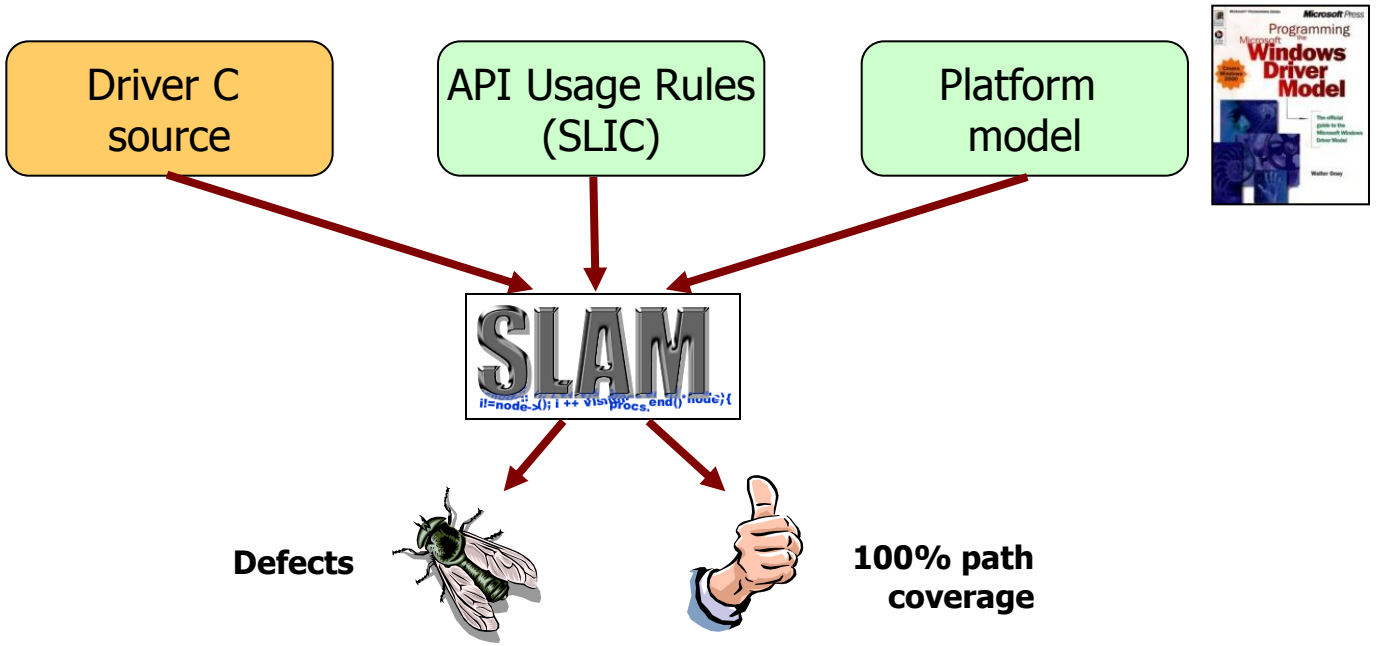
Eszköz ajánló: SLAM

Software, Languages, Analysis and Model checking project
SDV 1.0 (Static Driver Verifier, 2002)
SLAM 2 (WDK kiegészítéseként)

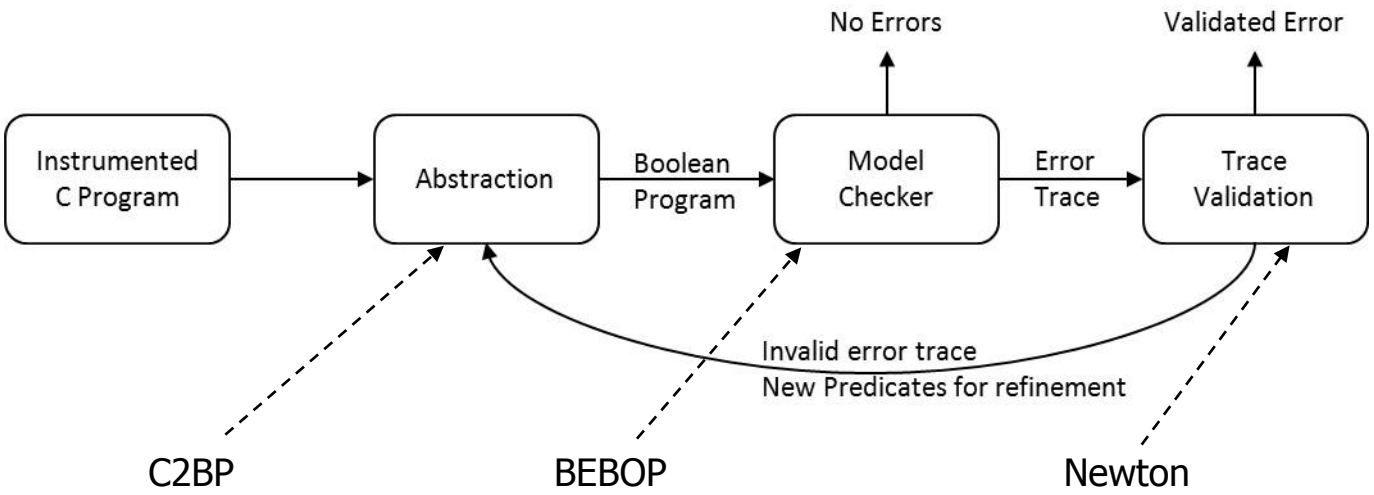
Ld: Kiss Ákos referátuma, 2010.

