A formális módszerek szerepe

dr. Majzik István
dr. Bartha Tamás
dr. Pataricza András

BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Formális módszerek

- Matematikai technikák,
  - elsősorban diszkrét matematika
  - és matematikai logika

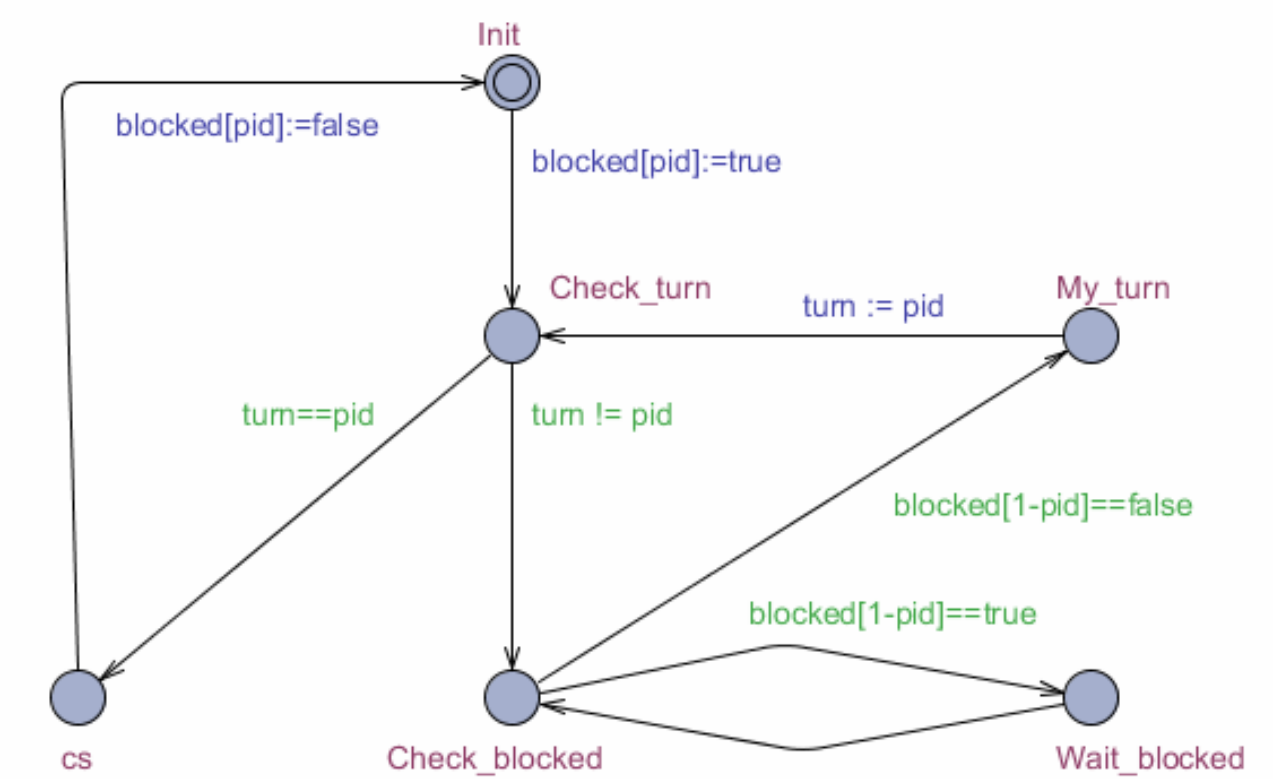
  használata arra, hogy elkészítsük és ellenőrizzük hardver és szoftver rendszerek
  - specifikációját,
  - terveit (modelljeit),
  - implementációját (viselkedését),
  - dokumentációját.

