



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Gráfmintaillesztő rendszerek tesztelése automatikus gráfgenerátorokkal

TDK dolgozat

Készítette:

Bekő Mária

Konzulens:

Semeráth Oszkár

2018

Tartalomjegyzék

Kivonat	i
Abstract	ii
1. Bevezetés	1
2. Előismeretek	2
2.1. Esettanulmány	2
2.2. Gráflekérdező rendszerek	3
2.2.1. Tulajdonság gráfok	3
2.2.2. Neo4j	3
2.3. Modellezés és metamodellezés	4
2.3.1. Cypher query-k metamodellje	4
2.3.2. Xtext	5
2.3.3. VIATRA jólfarmáltsági kényszerek	6
2.4. Gráfgenerálás	7
3. Áttekintés	8
3.1. Funkcionális áttekintés	8
3.2. Lekérdezés generálási folyamat felépítése	8
4. Gráflekérdezések automatikus generálása	11
4.1. Lekérdezések generálása	11
4.1.1. Tesztelni kívánt résznyelv kiválasztása	11
4.1.2. Jólformáltsági kényszerek betartása	12
4.1.3. Diverzitás biztosítása	14
4.2. Utófeldolgozás	15
4.3. Fordítás	15
5. Értékelés	16
5.1. Mérési környezet felállítása	16
5.1.1. M1: Kevés al-környezet, sok példány modell	16
5.1.2. M2: Sok al-környezet, kevés példány modell	16
5.2. A futásidő összetétele	17
5.3. Skálázódás a modellek méretének függvényében	17
5.4. Skálázódás a modellek darabszámának függvényében	19
5.5. Diverzitás mérése	19
5.6. Lehetséges mérési hibák	21
6. Összefoglalás	22
6.1. Elméleti eredmények	22

6.2. Gyakorlati eredmények	22
6.3. Jövőbeli tervek	22
Köszönetnyilvánítás	23
Irodalomjegyzék	24

Kivonat

Napjainkban az adatokat többféle formátumban is tárolják. Ezek közé tartoznak a gráfadatbázisok, ahol csomópontok reprezentálják az entitásokat és az élek az entitások közötti kapcsolatokat. Az adatstruktúrához illeszkedve többféle gráflekérdező nyelv jött létre, amelyek képesek komplex struktúrák felírására.

A gráfmintaillesztő rendszerek tesztelése azonban komoly kihívást jelent, főképp automatizált megoldásokban nem bővelkedünk. A legnagyobb kihívást ebben az esetben a változatos modellek és lekérdezések automatikus és szisztematikus előállítása jelenti, melyek tesztbemenetként szolgálnak. Továbbá, gráfadatbázisok teljesítménymérését is nagyban segítené az automatikusan előállított modellkészlet.

Dolgozatom célja hogy ezekre a problémákra megoldást találjak. Kutatásom során megmutatom, hogy egy automatikusan előállított diverz modell halmazzal, amelynek modelljei lekérdezőként értelmezhetőek egy gráfmintaillesztő rendszerben (pl.: VIATRA vagy Neo4j), hogyan lehetséges az adott gráfmintaillesztő rendszer tesztelése.

Munkám során fejlett logikai következtetők alkalmazásával állítok elő modelleket, melyek diverzitását szomszédsági formákkal (neighborhood shape-ek) biztosítom. A logikai következtetők eredményeit lekérdezésekként, és adatbázisok tartalmaként egyaránt értelmezhetjük, amelyek eredményei különböző megvalósításokkal összehasonlíthatóvá válnak. A megoldásomat egy esettanulmány keretében prezentálom.

Ezzel a módszerrel lehetővé válik, nagyobb megbízhatóságú gráfmintaillesztő rendszerek fejlesztése olcsóbban. Illetve egy ekkora modell halmaz különböző gráfmintaillesztő rendszerekben lekérdezésekre fordítva és a válaszüzeneteket lemérve teljesítménymérésekre is használható.

Abstract

Nowadays the data is stored in multiple formats. One of this is the graph database, where entities are represented as graph nodes and the relations between entities as edges. Utilizing rich data structure, a variety of graph querying languages have been created in order to query complex structures.

Testing of graph query engines is a challenging task, especially in an automated way. The greatest challenge in this case is the automatic and systematic creation of a diverse set of models and queries, which serve as test inputs. In addition, the development of performance benchmarks for graph databases would be greatly aided.

The purpose of my thesis is to find solutions to these problems. In my thesis, I will show an approach to automatically generate a diverse set of models, that can be interpreted as queries of the graph query engine under test (e.g. VIATRA model query language or Neo4j graph database queries). Additionally, I propose a testing process.

In the course of my work, I produce models with the help of state-of-the-art logic solvers (SAT solvers and Graph Solvers), and use neighborhood shapes to ensure their diversity and create effective equivalence partitioning. The results of the logic solvers are interpreted as queries and as databases content, and the result of query evaluation can be compared to other implementations. I illustrate my solution in a case study.

This method makes it possible to develop more reliable graph query engines at a lower cost. And such a set of models translated to multiple graph querying languages can be used in those graph query engines for performance measurements by measuring response times.

1. fejezet

Bevezetés

Kontextus. Napjainkban

Problémafelvetés. Azonban ...

Célkitűzés. Dolgozatom célja ...

Kontribúció. Dolgozatomban bemutatok ...

Hozzáadott érték. Ezáltal ...

Dolgozat felépítése. A második fejezetben bemutatom a dolgozat megértéséhez szükséges háttérismereteket. blabla ...

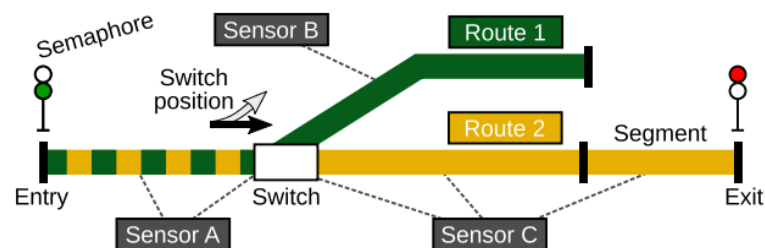
2. fejezet

Előismeretek

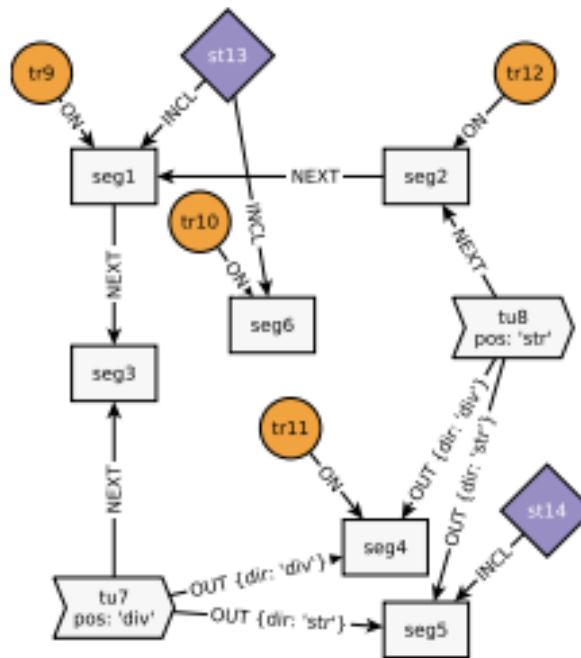
2.1. Esettanulmány

A dolgozatban elért eredményeket a Train Benchmark [14] esettanulmány segítségével fogom bemutatni. Ez a benchmark azért jött létre, hogy össze tudjuk hasonlítani különböző gráflekérdező rendszerek teljesítményét, beleértve gráfadatbázisokat, mint Neo4j [1], SparkSee [6], nagy teljesítményű modellezőeszközöket, mint VIATRA [10] és szokványos relációs adatbázisokat, mint az Oracle [9], főleg időigény és memória felhasználás szempontjából. A Train Benchmark egy vasúti modellezőeszköz esettanulmányán mutat be olyan, különböző terhelésprofilokat, amelyek hasonlítanak egy valódi modellezési feladathoz. Munkám során a benchmarkban specifikált formátumhoz illeszkedve generáltam lekérdezéseimet, ezért bemutatom, hogy milyen elemekből áll.

A 2.1-es ábrán látható egy a Train Benchmark modelljére alapuló részlet. Ebben a kontextusban egy vasúti útvonal (*Route*, zölddel és sárgával jelölve) nem más mint szegmensek (*Segment*, két fekete vonal közötti rész) és váltók (*Switch*, fehér téglalappal jelölve) sorozata, illetve a belépést és a kilépést egy-egy szemafor (*Semaphore*, a két színű lámpácskák jelölik) jelzi. Ahhoz, hogy biztonságos legyen a közlekedés szükség van szenzorokra, amelyek monitorozzák a különböző szegmensek és váltók kihasználtságát. Egy útvonal definiálásához, a felsorolt elemeken kívül a váltók adott útvonalhoz tartozó pozícióját is el kell tárolnunk. Egy útvonal akkor aktív, ha a rendszerben a specifikációjának megfelelően állnak a váltók.