A SLAM célkitűzései

- Motiváció: Hibás driverek megzavarhatják az OS működését
  - Pl: hibás zárolások erőforrásokon (nincs zárolva, nincs felszabadítva, …)
- Megoldás:
  - Szabályokkal leírható a helyes használat (pl. zárhasználat „állapotgépe”)
  - Ennek teljesülését ellenőrzi a SLAM a forráskódon
  - Forráskód absztrakciót használ: Boole-program állapotainak vizsgálata
  - Hibás (szabályokhoz nem illeszkedő) utakat vissza kell ellenőrizni!



A SLAM működése




```
do {

   AcquireLock(&devices>writeListLock);

   deviceNoOld = deviceNo;
   more = devices->Next;

   if (more){
        ReleaseLock(&devices->writeListLock);
        ...
        deviceNo++;
   }
} while (deviceNoOld != deviceNo);

ReleaseLock(&devices->writeListLock);
```

Predikátum absztrakció:

```
do {
   deviceNoOld = deviceNo;
   more = devices->Next;
   if (more){
        deviceNo++;
   }
} while (deviceNoOld != deviceNo);
```

```
do {
   b = true;

   if (*){
        b = b ? false : *;
   }
} while (!b);
```

Eszköz ajánló: BLAST

Berkeley Lazy Abstraction Software Verification Tool
Open Source (Apache License 2.0)

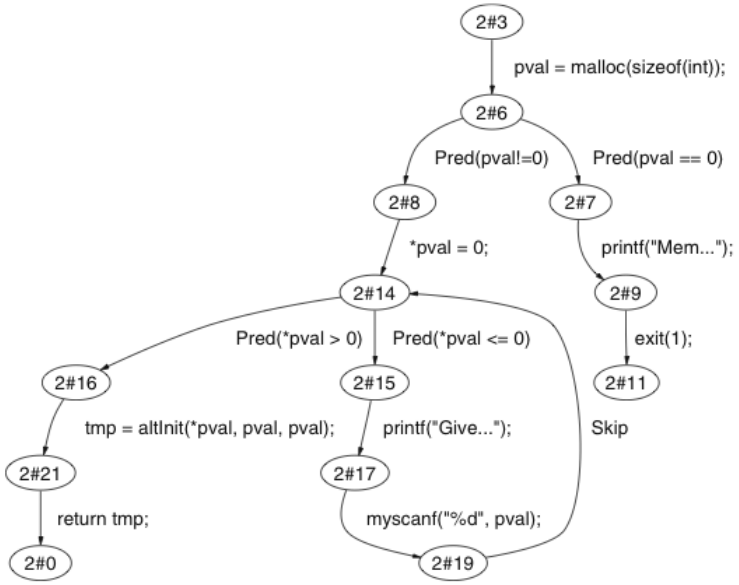
Ld: Marosi Attila Csaba referátuma, 2010.