Első lépés: Formális nyelv

- Cél: Specifikációs illetve modellezési (tervezési) nyelv
  - Az elvárt tulajdonságok illetve a modellek leírására
  - Matematikai precizitással
- Formális nyelvek felépítése
  - Formális szintaxis
    - Jelölésmód: milyen nyelvi elemek és kapcsolatok vannak
  - Formális szemantika
    - A jelölésmód interpretációja: mit értek alatta
- Mit szeretnénk leírni formális nyelvekkel?
  - Funkcionalitás (viselkedés, feltételek, elvárások, ...)
  - Struktúra, interfészek
  - Extra-funkcionális aspektusok is: Teljesítmény, megbízhatóság, ...
- A formális nyelv használatának előnyei
  - Egyértelműség, ellenőrizhetőség
  - Automatikus feldolgozhatóság

Egy egyszerű példa

- Automata formalizmus:
  - Állapotok és állapotátmenetek
  - Változók
  - Változókon kiértékelhető feltételek az átmenetek végrehajtásához
  - Értékadás akciók az átmenetek végrehajtása során



Formális szintaxis (áttekintés)

- Matematikai eszközök:

$KS = (S, R, L)$ és AP, ahol

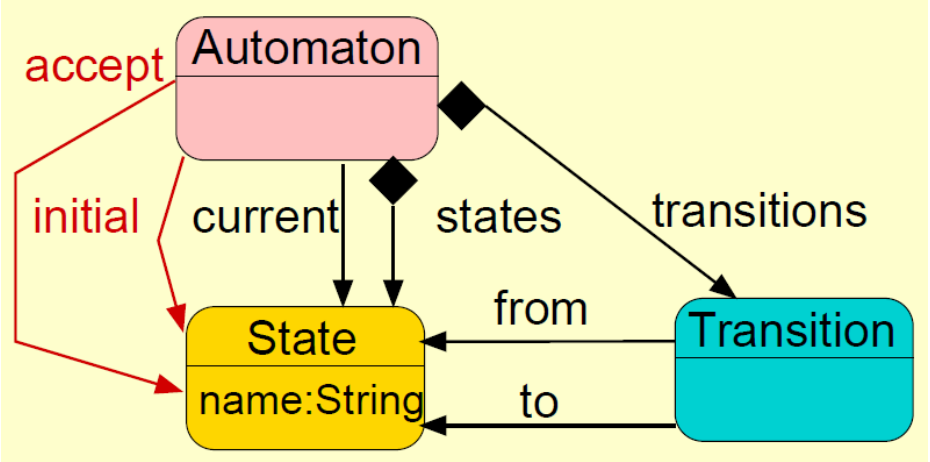
$AP = \{P, Q, R, \ldots\}$

$S = \{s_1, s_2, s_3, \ldots s_n\}$

$R \subseteq S \times S$

$L: S \rightarrow 2^{AP}$

- BNF: BL ::= true | false | $p \wedge q$ | $p \vee q$
- Metamodell:



- Absztrakt szintaxis (nyelvtani szabályok)
- Konkrét szintaxis (megjelenítés)

Formális szemantika (áttekintés)

A szintaxis alapján felírt modellek jelentése

- Műveleti (operációs) szemantika: „Programozóknak”
  - Megadja, mi történik a számítások során
  - Egyszerű elemekre épít: pl. állapotok, akciók
- Axiomatikus szemantika: „Helyességbizonyításhoz”
  - Állítás nyelv + axiómakészlet + következtetési szabályok
  - Pl. automatikus tételbizonyító rendszerekhez
- Denotációs szemantika: „Fordítóprogramokhoz”
  - Meghatározott leképzés ismert matematikai doménre
    - Pl. számítási szekvencia, vezérlési gráf, állapothalmaz, … és ezeken definiált műveletek (összefűzés, unió, …)
  - A modellek vizsgálata a mögöttes matematikai domén vizsgálatára vezethető vissza

Továbblépés: Formális módszerek

Formális módszer:

- A formális modellről ismeretet adó matematikai eljárás
- Eszközökkel támogatható

