

Beszédes Árpád
Code Analysis Techniques for Debugging and Software Maintenance
című MTA doktori értekezésének bírálata

1. Szakmai munka, kérdések

A jelölt „Code Analysis Techniques for Debugging and Software Maintenance” című MTA doktori értekezése egy átfogó, logikailag jól szerkesztett munka, amely a forráskód-elemzés és hibakeresés területén nyújt új, tudományosan megalapozott és gyakorlati szempontból is releváns eredményeket. A dolgozat három fő tematikus egységre tagolódik: a dinamikus függőségelemzésre, a függőségi klaszterekre és a spektrum-alapú hibakeresési módszerek kiterjesztéseire. A bevezető fejezet megfelelően megalapozza a kutatás indokoltságát, hangsúlyozva, hogy a hibakeresés a szoftverfejlesztés egyik leginkább idő- és költségigényes fázisa, amelynek részleges vagy teljes automatizálása jelentős erőforrás-megtakarítást hozhat. A tézisek mindegyike több, nemzetközi szinten elismert, lektorált konferenciákon vagy rangos folyóiratokban megjelent publikációra épül.

Az első fő rész, a *Dinamikus függőségelemzés*, két nagy fejezetet tartalmaz. A *Graph-Less Dynamic Program Slicing* fejezet nyolcféle algoritmus-változatot mutat be a dinamikus szeletelésre, amelyek közös jellemzője, hogy elkerülik a költséges dinamikus függőségi gráf teljes felépítését. Az algoritmusok kategorizálása a szeletelés iránya, a feldolgozás iránya és a globális vagy igényvezérelt működés szerint történik. Két igényvezérelt, két globális és két párhuzamos algoritmus kerül részletes ismertetésre, a gyakorlati alkalmazhatóság, memóriahasználat és teljesítmény szempontjából értékelve. A C és Java nyelvű implementációkban a nyelvspecifikus nehézségek kezelése (pl. dinamikus memória, összetett adattípusok, többszálúság) kiemelkedő mérnöki teljesítményt tükröz. Felmerül a kérdés, **milyen méretű és típusú rendszereken végezték az összehasonlító teljesítményméréseket, és ezek mennyire reprezentálják a jelenlegi ipari méretű kódokat?**, valamint **vizsgálták-e a módszerek skálázhatóságát többmagos vagy elosztott feldolgozási környezetben?** A *Dynamic Function Coupling* fejezet egy új metrikát vezet be a függvények közötti „közelség” mérésére, amely a hívási sorrend és az indirekciós szint alapján számítható, és paraméterezhetően szabályozza a biztonság és a pontosság kompromisszumát. A metrika felhasználható hatáskör-meghatározásban, hibakeresésben, regressziós tesztelésben. A formalizálás és az algoritmusok idő- és tárkomplexitásának elemzése alapos, ugyanakkor kérdés, **hogyan teljesít a DFC-alapú megközelítés olyan rendszerekben, ahol a végrehajtás erősen párhuzamos és nem determinisztikus?**

A második fő rész, a *Függőségi klaszterek*, a *Background on Dependence Computation* fejezettel indít, amely megalapozza a következő fejezetek módszertani hátterét. A *Computation and Analysis of Dependence Clusters* fejezet részletesen bemutatja a Static Execute After (SEA) relációra épülő klaszterfogalom kialakítását, valamint ennek összehasonlítását más, nagyobb granularitású klaszterdefiníciókkal. A vizsgálat több lépcsőben zajlik: metrikák számítása különböző programokon, manuális osztályozás, metrikus elemzés, valamint SEA és szelet-alapú klaszterek összevetése. Kiemelkedő újdonság a linchpin (kulcselem) azonosítás, amelyet brute-force és heurisztikus módszerekkel is végez a szerző, és az eredményeket a WebKit böngészőmotor forráskódján végzett hatáselemzésben is alkalmazza. Nyitott kérdés marad, **hogyan a linchpin-azonosítás eredményeit validálta-e emberi szakértők bevonásával, és ha igen, milyen egyezési arányt ért el?**, illetve **vizsgálta-e az SEA és a szelet-alapú klaszterek közötti eltérések hatását konkrét hibajavítási forgatókönyvekben?**