A BLAST célkitűzése

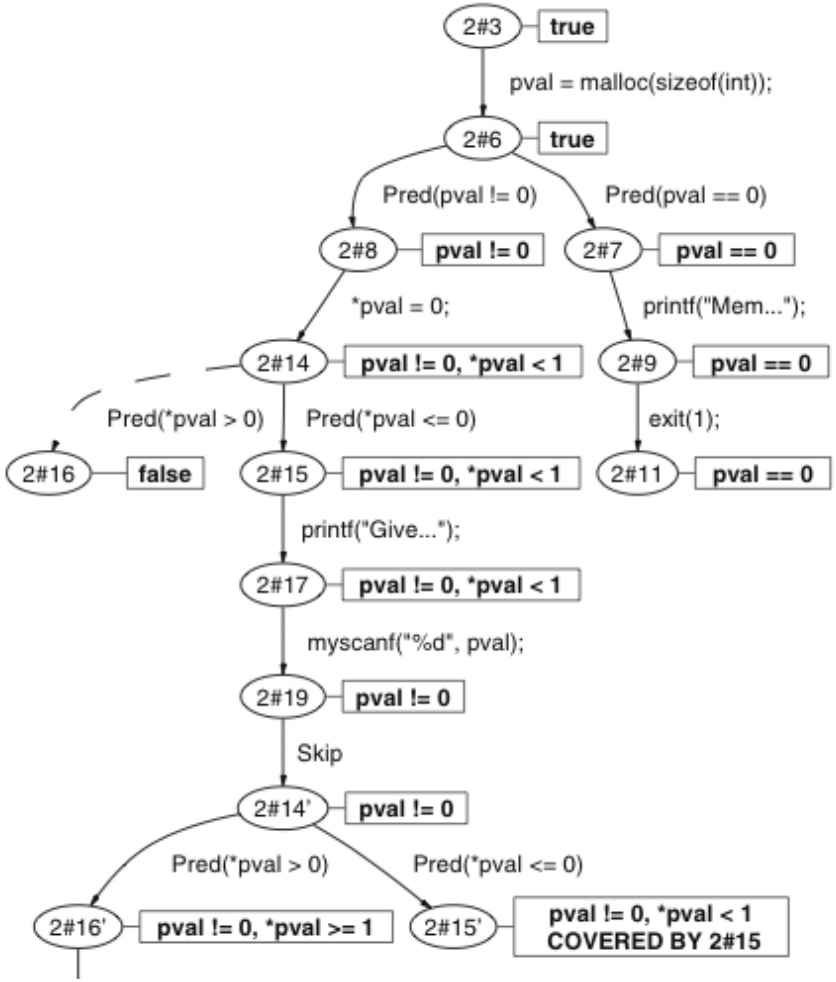
- C programok elérhetőségi tulajdonságának automatikus ellenőrzése
  - C forráskódból modell generálása
  - Megadott követelmények alapján modellellenőrzés
- Bemenet: Címkézett C forráskód
  - Blast Query Language monitorkifejezés
- Kimenet:
  - Jelentés a követelmény teljesüléséről
  - Ellenpélda (trace)
  - Sorozatos finomítás (korlát: memória, futásidő)

A BLAST működése

Control flow automata



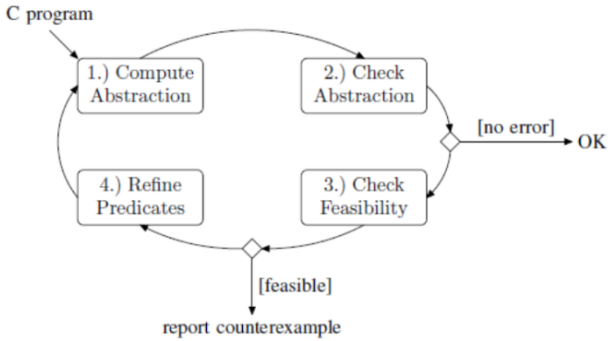
Abstract reachability tree



Boole kifejezések

A BLAST működése

- CEGAR: Counterexample Guided Abstraction Refinement



- Lusta predikátum absztrakció:
  - Csak a hibához vezető úton található csúcsoknál történik az Abstract Reachability Tree finomítása
- Korlátozások:
  - Szorzás és bit-műveleteket figyelmen kívül hagyja (hamis hibát jelezhet)
  - Integer overflow-t nem figyel
  - (Függvény)mutatókat figyelmen kívül hagyja
  - Feltételezi, hogy minden mutató aritmetika biztonságos
  - Nem támogat rekurzív függvényeket

Eszköz ajánló: ZING

Systematic State Space Exploration Infrastructure for Software
Microsoft

Ld: Dudás Ákos referátuma, 2010.