- A formális modell végrehajtása
  - Szimuláció
- A formális modell ellenőrzése: Formális verifikáció
  - „Önmagában való” vizsgálat
    - Konzisztencia, ellentmondás-mentesség
    - Teljesség, zártság
  - „Megfelelés” vizsgálata
    - Modellek között
    - Modellek és elvárt tulajdonságok között (implementáció ↔ specifikáció)
- A formális modell alapján történő szintézis:
  - Szoftver (programkód, konfiguráció) generálása
  - Hardver tervek generálása

A formális módszerek használatának lépései

- Valós probléma formális vizsgálata:
  1. Fogalmi tér felépítése <- feltételezések
  2. Probléma formalizálása <- absztrakció
  3. Formális modell analízise <- automatikus lehet
  4. Eredmények értelmezése, felhasználása

- Szükséges feltételek:
  - Feltételezések teljesülésének ellenőrzése
  - Modell validálása
  - Eszközök helyességének belátása

Mire szeretnénk használni a formális módszereket?

Milyen problémákkal nézünk szembe?

Miben segíthetnek a formális módszerek?

Egy tanulságos történet…

- Vasa svéd hadihajó, 1628:
  Elsüllyedt közvetlenül
  a vízrebocsátás után

- Problémák:
  - Változó követelmények
    (II. Gusztáv Adolf király)
  - Hiányzó pontos specifikáció
    (Henrik Hybertsson építő)
  - Ellenőrizetlen tervek
    (Johan Isbrandsson alvállalkozó)
  - Figyelmeztetések figyelmen kívül hagyása
    (Fleming admirális)

- Dokumentáció:
  - The Vasa: A Disaster Story with Software Analogies. By Linda Rising. The Software Practitioner, January-February 2001.
  - Why the Vasa Sank: 10 Problems and Some Antidotes for Software Projects. By Richard E. Fairley and Mary Jane Willshire. IEEE Software, March-April 2003.

Komplex rendszerek tervezése

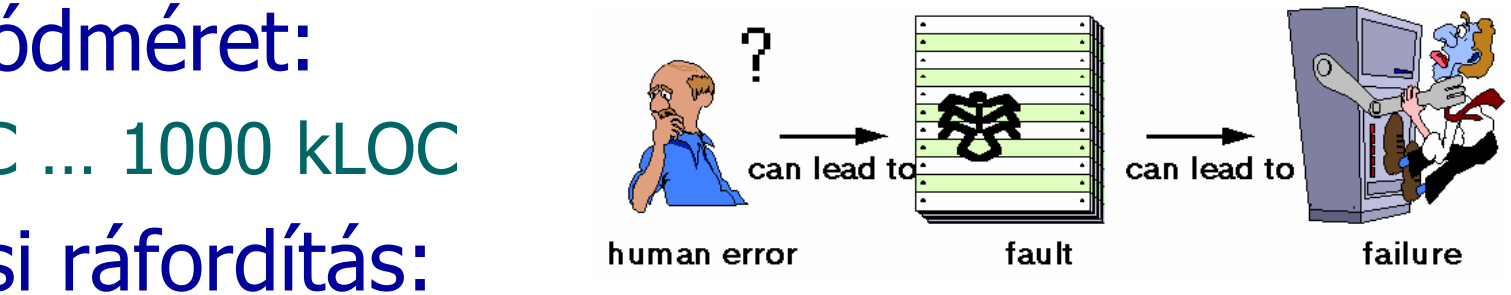
- Minimális tervezés
- Implicit folyamat
- Egyszerű eszközök

- Tervezés
- Definiált folyamat
- Hatékony eszközök

- Ellenőrzött tervek
- Meghatározott folyamat
- Automatikus eszközök

Szoftver minőségi krízis

- Tipikus kódméret:
  - 10 kLOC … 1000 kLOC
- Fejlesztési ráfordítás:
  - 0,1 - 0,5 mérnökév / kLOC (nagyméretű szoftver)
  - 5-10 mérnökév / kLOC (kritikus szoftver)
- Hiba eltávolítás (ellenőrzés, tesztelés, javítás):
  - 45 - 75% ráfordítás
- Hibasűrűség változása:
  - 10 - 200 hiba / kLOC jön létre a fejlesztés során