2.1. ábra. Vasúti útvonal részlet (forrás: [14])



2.2. ábra. Tulajdonsággráf példa(forrás: [7])

2.2. Gráflekérdező rendszerek

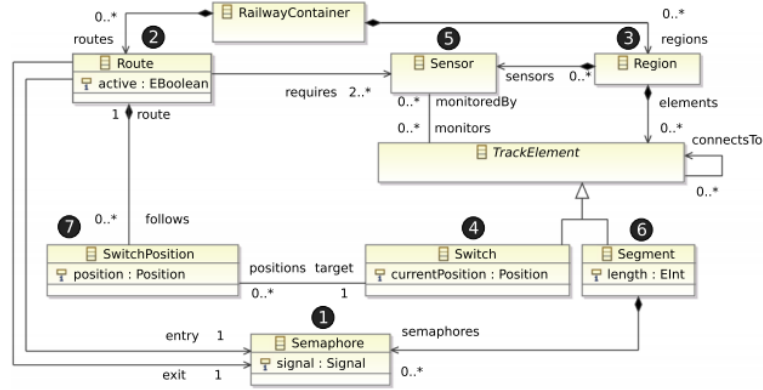
2.2.1. Tulajdonság gráfok

A gráfok intuitív formalizációt nyújtanak modellezési szempontból arra, hogy úgy írhasuk le a világot ahogy az ember gondolkozik róla. Tehát mint dolgok (csomópontok) és közöttük lévő kapcsolatok (élek)[7]. A tulajdonsággráf (property graph) adatmodell kiterjeszti a gráfokat úgy, hogy címkéket/típusokat, illetve tulajdonságokat ad a csúcsoknak és az éleknek. A gráf adatbázisok alkalmasak tulajdonsággráfok tárolására, és az abban lévő adatok lekérdezésére komplex gráf minták használatával. Ilyen rendszerek például a Neo4j [1], OrientDB [4] és a SparkSee [6].

Ahhoz hogy jobban megérthessük mi is ez az adatmodell a 2.2 -es ábrán látható egy példa. Az ábrán minden ami valamilyen forma egy-egy csomópont, és minden csomópont reprezentál elemeket a Train Benchmark adatmodelljéből. A fehér téglalapok a szegmenseket, a sárga körök a vonatokat, a lila rombuszok az útvonalakat, és a fehér zászlók a váltókat. Minden elem fel van címkézve ezen kívül egy névvel (seg1, seg2, tr1 stb...), a formájuk és a nevük is tulajdonságok amelyek segítségével megkülönböztethetővé válnak, és amelyek egy egyszerű gráfban már nem lehetnének jelen. Az élek pedig kapcsolatokat mutatnak az egyes elemek között. Például az ábrán vannak összekötött vonatok és szegmensek, az összekötő élen "ON" felirattal. A vonattól mutatnak a szegmens irányába. Egy ilyen irányított él azt reprezentálja, hogy az adott vonat rajta van az adott szegmensen(angolul : train is ON segment). Ilyen formán az élekhez is rendelhetőek tulajdonságok.

2.2.2. Neo4j

A Neo4J egy népszerű NoSQL tulajdonsággráf adatbázis és a Cypher lekérdező nyelvet kínál lekérdezések írására. A Cypher egy magas szintű deklaratív lekérdező nyelv és mivel le van választva a lekérdező rendszerről, ezért az képes a Cypher nyelven írt lekérde-



2.3. ábra. A Train Benchmark metamodellje.(forrás: [14])

zések optimalizálására. A Cypher szintaxisa olyan gráf minták megírását teszi lehetővé, amelyeknek megértése nagyon egyszerű.

```
MATCH (tr:Train)-[:ON]->(seg:Segment)
RETURN tr, seg
```

A fenti példán egy olyan lekérdezést láthatunk, ami az összes olyan vonat, szegmens párral tér vissza, ahol az adott vonat rajta van az adott szegmensen. Dolgozatomban Cypher nyelvű lekérdezések generálásával foglalkozom.

Egy Cypher nyelvű lekérdezésben a **MATCH** kikötést arra használjuk hogy megkeresse a mintát amit leírunk benne. A **RETURN** kikötés meghatározza hogy mi kerüljön bele a visszatérési értékbe. () zárójelek között változókat definiálunk és meghatározhatjuk a címéjüket is például (tr:Train) a tr a változó neve, ami Train típusú. zárójelek között ezután további tulajdonságokat köthetünk ki. -> jelöli a kapcsolatot két változó között, ahol a két kötőjel között [] zárójelekben megadható a kapcsolatra vonatkozó címke.

A Neo4j képes arra hogy egy ilyen lekérdezést beolvasson, és kiértékeljen majd visszatérjen a lekérdezésre adott válaszokkal. Azonban, mint minden szoftver a lekérdező rendszerek is tartalmaznak hibákat, amelyek következtében hibás kimeneteket adnak a lekérdezések eredményeként. Ezért a lekérdező rendszerek tesztelése kiemelten fontos.

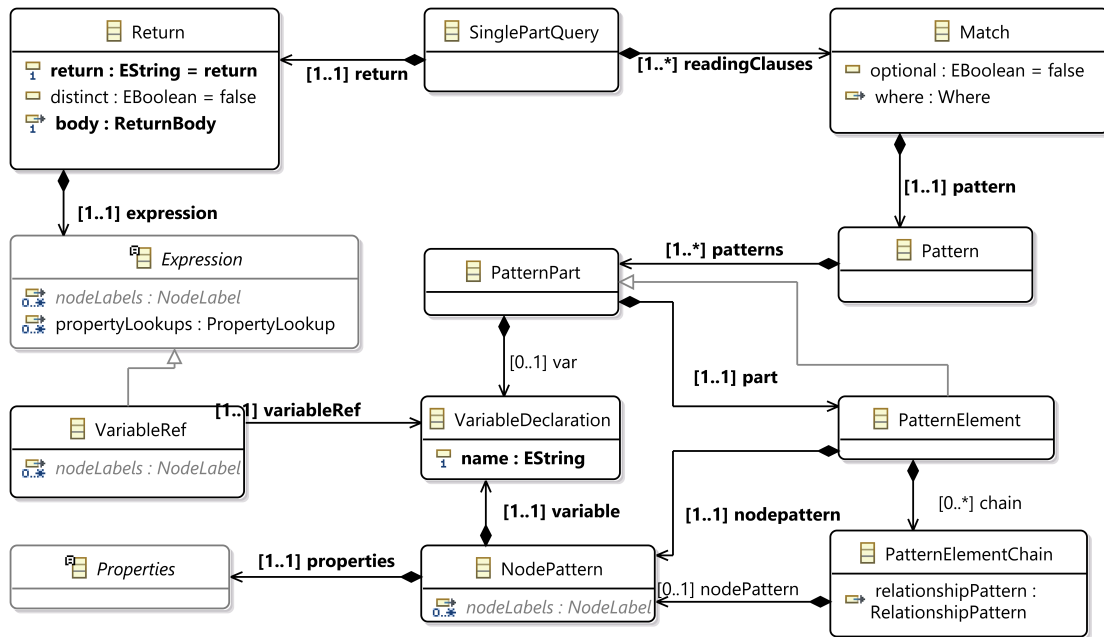
2.3. Modellezés és metamodellezés

A metamodellezés egy technika arra, hogy definiáljunk új modellező nyelveket. A Train Benchmark metamodellje a 2.3 -es ábrán látható.

A céldomén legfontosabb fogalmait és kapcsolatait foglalja össze a metamodell, így specifikálva a modellek alap struktúráját [11]. Dolgozatomban az Eclipse Modeling Framework (EMF) [5] -öt használtam metamodellezésre. EMF esetén a fogalmakat osztályokkal (EClass) a kapcsolatokat referenciákkal és attribútumokkal (EReference és EAttribute) írjuk le.

2.3.1. Cypher query-k metamodellje

A 2.4 -ös ábrán látható a korábban említett Cypher nyelv egyszerűsített metamodellje. A **SinglePartQuery** elem reprezentálja a modell gyökerét. Egy ilyen elem két részből áll : Egy **Match** és egy **Return** elemből. A **Match** elem minták összességéből áll (**Pattern**), amelyek részekre (**PatternPart**) bonthatóak. Egy ilyen részben pedig vagy tartalmaz változó dek-



2.4. ábra. Cypher metamodel

larációt, vagy egy belső részt, ami tartalmaz változó deklarációt. (**VariableDeclaration**). Ezáltal az összes változót a **Match** elemen belül deklaráljuk. A **Return** elem pedig egy kifejezést (**Expression**) tartalmaz, amelyben mindenképp szerepel egy változó referencia (**VariableRef**) is, így összekötve egymással a **Match** és a **Return** elemet.