A ZING célkitűzése

- Állapottér vizsgálat korlátos modellellenőrzéssel magas szintű nyelven leírt konkurens OO programokra
  - Holtpont ellenőrzése
  - Assertion ellenőrzés
  - Exception ellenőrzés
  - Ekvivalencia ellenőrzés (szimuláció reláció két modell között)
- ZING nyelvű modell
  - Függvényhívások (stack)
  - Dinamikusan létrejövő objektumok
  - Dinamikusan létrejövő folyamatok
    - Üzenetküldés vagy megosztott memória használata

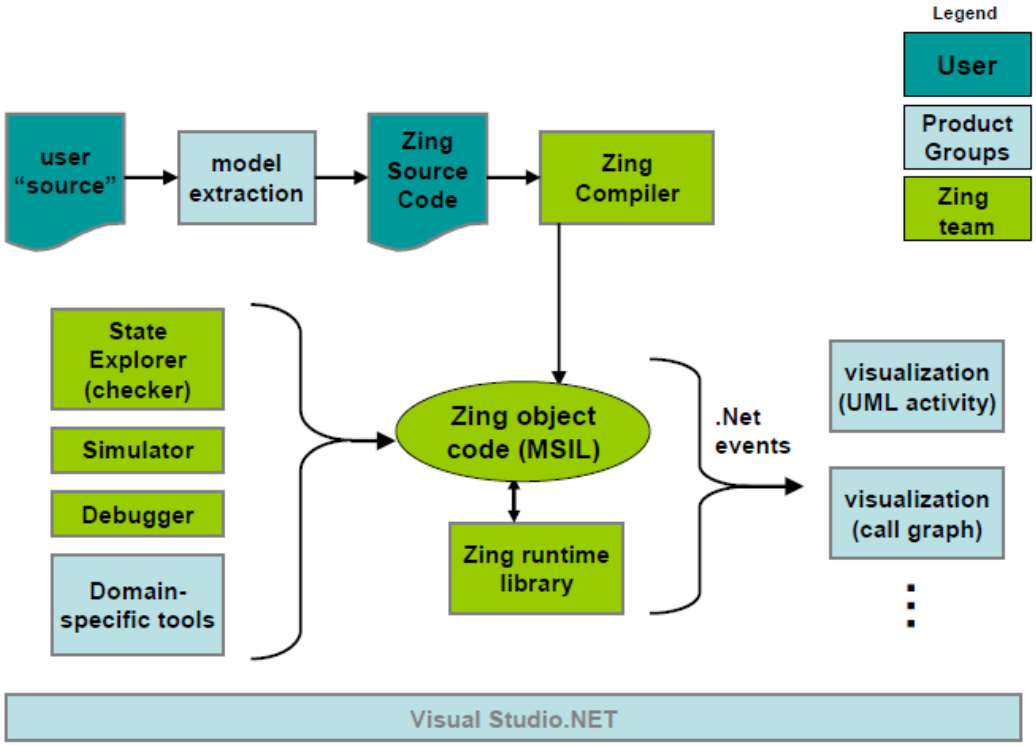
A ZING nyelv: Példa az étkező filozófusokra

```
class Fork {
Philosopher holder;

void PickUp(Philosopher eater){
  atomic {
     select {
      wait( holder==null ) ->
              holder = eater; }
} }

void PutDown(){
  holder = null;
}};
```