A harmadik fő rész, a *Spektrum-alapú hibalokalizációs algoritmusok*, a *Background on Spectrum-Based Fault Localization* fejezettel kezdődik, amely áttekinti a téma alapfogalmait. A *Reliable Code Coverage*

Measurement fejezetben a szerző empirikusan vizsgálja a kódlefedettség-mérő eszközök pontatlanságait és eltérő viselkedését, kvantitatív és kvalitatív módszerekkel elemezve az eredményeket. Felmerül, **mely vizsgált eszközök alkalmazhatók nagy, többnyelvű kódalapokra, és a módszer kiterjeszthető-e ezekre?** A *Use of Call Chains in SBFL* fejezet a dinamikus hívásláncok beépítését tárgyalja a hibakeresési algoritmusokba, új kontextuális információkat nyújtva, míg a *Use of Call Frequencies in SBFL* a hívások számának felhasználását mutatja be a pontosság javítására. E két fejezet eredményei empirikus vizsgálatokkal alátámasztottak, azonban kérdés, **mennyire érzékenyek ezek a módszerek a tesztkészlet minőségére és lefedettségére, és hogyan változik a teljesítmény gyengébb lefedettség mellett?** A *Use of Dynamic Slicing in SBFL* fejezet a dinamikus szeletelés spektrumátrixba való beépítését vizsgálja, elméleti modell és gyakorlati kísérletek alapján. A modell levezeti a lefedettség- és szelet-alapú spektrumok matematikai kapcsolatát, de nyitott, **mennyiben alkalmazható ez az elméleti keret nem procedurális vagy funkcionális nyelvekre, ahol a függőségi struktúra lényegesen eltérő?**

Nyelvileg és stilisztikailag a dolgozat magas színvonalú: a szakmai terminológia következetes, az ábrák és táblázatok áttekinthetők, a hivatkozások szabályosak, a helyesírás lényegében hibátlan. A mondat szerkesztés világos, bár a tömény formalizmus és jelölésrendszer helyenként lassíthatja az olvasást.

A publikációs teljesítmény részleteiben is kiemelkedő. A dolgozatban hivatkozott cikkek között több Q1 és Q2 besorolású, magas impakt faktorú folyóiratban megjelent publikáció szerepel. Ezen túl a szerző több tanulmánya rangos nemzetközi konferenciák válogatott anyagaiban jelent meg. A kapcsolódó tudományos tevékenység meghaladja az MTA doktori címnél elvárt szintet, több közlemény jelentős idézettséggel bír, és a szerző gyakran első vagy vezető szerzőként jegyzi ezeket. A kutatás eredményei műszaki alkotásokban, konkrét szoftvereszközök formájában is testet öltöttek, ami erősíti a gyakorlati relevanciát.

Összességében a disszertáció a szoftverkód-elemzés és hibakeresés területén több, egymástól független, de egymást kiegészítő, új tudományos eredményt mutat be, amelyek mind elméletileg, mind gyakorlatilag jelentősek. A publikációs háttér bőséges és erős nemzetközi láthatóságot biztosít.

2. Tézisek

A tézisfüzet jól szerkesztett, áttekinthető dokumentum, amely az MTA doktori értekezés eredményeit három tematikus egységbe rendezi. A számozás logikus, a tézispontok tömörek és tartalmasak, a kapcsolódó publikációkra tett hivatkozások pontosak és relevánsak. A nyelvezet szakszerű, a fogalmak definiálása egyértelmű, a szerkesztés minősége jó.

Tézispontok részletes értékelése

- **T1.1 – Gráfmentes dinamikus programszeletelési algoritmusok**

A dolgozatban a tézispont teljes mértékben alátámasztott. Az általános keretrendszer és a nyolcféle algoritmus részletes leírást kap, a kategorizálás (feldolgozási mód, irány, igényvezérelt vagy globális) és a nyelvspecifikus implementációk is teljeskörűen dokumentáltak. A teljesítménymérések bemutatottak, de nyitott kérdés, hogy az alkalmazott tesztprogramok mérete és összetettsége mennyire reprezentálja a modern ipari kódokat, illetve, hogy a skálázhatóságot vizsgálták-e többmagos vagy elosztott környezetben. Ettől függetlenül a tézis állítása a bemutatott környezetben teljes mértékben igazolt.