2.3.2. Xtext

Az Xtext keretrendszer programozási nyelvek, domain-specifikus nyelvek és szöveges editorok fejlesztésére készül. Az Xtext egy erős nyelvtani szabályokkal rendelkező nyelvet használ az egyedi nyelvtanok definiálására. Ezáltal egyszerre biztosít parseolót, linkelőt, helyesírásellenőrzőt szövegkiemelést, hibaüzeneteket és írás során könnyen kiegészíthető fordítókkal, kódgenerátorokkal és egyéb modellezőeszközökkel. És a nyelvtervező mérnök határozhatja meg a nyelvnek célformátumát is. Ahhoz, hogy a Cypher nyelven megírt lekérdezéseket értelmezni lehessen a 2.4-ös metamodellel megismert elemek szintjén egy Xtext [3] keretrendszerben íródott nyelvtanra van szükség, amelyből a metamodellel automatikusan elkészült. A dolgozatomban a slizaa[13] nevű Xtext alapú Cypher nyelvtant használtam.

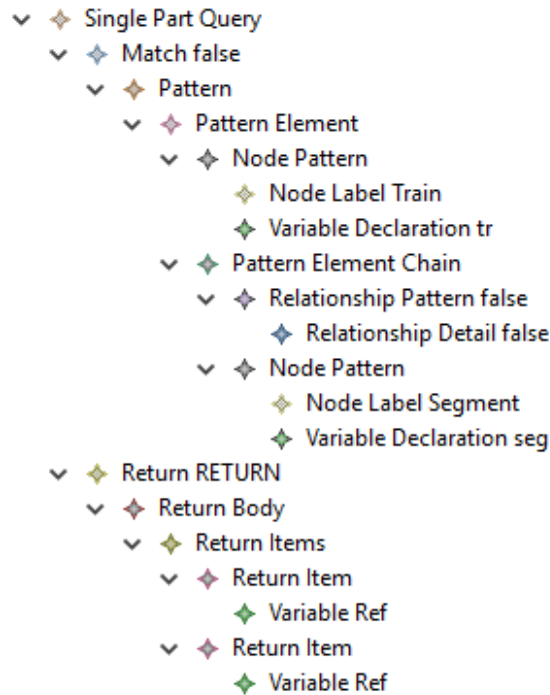
ASG

```
SinglePartQuery:
(readingClauses+=ReadingClause)* return=Return ;

Return:
(return='RETURN' distinct?='DISTINCT'? body=ReturnBody);

ReadingClause:
LoadCSV | Start | Match | Unwind | InQueryCall;
```

A fenti ábrán a SinglePartQuery elem Xtext nyelvtana látható. Azt mondja ki, hogy amikor egy ilyen elem készül akkor összerak egy vagy több ReadingClause-t (Match elem absztrakt ősosztálya, 3. nyelvtani részlet), és egy returnt. Alatta pedig a Return elem Xtext nyelvtana következik, ami azt mondja ki hogy a return elemet úgy kell sorosítani, hogy



2.5. ábra. A példalekérdezés kibontása Xtext-tel

”**RETURN DISTINCT**(ezt csak akkor kell odaírni ha ezt a tulajdonságot igazra állítottuk) kifejezés”. Tehát itt határozza meg hogy a Return elem úgy néz ki mint az alábbi lekérdezésen.

```

MATCH (tr:Train)-[:ON]->(seg:Segment)
RETURN tr, seg

```

Ezt a lekérdezést Xtext segítségével ösöztlyaira lehet bontani, és megnézni, mi mi-soda benne. Erről a 2.5 ábrán láthatunk egy példát.

2.3.3. VIATRA jólformáltsági kényszerek

Az Eclipse VIATRA keretrendszer [10] egy modell lekérdező, validáló és transzformációs eszköz. Specifikusan olyan eseményvezérelt és reaktív transzformációkra fókuszál, amelyek a modell változása közben történnek. Hibás modellrészletek hibamintákkal történő megfogalmazásával olyan jólformáltsági kényszereket is megadhatunk általa, amelyek kifejezésére a metamodel önmagában nem lenne alkalmas. A lekérdezés generálás során erre használok.

```

pattern hasMatch (q : SinglePartQuery, m: Match){
    SinglePartQuery.readingClauses(q,m);
}

@Constraint(severity = "error", key ={q}, message ="error")
pattern hasNoMatch(q : SinglePartQuery) {
    neg find hasMatch(q,_);
}

```

A fenti példán egy VIATRA kényszert láthatunk, ami egy segédmintával van meghatározva. A felső segédminta arról szól, hogy egy `SinglePartQuery`-nek van `Match`-e. Az alsó kényszer pedig ellenpéldát keres a fenti lekérdezésre, amikor a `Match` nincs kitöltve. A `@Constraint` sor azt jelenti, hogy ha az alatta levő mintára példát találunk akkor azt a modellt ott helyben dobhatjuk félre.

2.4. Gráfgenerálás

Munkám alapját mégis leginkább gráfok generálása képezi. A gráfgenerálás célja, hogy egy adott feladatra szintetizáljon gráfokat. A VIATRA Solver [15] egy korszerű nyílt forráskódú szoftver keretrendszer amely képes diverz szakterület-specifikus gráf modellek automatikus szintézisére, melyek teszt készletként használhatóak gráf alapú modellező eszközök szisztematikus tesztelése során. Bemennetként a megoldó

- a tesztelni kívánt modellező eszköz specifikációját használja fel metamodell formátumban az Eclipse Modeling Framework-öt használva
- jólformáltsági kényszerek egy halmazát a VIATRA keretrendszer használatával
- opcionálisan egy példánymodell részletet

Kimenetként pedig diverz gráfok egy halmazát generálja. Minden kimeneti gráf megfelel a metamodell specifikációinak és kielégíti az összes jólformáltsági kényszert. Struktúrájukban pedig különböznek egymástól biztosítva ezzel tesztkészlet diverzitását. Én ezt a keretrendszert használok.

3. fejezet

Áttekintés

3.1. Funkcionális áttekintés

Munkám célja hogy elkészítsek egy olyan megközelítést, amely képes gráflekérdezések automatikus generálására, gráfminitaillesztő rendszerek tesztelése. Az elképzelt keretrendszer koncepcionális elrendezését a 3.1 ábrán mutatom be. Az ötlet lényege az, hogy a tesztelni kívánt rendszer **nyelvi specifikációjának** és egy **esettanulmány szignatúrájának** (ezalatt egy olyan tulajdonsággráf adatmodell alapú adatbázis szignatúrájára gondolok amely az adott lekérdező rendszert használja) bemenetként való felhasználásával, a kimeneten szöveges és a gráfminitaillesztő rendszer nyelvén íródott lekérdezéseket kapjak.

Amint rendelkeznék egy tesztkészletnyi ilyen lekérdezővel azokat tudnám futtatni azon az adatbázison amelynek szignatúráját esettanulmányként választottam. Ha az ezzel a módszerrel generált lekérdezésekre adott válaszok válaszüdejeit összehasonlítjuk több rendszeren tudnánk **teljesítményben tesztelni** azokat. Illetve ha a generált lekérdezések helyes eredményével is rendelkeznék, (például több létező implementációt összehasonlítanánk, és egyiket a másik referenciájaként használnánk, akkor a referencia megfelelő tesztórakulunként szolgálhatna, így ellenőrizni tudnánk azt is hogy a teszt alatt álló lekérdező rendszer hogyan funkcionál, helyes válaszokat ad-e? Ha elég bonyolultak a lekérdezések, akkor az is lehetséges, hogy lesznek olyanok amelyek az egyes lekérdező motorokon nem míg másikon működnek, így azt is **tesztelni** tudnánk hogy mekkora az egyes lekérdező motorok funkcionális lefedettsége.

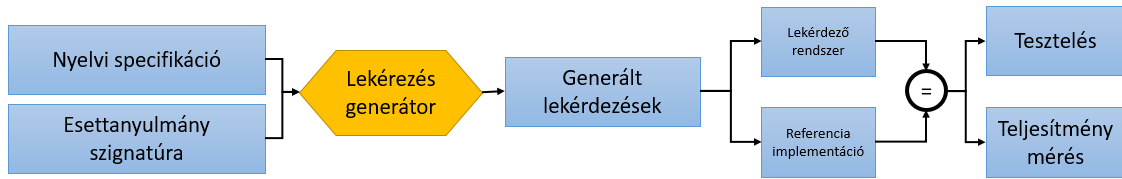
Felmerül a kérdés, hogy mégis miért lesz ez jobb, mintha íránk a lekérdezéseket magunk. Azért, mert a generálás segítségével ki tudunk törni az emberi sematikus gondolkozásból, és olyan lekérdezéseket tudunk készíteni amelyek számításokkal bizonyítottan különböző ekvivalencia osztályba tartoznak. Az ekvivalencia particionálás, egy bevett technika tesztelésnél [2], mérésekkel bizonyították, hogy a generált modellek szignifikánsan magasabb tesztfedettséget mutattak, mint a manuálisan elkészítettek [12]. Illetve nem korlátoz minket az sem, hogy a teszteléshez írt lekérdezésekből túl kevés van, mert a generátor segítségével megadott számú minta, akár óriási tesztkészlet előállítható automatikusan.