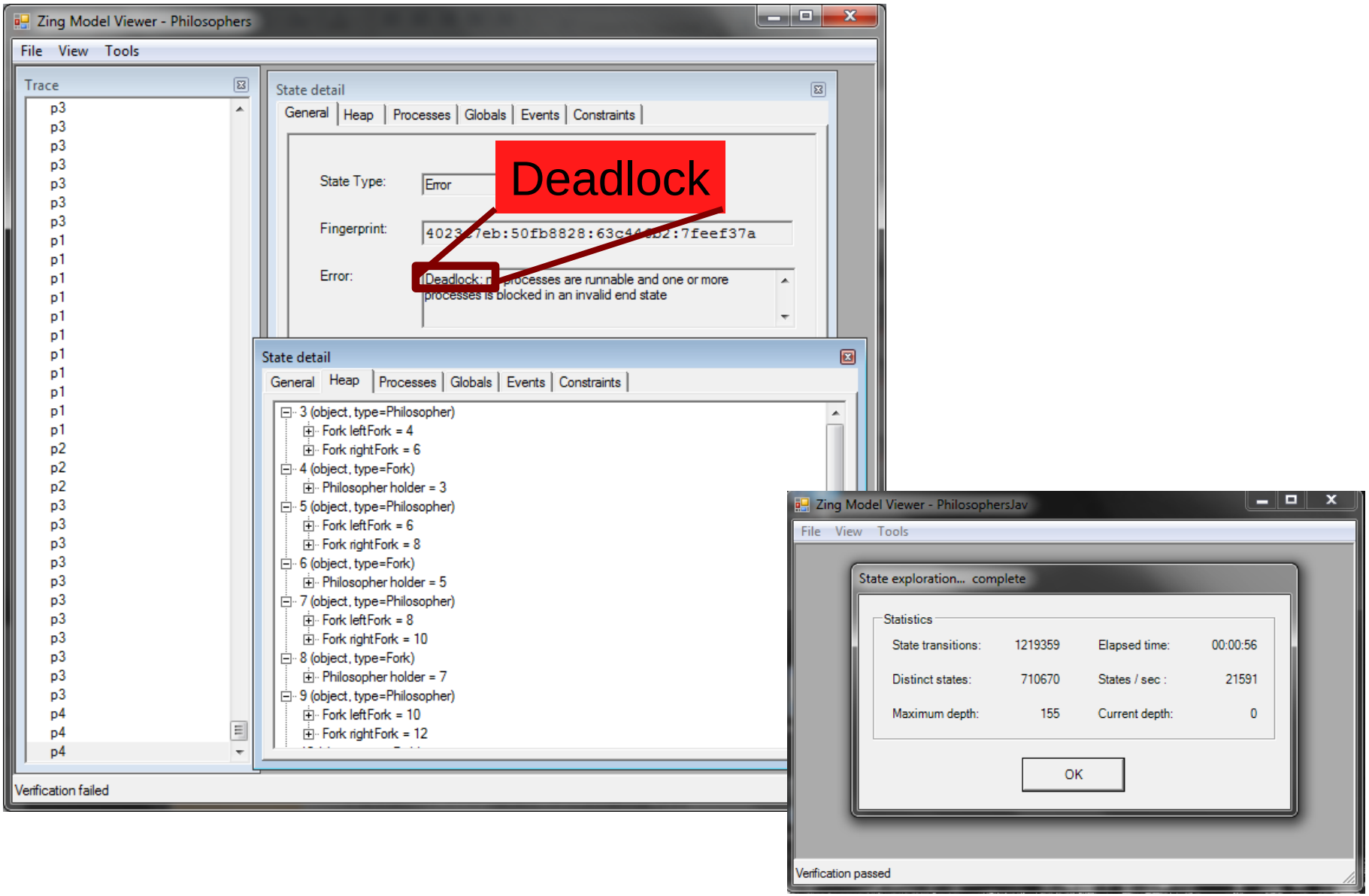
```
class Philosopher {
Fork leftFork;
Fork rightFork;

void Run() {
   while (true) {
     leftFork.PickUp(this);
     rightFork.PickUp(this);

     leftFork.PutDown();
     rightFork.PutDown();
}}};
```

A ZING architektúrája

1. (Forráskód $\rightarrow$) Zing modell
2. Zing compiler: MSIL kód áll elő
   - LTS reprezentáció (Zing Object Model, ZOM)
3. Állapottér bejárás ezen a modellen