- **T1.2 – Dinamikus csatolás számítása és alkalmazásai**

A DFC metrika definíciója, számítási módja és alkalmazásai részletesen szerepelnek a dolgozatban, a hatásvizsgálati példák is kellően illusztráltak. Kissé kifogásolható, hogy nem ismert, a metrika

menyire stabil nem determinisztikus, erősen párhuzamos rendszerekben, ahol a hívási sorrend ingadozó. Emiatt az állítás bizonyítottsága ilyen környezetekre korlátozott, de a tézis fő megállapításai elfogadhatók.

- **T2 – Függőségi klaszterek hatékony számítása**

A SEA-alapú klaszterfogalom definíciója, a magasabb granularitású klaszterekkel való összevetése, valamint az elméleti és empirikus vizsgálatok alaposak. A lynchpin-azonosítási módszerek is részletesen leírtak, és a WebKit példán jól illusztráltak. Hiányosság, hogy a módszerek szakértői validációjáról nincs információ, így nem ismert, mennyire egyeznek az automatikus eredmények a manuális értékeléssel. Az állítás lényegi része azonban így is elfogadható.

- **T3.1 – Megbízható kódlefedettség mérési megoldások**

A tézisben bemutatott módszertan és empirikus elemzés alapos, a lefedettségmérő eszközök értékelése részletes és megalapozott. Kisebb hiányosság, hogy a vizsgált eszközkör főként egy-nyelvű környezetre (C/C++) korlátozódik, így a többnyelvű rendszerekre való általánosíthatóság nem bizonyított. A tézis állítása a bemutatott környezetben teljesen igazolt.

- **T3.2 – Eljárás hívási láncok alkalmazása a hibalokalizációban**

A dinamikus hívási láncok hibakeresésbe történő beépítésének módszere és annak előnyei bemutatottak, empirikus eredményekkel alátámasztva. Kifogásolható, hogy a dolgozat nem vizsgálja részletesen, hogy a tesztkészletek lefedettsége és minősége milyen mértékben befolyásolja az eredmények stabilitását, ami ipari alkalmazásokban kritikus tényező.

- **T3.3 – Eljárás hívási gyakoriságok alkalmazása a hibalokalizációban**

A módszer elméleti háttere és empirikus igazolása bemutatott. Az eredmények azt mutatják, hogy a hívási gyakoriság figyelembevétele javítja a hibakeresés hatékonyságát. Hiányosság, hogy a gyenge lefedettségű tesztkészletekre gyakorolt hatás nincs elemezve, így a robusztusság nem teljeskörűen bizonyított.

- **T3.4 – Dinamikus programszeletelés alkalmazása a hibalokalizációban**

Az elméleti modell és az empirikus kiértékelés világosan alátámasztja, hogy bizonyos feltételek mellett a dinamikus szeletelés javítja a lefedettség-alapú lokalizációt. Kifogás, hogy a módszer procedurális nyelvekre optimalizált, és nem ismert, alkalmazható-e funkcionális, deklaratív vagy erősen aszinkron környezetekre.

Összességében a T1.1, T1.2, T2, T3.1 tézispontokat teljes mértékben elfogadom. A T3.2, T3.3, T3.4 tézispontokat a fent felsorolt kisebb hiányosságok miatt részlegesen tudom elfogadni.

3. Összegzés

Az értekezés tudományos hozzájárulása jelentős, a publikációs háttér erős, a megfogalmazott tézisek többsége teljes bizonyító erővel elfogadható. A doktori munka tudományos eredményeit mindenképpen elegendőnek tartom az MTA doktori cím megszerzéséhez, és a nyilvános védés kitűzését javaslom.

Debrecen, 2025. augusztus 15.

Prof. Dr. Hajdu András
tszv. egyetemi tanár