A megközelítésemet egy Neo4j [1] property gráf adatbázison mutatom be, amely a Train benchmark [14] által használt szignatúrával van felszerelve. A lekérdezéseket a Neo4j által kifejlesztet Cypher [8] nyelven generálom, a slizaa [13] által készített openCypher nyelvi specifikáció felhasználásával.

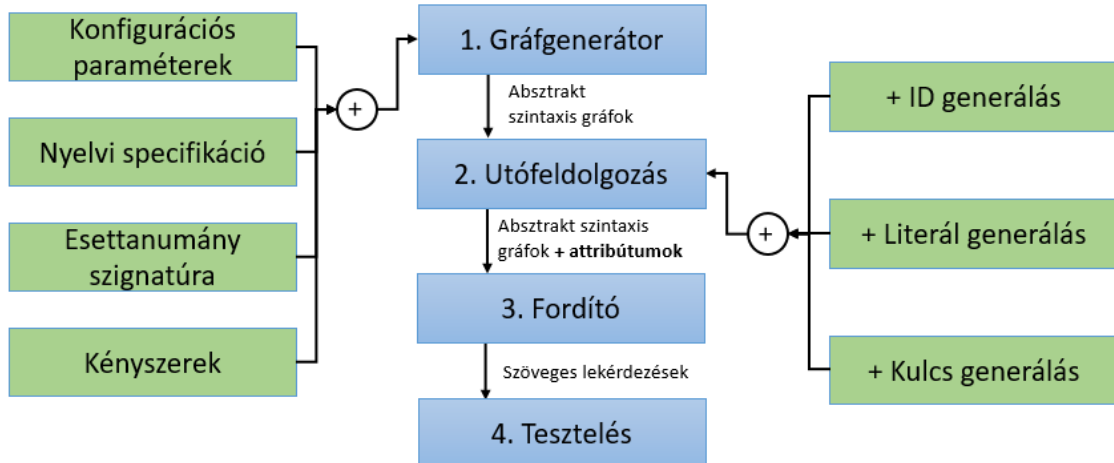
3.2. Lekérdezés generálási folyamat felépítése

A folyamat felépítését a 3.2 -es ábra segítségével ismertetem.

bekezdés
ami
Osz-
kárnak
kell



3.1. ábra. Az elképzelés funkcionális áttekintése



3.2. ábra. A lekérdezés generálási folyamat áttekintése

1. **Gráfgenerátor** A gráf generálást a Viatra Solver keretrendszer segítségével végzem. Ehhez sok különböző bemenetet kell megadnom.

- (a) **Nyelvi specifikáció:** A Cypher nyelv specifikációját tartalmazó metamodelt a nyelv egészére kiterjed. Így lekérdezéseken kívül sok egyéb műveletet is definiál, mint például létrehozás, törlés. Olyan kényelmi, extrafunkcionális elemeket is tartalmaz amelyek csak bonyolítják a lekérdezéseket, hogy felhasználóbarátabban adhassák vissza a tartalmat, például a visszatérési referencia átnevezése (`x AS "username"`). Ahhoz, hogy egyszerű lekérdezéseket generáljak nem szükséges ezt a hatalmas metamodelt feldolgozni, viszont egyértelműen meg kell határozni egy olyan részmodelljét, amelyből hiánytalanul előáll az egyszerű lekérdezések nyelvi specifikációja, továbbá a lényegtelen elemek szűrésével a generált modellsereg diverzitását is növeljük, mert így lényeges modellelemek között kell hogy különbözzenek.
- (b) **Kényszerek:** Azonban vannak olyan szabályok amelyeket a metamodelt nem tud kifejezni, betartásuk nélkül viszont a generált példánygráfok nem értelmezhetők Cypher nyelvű lekérdezéseként. Például annak meghatározása, hogy milyen változókra lehet, és milyenekre nem lehet hivatkozni a visszatérési értékben. Ezeket a szabályokat jólformáltsági kényszerekkel tartatom be.
- (c) **Konfigurációs paraméterek:** A generátor működéséhez elengedhetetlen a saját nyelvén íródott konfigurációs fájl. Itt határozható meg, hogy milyen megoldóval működjön a generálás, hogy hányat használjon az egyes elemekből a generálás során, hogy mekkora és milyen mennyiségű példányokat generáljon stb.
- (d) **Esettanulmány szignatúra :** A generált példánygráfok változók nélkül jönnek létre. Ahhoz, hogy egy értelmes adatbázison végezhessek el őket, fontos hogy

fel legyenek fegyverezve az adatbázisban használt címkékkal, típusokkal. Mivel én a Train Benchmark által használt adatbázison futtattam lekérdezéseimet, ezért az általa használt szignatúrával szereltem fel a rendszert.

2. **Utófeldolgozás** : Az általam generált gráfokban a változóknak nem adok nevet. Megtehetném, hogy a generálás során kitöltöm őket, de csak úgy, hogy a gráfgenerátor a generált szavakat különbségekként kezelje két példánygráf között. A nagyobb diverzitás elérésének érdekében a generátor nem foglalkozik a változók elnevezésével. Az utófeldolgozás során az Esettanulmány szignatúra szavaival töltöm fel az addig még csonka példánygráfokat.
3. **Fordító** : Az utófeldolgozás során sorosíthatóvá vált példány gráfokat a Cypher nyelv XText nyelven íródott nyelvtanának segítségével szöveges lekérdezésekké alakítom.

4. fejezet

Gráflekérdezések automatikus generálása

4.1. Lekérdezések generálása

4.1.1. Tesztelni kívánt résznyelv kiválasztása

A gráfgenerátor egyik bemenete a tesztelni kívánt nyelvi fregmens metamodellje. Ahhoz, hogy hasznos tesztesetek állítsunk elő, szükséges a generátort egy konkrét feladatot ellátó modellek előállítására konfigurálni. (Ha az egész nyelvet használnánk akkor a lekérdezése érdektelen részletekből állna, például kommenteket, felesleges változó átnevezéseket, lekérdezéssel kapcsolatos metainformációkat generálna.) Munkám során tehát az első feladat az volt, hogy kiválasszam a Cyphernek egy olyan résznyelvét amellyel érdekes lekérdezéseket lehet generálni. Dolgozatomban olyan úgynevezett pozitív mintájú lekérdezések generálására koncentráltam, amelyek vizsgálják a csomópontok típusát illetve a csomópontok közötti kapcsolatok típusát. Ugyanis számos lekérdező nyelvben, mint például Cypher[8] és VIATRA [10] ezek képezik a lekérdezések alapját.

Alább azt kívánom megmutatni, hogy egy példalekérdezés alapján hogyan szűkítettem le a slizaa [13] nevű Xtext alapú Cypher metamodellt.

```
MATCH (train : Train {name : "train1"})-[:ON]->(seg : Segment {name : "seg3"})
RETURN seg
```

A szűkítést a fenti lekérdezés alapján végeztem a következő módszerrel:

- Felírtam a fenti lekérdezést a query editorban.
- Kibontottam Xtext segítségével.
- Megnyitottam a nyelvtan metamodelljét.
- A konfigurációs fájlban egy metamodel deklarációs mappába összegyűjtöttem a kibontott fában található osztályokat.
- A nyelvtan alapján kiválogattam az osztályok őssztályait, illetve a használt/használható asszociációkat.
- A nyelvtanban ezen kívül növeltem a muptiplicitását legalább 1-re azoknak az elemeknek amelyek generálása elengedhetetlen az értelmes lekérdezések létrejöttéhez.

4.1.2. Jólformáltsági kényszerek betartása

A gráfgenerátor másik bemenete olyan kényszerek halmaza, amelyek szükségesek ahhoz, hogy értelmes modelleket tudjunk generálni. Ezekre főleg azért van szükség, mert az Xtext-ben [3] íródott nyelvtan és a nyelvtan metamodellje közötti konverzió nem tökéletes. Ennek több oka is van: (1) A precíz metamodel meghatározása számításilag komoly kihívást jelent és nem is végezték el a keretrendszer megalkotói, (2) A metamodelnek hibás modellek leírására is alkalmasnak kell lennie (hiszen szerkesztés közben általában félkész modellek vannak a rendszerben) (3) A metamodel a modelleknek csak az alap struktúráját (referencia hova mutathat) írja le bonyolultabb szabályok (összetett logikai kifejezések) meghatározására alkalmatlan.