A ZING eszköz



A ZING állapottér kezelésének érdekes elemei

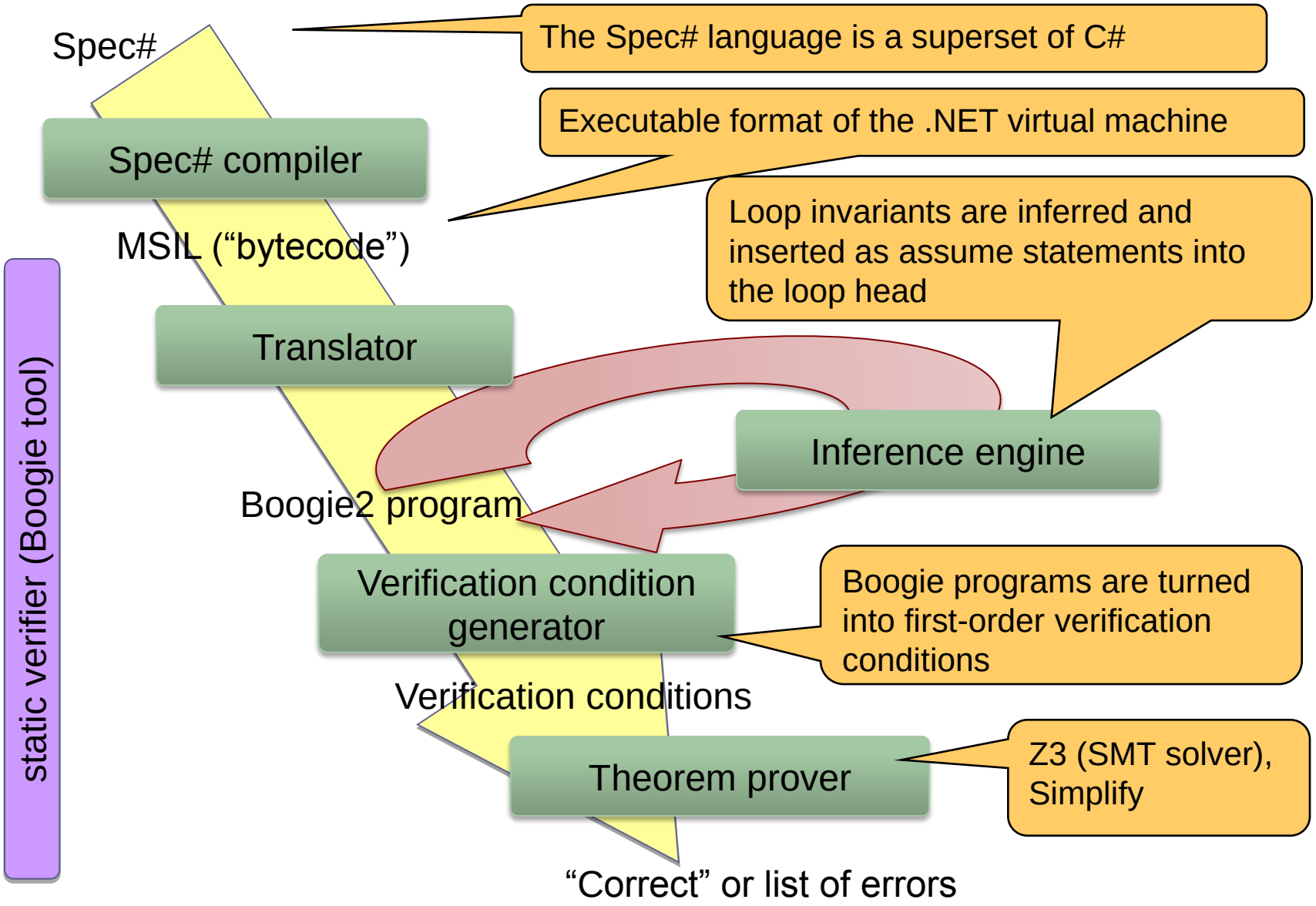
- Állapotok hash kódolása (ujjlenyomat)
  - Könnyebb egyezés vizsgálat
- Atomi utasítás blokkok
  - Közben más folyamat állapotváltására nem kell figyelni
- Függvények gyorstárazása
  - Bemenet és előidézett változások megjegyzése
  - Ugyanilyen bemenetre nem kell ismételni az elemzést
- Állapotváltozás gyorstárazása
  - Állapotváltáskor elmenti a változást két állapot között
  - Nem kell újra generálni az állapotvektort
- Kézi „assume” állítások
  - Állapottér vágás

Eszköz ajánló: Spec# és Boogie2

Spec# Programming System
Microsoft

Ld: Dmitriy Dunaev referátuma, 2010.

Működés


Spec#
The Spec# language is a superset of C#
Spec# compiler
Executable format of the .NET virtual machine
MSIL (“bytecode”)
Loop invariants are inferred and inserted as assume statements into the loop head
Translator
Inference engine
Boogie2 program
Verification condition generator
Boogie programs are turned into first-order verification conditions
Verification conditions
Theorem prover
Z3 (SMT solver), Simplify
“Correct” or list of errors
static verifier (Boogie tool)