Ellenőrzés, debuggolás, javítás

  - 0,01 - 10 hiba / kLOC maradhat az üzembe helyezésig

IT alkalmazások fejlesztésének kihívásai

- Jó minőségű specifikáció és tervek készítése
  - Teljes
  - Ellentmondás-mentes, egyértelmű
  - Ellenőrizhető
- Tervek ellenőrzése
  - Tervezői döntések igazolása
    - Bizonyítottan helyes tervek a továbblépés alapjai
  - Hibák elkerülése vagy korai felderítése
    - Minőség ↔ költség ↔ fejlesztési idő optimalizálás
- Bizonyított helyességű tervezői eszközök használata
  - Forráskód, konfiguráció, teszt és monitor szintézis

Ezek alapjait a formális módszerek adhatják!

Egy egyszerű példa: Kölcsönös kizárás

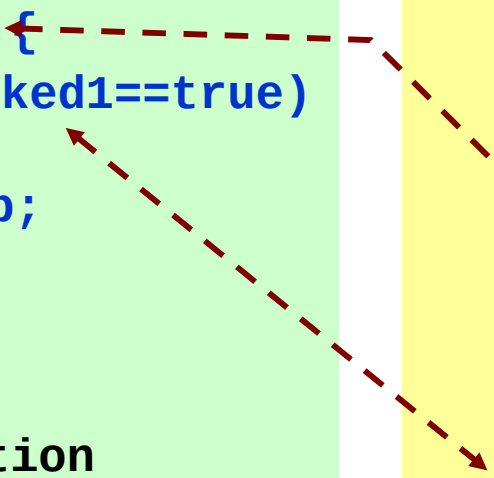
- 2 résztvevőre, 3 megosztott változóval (H. Hyman, 1966)
  - **blocked0**: Első résztvevő (P0) be akar lépni
  - **blocked1**: Második résztvevő (P1) be akar lépni
  - **turn**: Ki következik belépni (0 esetén P0, 1 esetén P1)

P0

```
while (true) {
   blocked0 = true;
   while (turn!=0) {
        while (blocked1==true)
   {
                skip;
        }
        turn=0;
   }
   // Critical section
   blocked0 = false;
   // Do other things
}
```

P1

```
while (true) {
   blocked1 = true;
   while (turn!=1) {
        while (blocked0==true)
   {
                skip;
        }
        turn=1;
   }
   // Critical section
   blocked1 = false;
   // Do other things
}
```



Helyes-e ez az algoritmus?

A formális módszerek használatának várt eredményei

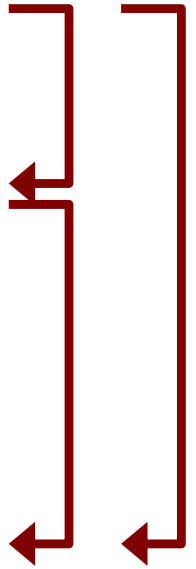
- Tervezők (nem csak matematikusok) által is használható,
  amennyiben a specifikus tudást eszközökbe integrálják
  - Modellező eszközök
  - Ellenőrző eszközök
    - Modellellenőrzők, ekvivalencia ellenőrzők, automatikus tételbizonyítók
  - Szintézis eszközök
    - Kódgenerátor, konfiguráció generátor az ellenőrzött modellek alapján
    - Teszt generátor (validáláshoz)
- Csökken a rendszerben maradó koncepcionális és tervezői hibák száma, javul a minőség