Jólformáltsági kényszerekre azért van szükség, mert nem minden a metamodellel leírható modell sorosítható Cypher nyelvű lekérdezéssé. Az Xtext Cypher nyelvtanban leírt parseolhatósági szabályokat át kell fordítani ASG-n értelmezett struktúrális kényszerekké.

```
pattern hasReference(retI : ReturnItem, variRef : Expression){
    VariableRef(variRef);
    ReturnItem.expression(retI, variRef);
}

@Constraint(severity="error", key={ri}, message = "error")
pattern hasNoReference(ri : ReturnItem){
    neg find hasReference(ri, _);
}
```

A fenti kényszerre azért volt szükség, mert a metamodelben nem volt megadva, hogy a **RETURN** szó után kötelező legalább egy változóra referálni is. Pedig ha nem referálnánk itt változót a **MATCH** ágon megfogalmazott mintából, akkor nem lenne értelme a minta megírásának, illetve a válasznak sem.

A felső minta meghatározza hogy hogyan néz ki egy olyan **ReturnItem** aminek van **VariableRef** a visszatérési értékében. Az alsó pedig egy kényszer, ami arra kényszeríti a generátort hogy eldobja az összes olyan modellt, amiben nem találja meg a felső mintát.

```
pattern wellLookingPattern (patt : Pattern, patternElement : PatternElement){
    Pattern.patterns(patt,patternElement);
}

@Constraint
pattern notWellLookingPattern(patt : Pattern){
    neg find wellLookingPattern(patt , _);
}
```

A fenti kényszerre azért volt szükség, mert a metamodel alapján egy **Pattern**-be a **.patterns** tulajdonság beállításakor sok féle elem kerülhetett volna, viszont sok akár a mostaninál bonyolultabb példalekérdezés során sem volt precedens arra, hogy nem **PatternElement** -ek kerültek bele. Ezért úgy döntöttem, hogy a konzisztensebb és gyorsabb generálás érdekében megtiltom a generátornak, hogy jóként fogadjon el más megoldást.

```
@Constraint
pattern patternElementHasVar(pE : PatternElement, vari: VariableDeclaration){
    PatternElement.^var(pE,vari);
}

@Constraint
```

```
pattern patternElementHasPart(pE : PatternElement, pp : PatternPart){
    PatternElement.part(pE,pp);
}
```

A fenti két kényszerre azért volt szükség, mert a `PatternElement` osztály örököl a `PatternPart` osztálytól egy `var` és egy `part` tulajdonságot, pedig ilyen tulajdonságokkal nem szabadna rendelkeznie, csak ez az információ elveszett a Cypher Xtext nyelvtanának metamodellé generálódása során. Ezért hibásnak nyilvánítom azokat a `PatternElement`-eket, amelyek rendel a két tulajdonság valamelyikével.

```
pattern pe(pe:PatternElement) {
    PatternElement(pe);
}

@Constraint
pattern notPatternElement( pp : PatternPart){
    neg find pe(pp);
}
```

A munkám során vizsgált példalekérdezések között nem volt olyan `PatternPart`, ami nem volt `PatternElement`. Viszont a generátor számára meghatározott metamodellben mindkét osztály szerepel, és egyik sem absztrakt, így a generátor sokat bajlódna `PatternPart`-ok generálásával, ezzel fontos időt veszítve. Ettől a lehetőségtől a fenti kényszer segítségével megfosztom.

```
@Constraint
pattern notWellLookingMapLiteral(mapLiteral : MapLiteral, nodeLabel: NodeLabel){
    MapLiteral.nodeLabels(mapLiteral,nodeLabel);
}
```

A `MapLiteral` osztály örököl egy `nodeLabels` tulajdonságot, és ezáltal nyelvtanilag helytelenné válik, mivel a `MapLiteral`-ok a következőképpen néznek ki a Cypher nyelven: `name : "seg3"` és egyéb elemek nem kerülhetnek bele.

```
pattern wellDeepMap(mapLiteralEnrty: MapLiteralEntry, string : StringLiteral){
    MapLiteralEntry.value(mapLiteralEnrty,string);
}

@Constraint
pattern notWellDeepMap(mapLiteralEnrty : MapLiteralEntry){
    neg find wellDeepMap(mapLiteralEnrty, _);
}
```

Erre a mintára pedig azért van szükség, mert ha nem lennének akkor a következőhöz hasonló értelmetlen lekérdezések generálása válna lehetővé:

```
MATCH (seg : Segment {name : {name2 : {name3: { name4 : seg4}}}}})
RETURN seg
```

És a generátor nagy méretű modelleknél könnyen esne abba a hibába hogy az extra csúcspontokat így pocsékolja el.

4.1.3. Diverzitás biztosítása

A generált modellszekvencia használhatatlan lenne, ha a lekérdezések között nem, vagy csak lényegtelen különbségek lennének. Dolgozatomban több féle szinten is garantáltam a lekérdezések diverzitását (elkerülve ezzel hogy túlságosan hasonló lekérdezések szülessenek). A diverzitás biztosítása kiemelten fontos tesztgenerálási feladatoknál, mert így hatékony ekvivalencia partíciónálást biztosíthatunk. Generálás során az alábbi lényegi különbségeket garantáljuk.

- Egyenértékű változók elnevezésétől függetlenül azonosnak találjuk az alábbi két megoldást, hiszen a válasz a két lekérdezésre azonos értékeket adna vissza.

```
MATCH ( V1 : Segment )-->( V2 : Segment ) RETURN V1 , V2
MATCH ( Var1 : Segment )-->( Var2 : Segment ) RETURN Var1 , Var2
```

- A változók sorrendezésétől függetlenül azonosnak tekintjük az alábbi két problémát, hiszen a két lekérdezés ugyanazt a táblázatot adná vissza csupán az oszlopokat fordított sorrendben jelenítené meg.

```
MATCH ( V1 : Segment )-->( V2 : Segment ) RETURN V1 , V2
MATCH ( V1 : Segment )-->( V2 : Segment ) RETURN V2 , V1
```

- A attribútumok ellenőrzésének sorrendje nem számít, hiszen ugyanannak a csomópontnak attribútumairól van szó, mindegy milyen sorrendben írjuk.

```
MATCH ( Var1 : Segment { signal : "String1", currentPosition : "String2" })
RETURN Var1
MATCH ( Var1 : Segment { currentPosition : "String2", signal : "String1" })
RETURN Var1
```

- Illetve a vesszővel elválasztott minta részek sorrendje sem változtat a lekérdezés eredményén, mert ezek metszetét értékeli ki a lekérdező rendszer.

```
MATCH ( V1 : Segment { signal : "String1" } ) ,
      ( V2 : Route { length : "String2" } )
RETURN V1 , V2
MATCH ( V2 : Route { length : "String2" } ) ,
      ( V1 : Segment { signal : "String1" } )
RETURN V1 , V2
```

A fenti példák nem tartalmazzak lényegi szűrést, továbbra is az összes lehetséges lekérdezés generálható marad.

Továbbá az alábbi extra diverzitást is biztosítottam a lekérdezések létrehozása során:

- Két struktúráisan hasonló lekérdezést nem különböztetünk meg. Struktúráisan hasonlóknak azokat a lekérdezéseket tekintem amelyek a típusnevek átírásával azonosná válnának.

```
MATCH ( V1 : Segment )-->( V2 : Segment ) RETURN V1 , V2
MATCH ( V1 : Route )-->( V2 : Switch ) RETURN V1 , V2
```

- A literál értékeket is hasonlóknak tekintjük az előző ponthoz hasonlóan ez is a struktúráis különbségek létrehozásnak érdekében történik.

```
MATCH ( Var1 : Segment { signal : "String1" }) RETURN Var1
MATCH ( Var1 : Segment { signal : "String2" }) RETURN Var1
```

- A generátoron belül a diverzitás szintet magasra állítottam. Ez aszerint növeli a különbségeket két gráf között, hogy megvizsgálja a csomópontok szomszédságát (a csomóponttal szomszédos csomópontok halmaza). És nem generál több, csak azonos szomszédságokból álló gráfot.

4.2. Utófeldolgozás

Az előző fejezetben kifejtettem miért jó a változókat csak utólag elnevezni. Ezt a feladat-részt az utófeldolgozás során végzem el. Itt adom hozzá ezen kívül azokat a részleteket is a modellekhez, ami mindegyikben azonos, ezért a generálás során nem foglalkoztam vele.

Ahhoz, hogy értelmesen nevezzem el az egyes változókat, a Train Benchmark-ban használt kifejezéseket és értékeket osztom ki, amik láthatóak a 2.3. ábrán. Három féle elemet kell elneveznünk a jelenleg generált modellekben. (1) csomópont címkék `NodeLabel.labelName`, (2) kapcsolat címkék `RelationshipDetail.relTypeNames` és (3) tulajdonság címkék `MapLiteralEntry.key`. Ezek mind megfeleltethetők az ábrán látható elemeknek. A csomópont címkék az osztályok neveinek, a kapcsolat címék az asszociációk neveinek, míg a tulajdonságcímkék az attribútumoknak. Ezért készítettem három listát a megfelelő nevekkal.