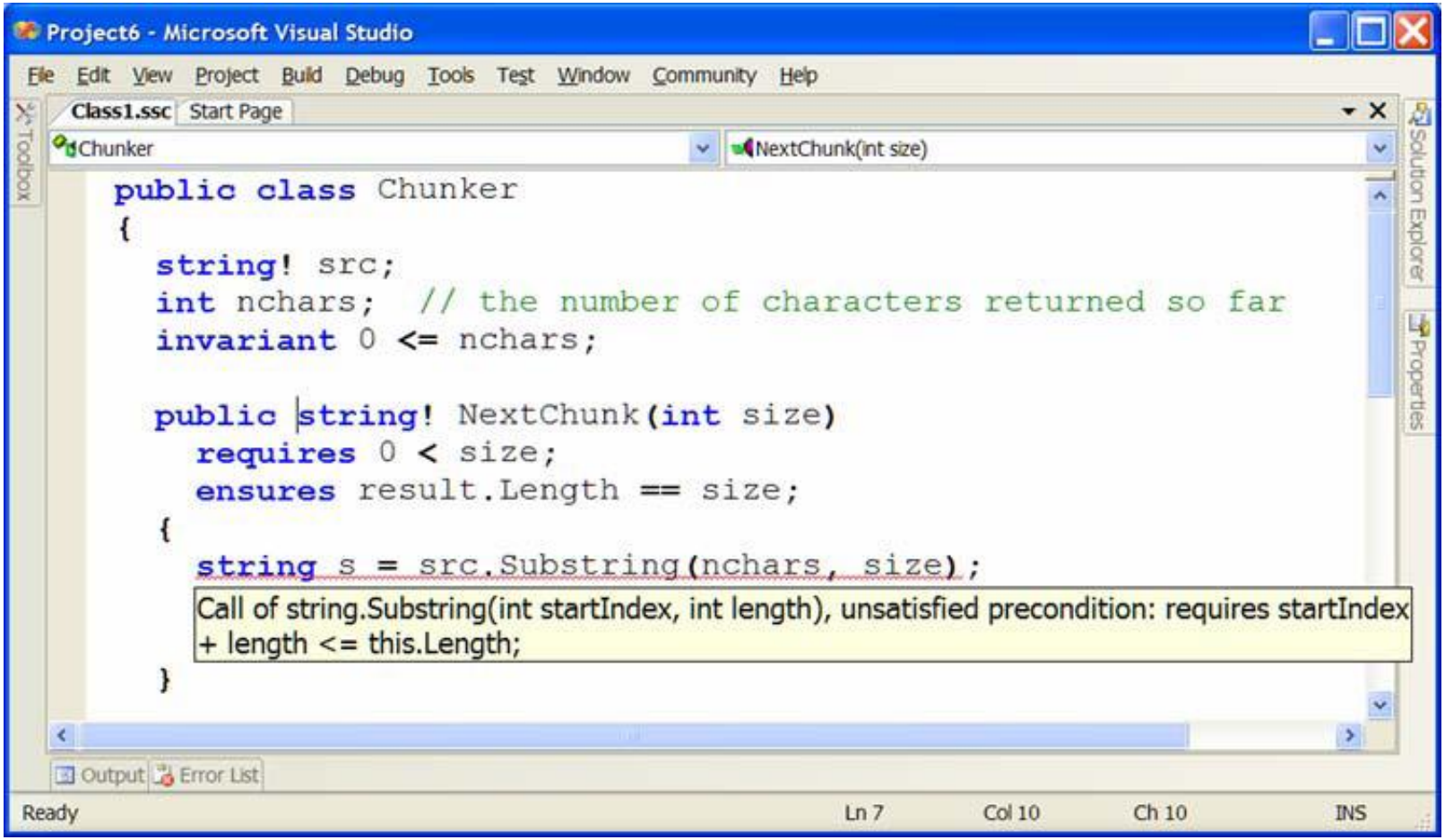
Spec# részletek

```
int day_of_week;

public void newDOW(int day)
requires (day <= 7);
requires (day >= 1);
{
    day_of_week = day;
}
```

```
class Meeting {
        int day_of_week;
        invariant (1 <= day_of_week);
        invariant (7 > day_of_week);

    void newDOW(int day )
    {
            day_of_week = day;
    }
}
```

```
static void Swap(int[] a, int i, int j)
requires 0 <= i && i < a.Length;
requires 0 <= j && j < a.Length;
modifies a[i], a[j];
ensures a[i] == old(a[j]);
ensures a[j] == old(a[i]);
{
  int temp;
      temp = a[i];
  a[i] = a[j];
  a[j] = temp;
}
```

Eszköztámogatás



- Telepítés: .NET, Visual Studio, Spec# compiler, Boogie2, Z3, Simplify