Verifikáció és validáció összehasonlítása

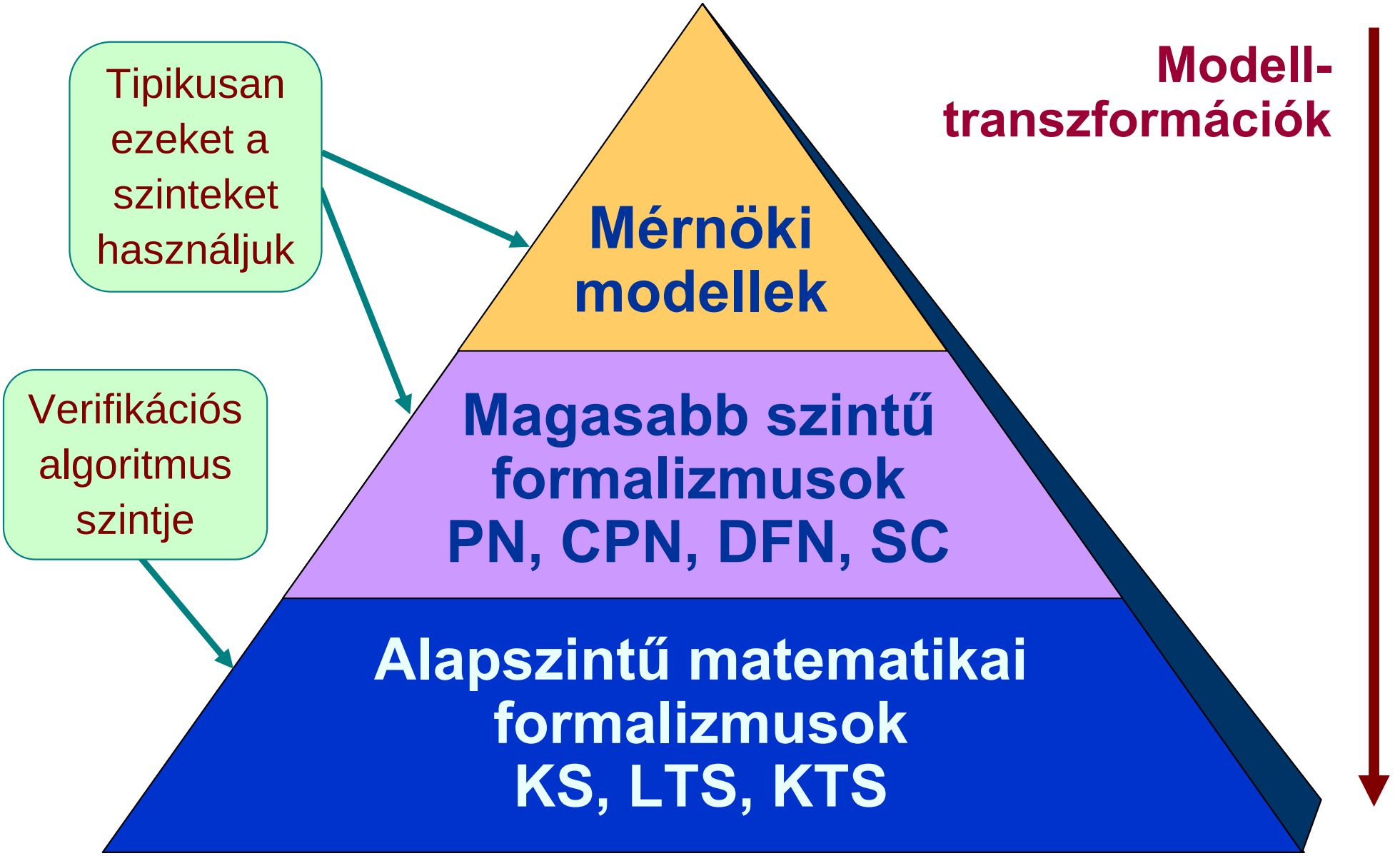
Verifikáció (igazolás)	Validáció (érvényesítés)
„Jól építjük-e a rendszert?”	„Jó rendszert építettünk-e?”
Összhang ellenőrzése a fejlesztési fázisokban, illetve ezek között	A fejlesztés eredményének ellenőrzése
Fejlesztési lépések során használt tervek (modellek) és specifikációjuk közötti megfelelés ellenőrzése	A kész rendszer és a felhasználói elvárások közötti megfelelés ellenőrzése
Objektív folyamat; formalizálható, automatizálható	Szubjektív elvárások lehetnek; elfogadhatósági ellenőrzés
Felderíthető hibák: Tervezési, implementációs hibák	Felderíthető hibák: Követelmények hiányosságai is
Nincs rá szükség, ha automatikus a leképzés követelmény és implementáció között	Nincs rá szükség, ha a specifikáció tökéletes (elég egyszerű)