1. csomópont címkék : Region, Route, Segment, Semaphore, Sensor, Switch, SwitchPosition
2. kapcsolat címkék : connectsTo, entry, exit, follows, monitoredBy, monitors, requires, target
3. tulajdonság címkék : id, active, position, currentPosition, length, signal

Ezután szükségem volt egy randomizáló függvényre, amely a megfelelő nevek valamelyikét elhelyezi egy-egy elemen. Majd bekötöttem mindhárom típus minden elemére a megfelelő szavakat. Ezen kívül a lekérdezésekben vannak még változók is amelyeket szisztematikusan elneveztem $V_1 \dots V_n$ -el, illetve literálok amiket pedig "String1"... "Stringn"-el neveztem el.

Ezzel lehetnek olyan problémák, hogy a lekérdezések értelmetlennek bizonyulnak, például:

```
MATCH ( Var1 : Segment { signal : "String1" }) RETURN Var1
```

Hiszen a Train Benchmark metamodellje alapján egy szegmensnek nincsen singnal tulajdonsága, tehát egy metamodell alapján felépített gráf adatbázisban nem találunk a lekérdezésben szereplő mintát. A Neo4j gráfadatbázisára viszont igaz, hogy csak enyhén típusos, ezért igazából nem kezel metamodelleket adatbázis szinten, ha akarnánk bele tudnánk írni egy olyan csomópontot, ami Segment címkét kap és signal tulajdonsággal rendelkezik, és a felhasználókat semmi nem akadályozza meg abban, hogy esetleg értelmetlen gráfadatbázist hozzanak létre. így amikor keresünk egy ilyen adatbázisban fel kell hogy legyen készülve arra, hogy olyan dolgot keresünk amit nem találhatunk meg.

4.3. Fordítás

A generált gráfokat az utófeldolgozás után kifejezések ASG-je ként értelmezem, majd a nyelvtani szabályok fordított irányú alkalmazásával szöveges dokumentummá alakítom. A fordító a szöveggé alakítás során szóközöket rak a szükséges helyekre, behelyettesíti a változók neveit a rájuk mutató referenciákba, kitölt a nyelvtani szabályokban meghatározott szavakat pl: **MATCH**, **RETURN**, illetve megfelelő helyekre zárójeleket rak. A fordítást az Xtext keretrendszerének segítségével automatizáltam.

5. fejezet

Értékelés

Ebben a fejezetben kiértékelem munkámat mialatt megválaszolom a következő kérdéseket:

- **Kérdés1:** Hogy aránylik egymáshoz az előfeldolgozás, a generálás és az utófeldolgozás időtartama?
- **Kérdés2:** Hogy skálázódik a generálás modell méret szempontjából?
- **Kérdés3:** Hogy skálázódik a generálás modell darabszám szempontjából?
- **Kérdés4:** Mennyire diverzek a lekérdezések? (egymás utáni 50 illetve 50 független)

5.1. Mérési környezet felállítása

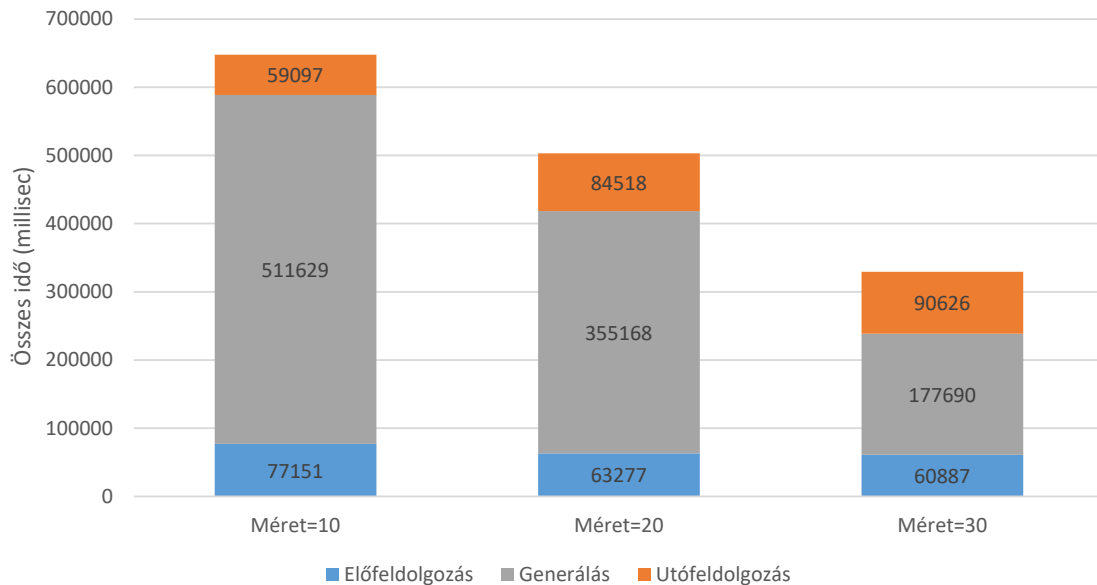
A méréseket eclipse fejlesztői környezetben végeztem. Ahhoz, hogy bemelegítsem a modell generátort memóriakezelés és optimalizálás szempontjából 5 extra futást adtam hozzá minden kiértékelt mérés előtt. A mérésekhez a generátor számára 4000 MB memóriát biztosítottam, és ez mindig elegendőnek bizonyult. Az összes mérést egy egyszerű asztali számítógépen végeztem (Intel Core i7-3520M CPU, 2.90GHz, Windows 10 Pro). A generáláshoz részmodellként egy 22 elemből álló ASG-t adtam meg, de csak az esszenciális részletek specifikálásával. Erre az alapra építve két különböző mérési környezetet implementáltam, hogy mind a 4 kérdésre választ tudjak adni. A két környezetben generált gráfokat elkészültük után egy utófeldolgozás fázison mennek keresztül, ahol cypher nyelvű lekérdezésekké fordítom le őket.

5.1.1. M1: Kevés al-környezet, sok példány modell

A első mérési környezet három al-környezetből áll. A három al-környezet csak a generálás során hozzáadott csomópontok minimális számának meghatározásában különbözik egymástól. A három környezetben rendre legalább 10, 20 illetve 30 csomópontot generáltam a részmodellben megadottak mellé. Mindhárom al-környezetben 12 alkalommal végeztem el a méréseket, és minden mérés során 50 példány modellt generáltam.

5.1.2. M2: Sok al-környezet, kevés példány modell

A második mérési környezet 13 al-környezetből áll. Minden al-környezetben 10 alkalommal végeztem el a méréseket, és minden alkalommal 10 példány modellt generáltam. A 13 al-környezetben rendre legalább 5, 10, 15, ..., 50, 100, 150, 200 csomópontot generáltam a részmodellben megadottak mellé.



5.1. ábra. A K1 mérés eredményei

5.2. A futásidő összetétele

A futásidő összetételének vizsgálatát az M1 mérési környezetben végeztem el. A mérés eredményei az 5.1. ábrán láthatóak. Az ábra segítségével azt szeretném bemutatni, hogy a különböző futásidők nagyságrendileg mekkora részét képezik a futásidő egészének. A három szín három értéket reprezentál: az előfeldolgozás idejét kék színnel, a generálás idejét szürke színnel, az utőfeldolgozás idejét pedig narancssárga színnel jelöltem. A grafikon vízszintes tengelye a teljes futásidőt mutatja meg. Az első oszlop a 10 a második a 20 a harmadik pedig a 30 hozzáadott csomópontban minimalizált al-környezetben végzett mérések futásidejének összegét ábrázolja.

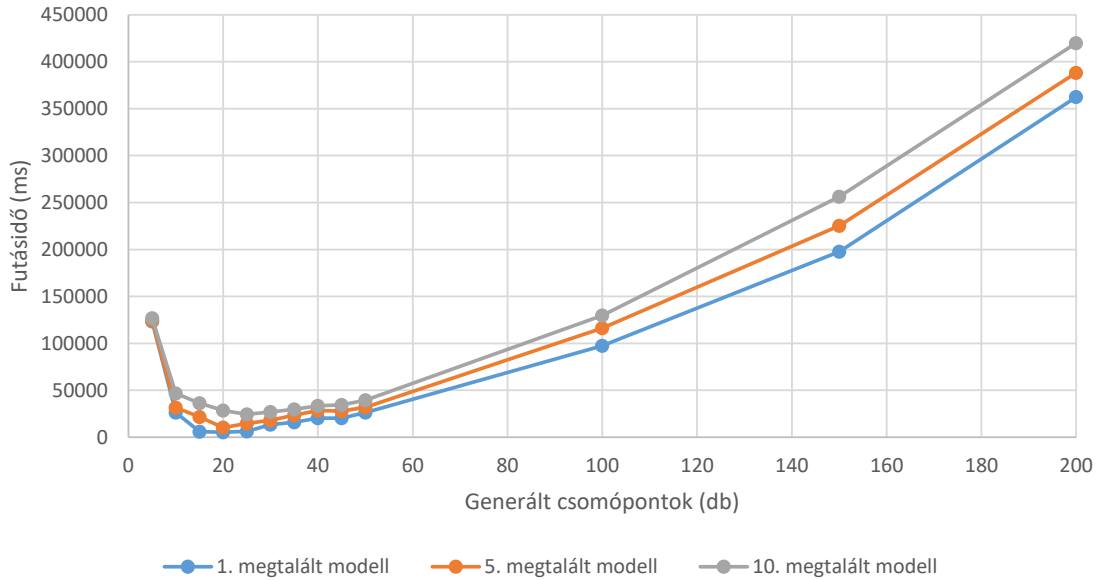
Az ábrán látható, hogy míg az elő és az utőfeldolgozás összes ideje nem mutat jelentős különbséget a három esetben, addig a generálás időtartama szignifikánsan különbözik. Láthatóan a legkisebb méretnél a leghosszabb és a legnagyobb méretnél a legrövidebb. Ennek az okát következő szekcióban fejtem ki.

Végeredményben levonhatom a következtetést, hogy a futásidő leghosszabb részét a generálás ideje teszi ki, míg az előfeldolgozás és az utőfeldolgozás arányaiban megegyező időtartamú, kisebb modellek esetében az előfeldolgozás, nagyobbak esetében pedig az utőfeldolgozás tart tovább.

5.3. Skálázódás a modellek méretének függvényében

A második kérdésben felállított problémára az M2-es környezetben kerestem a választ. A mérés eredményei az 5.2. ábrán láthatóak. A következtetéseimet az 1., az 5. és a 10. modell megtalálásának időpontjából vontam le. A 12 mérés során számolt futásidők mediánját ábrázoltam. A vízszintes tengelyen a hozzáadott csomópontok minimális elemszáma, míg a függőleges tengelyen az adott modell megtalálásához szükséges futásidő látható.

Látható, hogy kis minimum darabszámú generált elem hozzáadásával nehezebben boldogult a generátor, mint a közepes elemszámokkal, ám a hatalmas modellek megtalálása is egyre nehezebb feladatnak bizonyult. A kis modelleknél mért lassúság azzal magyarázható, hogy a megadott részmodell elég nagy, (22 elem) emiatt tovább kell keresgélni, hogy



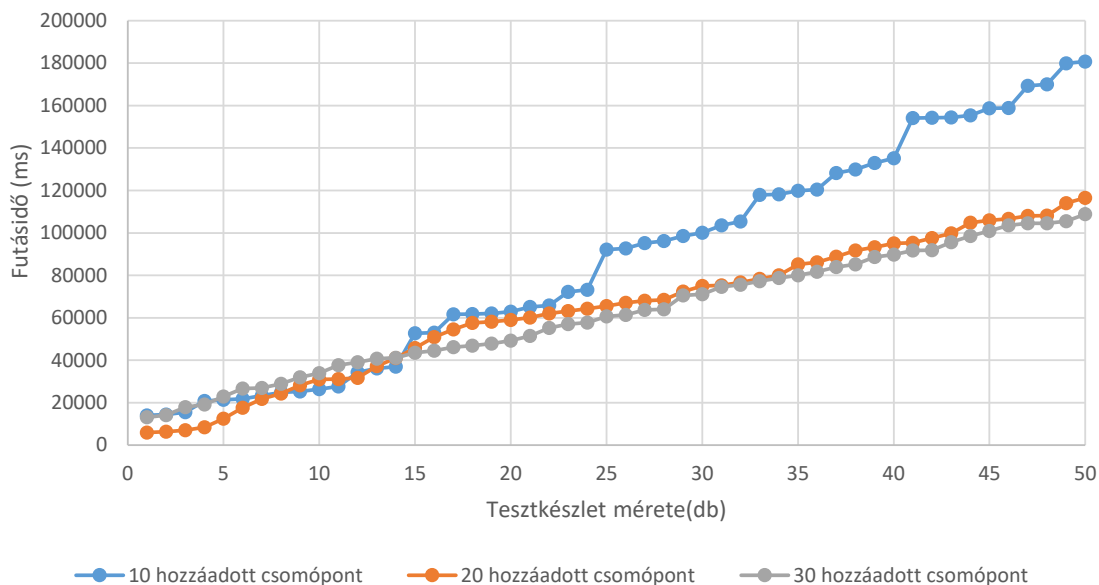
5.2. ábra. A K2 mérés eredményei

10 hozzáadott elemből ki tudja-e tölteni az összes szükséges helyet, illetve ha nem tudja akkor növelnie kell a hozzáadott csomópontok számát, és újrapróbálkozni.

A vizsgált alkalmazás nagyobb modelleknél négyzetes karakterisztikát mutat. A gráf-generálás egy NP-nehéz probléma, így a négyzetes karakterisztika remek eredmény, de tetszőleges méretű lekérdezések elkészítésére nem biztos hogy alkalmas.

Tehát végeredményben állíthatom, hogy a generátor szépen egyszerűsíti ki a problémát és 200 generált csomópontra még elfogadható futásidővel működik. (Alább egy 200 csomópontból álló kifejezés látható illusztrációként). A lenti lekérdezés benchmarkolásra alkalmas hosszúságú.

```
MATCH ( V1 : Semaphore { signal : "String1" } ) ,
  ( V2 : Semaphore { position : "String2" , length : "String3" } ) ,
  ( V3 : Region { id : "String4" , length : "String5" } ) ,
  ( V4 : Semaphore { length : "String6" , active : "String7" } ) ,
  ( V5 : Route { signal : "String8" , currentPosition : "String9" } )
  - [ V6 : requires { length : "String10" , position : "String11" } ] -
  ( V7 : Region { currentPosition : "String12" , length : "String13" } )
  - [ V8 : entry { signal : "String14" , active : "String15" } ] -
  ( V9 : Route { active : "String16" , currentPosition : "String17" } ) ,
  ( V10 : Segment { length : "String18" , signal : "String19" } ) ,
  ( V11 : Semaphore { id : "String20" , active : "String21" } ) ,
  ( V12 : Route { signal : "String22" } ) ,
  ( V13 : Region { position : "String23" , signal : "String24" } ) ,
  ( V14 : Region { currentPosition : "String25" , length : "String26" } ) ,
  ( V15 : Route { currentPosition : "String27" , currentPosition : "String28" } ) ,
  ( V16 : Segment { currentPosition : "String29" , position : "String30" } ) ,
  ( V17 : Switch { length : "String31" , currentPosition : "String32" } ) ,
  ( V18 : Semaphore { id : "String33" , signal : "String34" } )
RETURN V5 , V10 , V7 , V14 , V18 , V9 , V6 , V16
```



5.3. ábra. A K2 mérés eredményei

5.4. Skálázódás a modellek darabszámának függvényében

A harmadik kérdésre az M1-es környezetben kerestem a választ. A mérés eredményei az 5.3. ábrán láthatóak. Az 50 darab generált modell megtalálásának ideje nem volt azonos a 12 alkalommal, ezért a 12 érték mediánját kiválasztottam, az ábrán ezeket a medián értékeket jelenítettem meg. A 3 al-környezet mérési eredményeit 3 színnel jelöltem. Az ábrán a függőleges tengelyen a futásidő látható milliszekundumban, a vízszintes tengelyen pedig a létrejött tesztkészlet mérete.

A három mérés eredményei külön-külön megfeleltethetők egy lineáris trendvonalnak, ez azt jelenti, hogy az egyes modellek megtalálása körülbelül ugyanannyi időt vesz igénybe. Ezen az ábrán is látható, hogy a generátor lassabban végzett a kis modellek megtalálásával mint a nagyokéval.

Mivel közel lineáris egyenesek születtek a mérés eredményeként, levonható a következtetés, hogy az egyes modelleket körülbelül azonos időközönként találja meg a generátor, tehát a modellek darabszámának függvényében remekül skálázódik a módszer.