Modellek a formális ellenőrzéshez

- Rendszermodellek
  - Mérnöki modellek:
    - Pl. UML diagramok (fél-)formális szemantikával
  - Magasabb szintű modellek:
    - Vezérlés orientált: Automata, Petri-háló, …
    - Adatfeldolgozás orientált: Adatfolyam háló, …
    - Kommunikáció orientált: Processz algebra, …
  - Alapszintű matematikai modellek:
    - KS, LTS, KTS, automaták, Büchi automaták
- Tulajdonság leírások
  - Magasabb szintű:
    - Idődiagram, üzenet szekvencia diagram (MSC)
  - Alapszintű:
    - Elsőrendű logika, temporális logika, referencia automata



Visszautalás: A tárgy felépítése



Klasszikus alkalmazások

- USA TCAS-II forgalomirányító rendszer
  - RSML nyelven specifikált; teljesség és ellentmondás-mentesség ellenőrzése
- Philips Audio Protocol
  - 1994: manuális verifikáció, majd 1996: automatikus ellenőrzés (HyTech)
- Lockheed C130J repülési szoftvere
  - Programfejlesztés helyességbizonyítással (CORE spec. nyelv + Ada)
  - Költség nem nőtt a tesztelés egyszerűsödése miatt
- IEEE Futurebus+ szabvány
  - Carnegie Mellon SMV: cache koherencia protokoll hibájának kiderítése
- Hardver projektek: ACL2 automatikus tételbizonyító
  - Motorola DSP Complex Arithmetic Processor mag (250 regiszter): DSP algoritmusok ellenőrzése
  - AMD 5K86 processzor: Lebegőpontos osztás algoritmusának ellenőrzése
- Intel i7 processzor
  - „*For the recent Intel CoreTM i7 design we used formal verification as the primary validation vehicle for the core execution cluster*"
  - Szimbolikus szimuláció az adatutak teljes vizsgálatára (2700 mikroutasítás, 20 mérnökévnyi munka) – Binary Decision Diagram alkalmazása
- Modell alapú szoftverfejlesztéshez kapcsolódó eszközök
  - IBM, Esterel, Prover, Mentor, Telelogic, …

Forráskódhoz illeszkedő formális verifikáció

- Java
  - Bandera, PathFinder: modell absztrakció
  - Java VM formalizálása: Abstract State Machine
- Ada
  - SPARK Ada verification condition generator tételbizonyítóhoz
- C
  - BLAST: Szoftver modellellenőrző C programokhoz (absztrakció)
  - CBMC: C alapú korlátos modellellenőrző
- C#, Visual Basic .Net
  - Zing (MS Visual Studio-hoz): Konkurens szoftver modellellenőrzése
- Spec# (C# superset)
  - MS Research Boogie 2: Specifikációs nyelvi kiterjesztések
  - Helyességi kritériumok ellenőrzése: program absztrakcióval és tételbizonyítóval (Z3)
- Microsoft Windows Driver Kit (WDK)
  - Static Driver Verifier Research Platform, SLAM 2 eszköz
  - Windows API használati feltételeinek statikus ellenőrzése

Összefoglalás

- Mik a formális módszerek?
  - Formalizmus, formális nyelv
  - Formális módszerek és eszközök:
    Szimuláció, formális verifikáció, szintézis
- Mire használhatók?
  - Motiváció: Szoftver minőségi kihívások
  - A formális módszerek lehetőségei
- Mit várhatunk?
  - Korlátok
  - Sikertörténetek