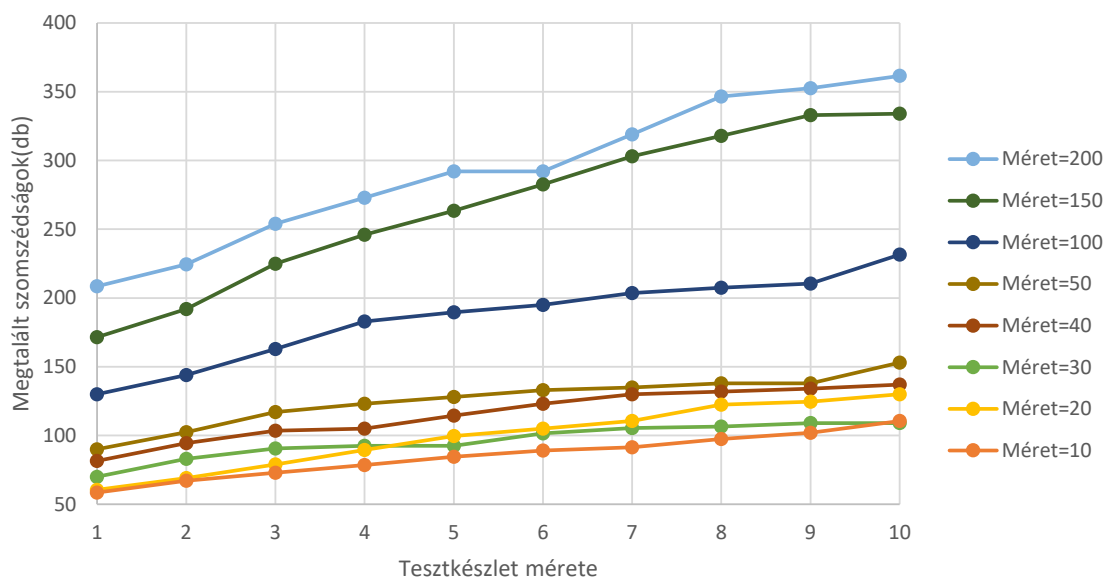
5.5. Diverzitás mérése

Az M1-es környezetben végzett mérések során generált lekérdezések diverzitását is ki-mértem. Ezt szomszédsági formák segítségével tettem. A mérés eredményei a ?? ábrán láthatóak. Az ábra vízszintes tengelyén a tesztkészlet mérete látható, míg a függőleges tengelyen a megtalált szomszédságok darabszáma. Az ábrázolt értékek a különböző minimális hozzáadott elemszámok esetén a 10 mérés mediánját mutatják.

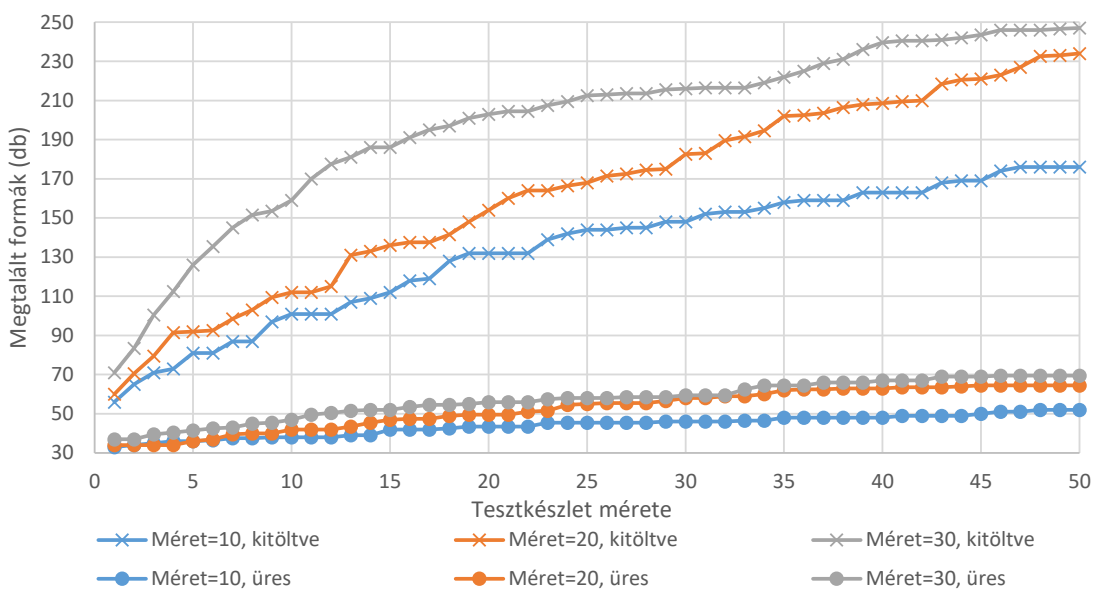
Az ábrán látható, hogy a szomszédságok száma körülbelül lineárisan növekszik az különböző esetekben. A nagyobb lekérdezések esetén azért sokkal több a szomszédság mint a kisebbek esetén, mert ezen az ábrán már a cypher nyelvre lefordított, nevekkel kitöltött lekérdezések szomszédságait ábrázoltam.

Levonható tehát a következtetés, hogy a diverzitás folyamatosan lineárisan növekszik a lekérdezések tehát szignifikáns különbségeket tartalmaznak

Az M2-es környezetben a lekérdezések és nyers kitöltetlen gráfok diverzitását egyaránt ki-mértem. A mérés eredményei a ?? ábrán láthatóak. Az ábra vízszintes tengelyén



5.4. ábra. A K2-es mérés diverzitása



5.5. ábra. K3-as mérés diverzitása

a tesztkészlet mérete látható, a függőleges tengelyen pedig a megtalált szomszédságok darabszáma. Az ábrázolt értékek a 10 elvégzett mérés során kapott értékek mediánjai.

Az ábrán látható, hogy a kitöltetlen modellek sokkal kisebb diverzitást mutatnak mint a kitöltöttek. Illetve az is látható, hogy a kevés modellnél még lineárisan közelíthető növekedés sok modellnél logaritmikussá alakul.

Az általam bevitt diverzitás növelését segítő módszerek tehát hatékonyak, illetve a generálás során a diverzitás folyamatosan növekszik.

5.6. Lehetséges mérési hibák

- Egyetlen esettanulmányon futtattam a méréseket, de ez egy reprezentatív, korszerű, aktívan fejlesztett teljesítmény benchmark, amelyet már több más esettanulmányban is alkalmaztak.[] 1 2 3
- Csak pozitív mintájú lekérdezések generálásával foglalkoztam, de mivel ezek adják az összes lekérdezés alapját ezért jó reprezentatív esetnek tartom őket. Illetve a nyelvtan is tőlem függetlenül fejlesztik, és az annak is ezek adják az alapját
- A futásidő és diverzitásban mindent csak 10szer futtattam, de a futásidők és a diverzitások nem mutattak nagy eltéréseket egymástól. Továbbá a mérési zajt medián számítással mértem ki és a bemelegedés hatását a generálások megismétlésével küszöböltem ki a futásidő stabilizálódást megvárva az éles mérések előtt.
-

6. fejezet

Összefoglalás

6.1. Elméleti eredmények

6.2. Gyakorlati eredmények

6.3. Jövőbeli tervek

Köszönetnyilvánítás

Ez nem kötelező, akár törölhető is. Ha a szerző szükségét érzi, itt lehet köszönetet nyilvánítani azoknak, akik hozzájárultak munkájukkal ahhoz, hogy a hallgató a szakdolgozatban vagy diplomamunkában leírt feladatokat sikeresen elvégezze. A konzulensnek való köszönetnyilvánítás sem kötelező, a konzulensnek hivatalosan is dolga, hogy a hallgatót konzultálja.

Irodalomjegyzék

- [1] 2018 October 16–2018 October 15: The neo4j graph platform – the #1 platform for connected data. URL <https://neo4j.com/>.
- [2] Ilene Burnstein: *Practical software testing: a process-oriented approach*. 2006, Springer Science & Business Media.
- [3] Sven Efftinge–Miro Spoenemann: Why xtext?
URL <https://www.eclipse.org/Xtext/#feature-overview>.
- [4] Graph database | multi-model database. URL <https://orientdb.com/>.
- [5] Richard Gronback: Eclipse modeling framework (emf).
URL <https://www.eclipse.org/modeling/emf/>.
- [6] High-performance human solutions for extreme data.
URL <http://sparsity-technologies.com/#sparksee>.
- [7] József Marton–Gábor Szárnyas–Márton Búr: Model-driven engineering of an opencypher engine: Using graph queries to compile graph queries. In *International SDL Forum* (konferenciaanyag). 2017, Springer, 80–98. p.
- [8] Neo4j’s graph query language: An introduction to cypher.
URL <https://neo4j.com/developer/cypher-query-language/>.
- [9] Oracle database technologies.
URL <https://www.oracle.com/database/technologies/index.html>.
- [10] Scalable reactive model transformations. URL <https://www.eclipse.org/viatra/>.
- [11] Oszkár Semeráth–Ágnes Barta–Ákos Horváth–Zoltán Szatmári–Dániel Varró: Formal validation of domain-specific languages with derived features and well-formedness constraints. *Software & Systems Modeling*, 16. évf. (2017) 2. sz., 357–392. p.
- [12] Oszkár Semeráth–Dániel Varró: Iterative generation of diverse models for testing specifications of dsl tools. In *International Conference on Fundamental Approaches to Software Engineering* (konferenciaanyag). 2018, Springer, 227–245. p.
- [13] Slizaa: slizaa/slizaa-opencypher-xtext, 2018. Aug.
URL <https://github.com/slizaa/slizaa-opencypher-xtext>.
- [14] Gábor Szárnyas–Benedek Izsó–István Ráth–Dániel Varró: The train benchmark: cross-technology performance evaluation of continuous model queries. *Software & Systems Modeling*, 17. évf. (2018) 4. sz., 1365–1393. p.
- [15] Viatra: viatra/viatra-generator, 2018. Oct.
URL <https://github.com/viatra/VIATRA-Generator>.