

# Adaptacyjny parsing LL(\*): moc dynamicznej analizy

Terence Parr, University of San Francisco, parrt@cs.usfca.edu  
Sam Harwell, University of Texas at Austin, samharwell@utexas.edu  
Kathleen Fisher, Tufts University, ksher@eecs.tufts.edu

19 sierpnia 2017

Tłumaczenie na język polski: Andrzej Borucki; oryginalny dokument ‘Adaptive LL(\*) Parsing: The Power of Dynamic Analysis’

<http://wwwantlr.org/papers/allstar-techreport.pdf>

Licencja:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.pl>

Pliki do zbudowania na githubie:

<https://github.com/borneq/ALL-translation-pl>

## Streszczenie

Pomimo postępów wprowadzanych przez nowoczesne strategie analizy składniowej, takie jak PEG, LL(\*), GLR, i GLL, analiza składniowa nadal pozostaje nierozwiązanym problemem. Istniejące podejścia cierpią na szereg niedociągnięć, w tym trudności wspierające efekty uboczne akcji osadzonych, powolność i/lub nieprzewidywalną wydajność, oraz sprzeczne strategie dopasowania. Artykuł ten przedstawia strategię analizy składniowej ALL(\*), która łączy w sobie prostotę, skuteczność i przewidywalność konwencjonalnych zstępujących parserów LL(k) z siłą mechanizmów GLR odnośnie analizy decyzyjnej. Kluczową innowacją jest nakierowanie analizy gramatycznej na działanie podczas czasu parsowania, która umożliwia ALL(\*) obsługę wszelkiej nielewostronnej rekurencyjnej bezkontekstowej gramatyki. ALL(\*) ma złożoność czasu parsowania teoretycznie  $O(n^4)$ , ale konsekwentnie działa liniowo na gramatykach wykorzystywanych w praktyce, wyprzedzając ogólne strategie, takie jak GLL i GLR o rzędy wielkości. ANTLR 4 generuje parsery ALL(\*) i obsługuje bezpośrednią lewostronną rekurencję poprzez przepisanie gramatyki. Powszechne stosowanie ANTLR 4 (5000 pobrań miesięcznie w 2013) dostarcza dowodów, że ALL(\*) jest skuteczne dla szerokiej gamy zastosowań.

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Wprowadzenie</b>	<b>2</b>
1.1	Dynamiczna analiza gramatyczna . . . . .	4
<b>2</b>	<b>ANTLR 4</b>	<b>5</b>
2.1	Przykładowa gramatyka . . . . .	6
2.2	Usuwanie lewostronnej rekurencji . . . . .	6
2.3	Analiza leksykalna przy użyciu ALL(*) . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Wprowadzenie do analizy składniowej ALL(*)</b>	<b>7</b>

3.1	Przewidywania wrażliwe na stos wywołań . . . . .	9
3.2	Dwuetałowa analiza składowa ALL(*) . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Gramatyka predykowa, ATN i DFA</b>	<b>10</b>
4.1	Gramatyka predykowa . . . . .	10
4.2	Sprecyzowanie niejednoznaczności . . . . .	11
4.3	Rozszerzone sieci przejść . . . . .	12
4.4	Lookahead DFA . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Algorytm analizy składowej ALL(*)</b>	<b>13</b>
5.1	Stosy wywołań o strukturze grafowej . . . . .	14
5.2	Funkcje parsowania ALL(*) . . . . .	15
5.3	Detekcja konfliktu i niejednoznaczności . . . . .	19
5.4	Przykładowa konstrukcja DFA . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Rezultaty teoretyczne</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>Rezultaty empiryczne</b>	<b>21</b>
7.1	Porównanie prędkości ALL(*) do innych parserów . . . . .	22
7.2	Wydałność ALL(*) ze względu na języki . . . . .	24
7.3	Oddziaływanie lookahead DFA na wydałność . . . . .	25
7.4	Empiryczna złożoność czasowa parsowania . . . . .	25
<b>8</b>	<b>Powiązane prace</b>	<b>26</b>
<b>A</b>	<b>Analiza poprawności i złożoności</b>	<b>29</b>
<b>B</b>	<b>Pragmatyka</b>	<b>31</b>
B.1	Redukowanie czasu rozgrzewki . . . . .	31
B.2	Wyliczenie semantycznych predykatów . . . . .	31
B.3	Raportowanie i naprawa błędów . . . . .	32
B.4	Wykonywanie wielowatkowe . . . . .	33
<b>C</b>	<b>Eliminacja lewostronnej rekurencji</b>	<b>33</b>
C.1	Reguły eliminacji lewostronnej rekurencji . . . . .	36

## 1 Wprowadzenie

Analiza składowa języka programowania wciąż pozostaje nierozwiązanym w praktyce problemem, pomimo współczesnych strategii analizy składowej i długiej historii analizy naukowej. W czasach gdy zasoby maszynowe były znikome, sensownym było nakazanie programistom aby dostosowali swoje gramatyki do deterministycznych generatorów parsera LALR(k) lub LL(k).<sup>1</sup> Wraz ze wzrostem zasobów maszynowych, opracowano bardziej wydajne, jednakże kosztowniejsze, niedeterministyczne strategie analizy składowej przestrzegające podejścia zarówno „wstępującego” (czyli parsery LR) jak i „zstępującego” (parsery LL). Strategie obejmują GLR [26], Parser Expression Grammar (PEG) [9], LL (\*) [20] z ANTLR 3, i najnowszą GLL [25], w pełni ogólną strategię zstępującą.

<sup>1</sup>Używamy terminu ‘deterministyczny’ w taki sposób, aby deterministyczny automat skończony (DFA) różnił się od nie-deterministycznego automatu skończonego (NFA): następny symbol jednoznacznie określający działanie.

Pomimo, że te nowsze strategie są znacznie łatwiejsze w użyciu niż generatory parsera LALR(k) i LL(k), posiadają wiele wad. Po pierwsze, niedeterministyczne parsery wykazują czasami nieoczekiwane zachowanie. GLL i GLR przeprowadzają wielokrotną analizę składniową drzew (lasów) dla niejednoznacznej gramatyki, ponieważ zostały zaprojektowane do obsługi gramatyki języka naturalnego, która jest często celowo niejednoznaczna. W przypadku języków programowania niejednoznaczność jest prawie zawsze błędem. Z pewnością można przejść skonstruowany las parsowania w celu ujednocznienia, ale takie podejście wymaga dodatkowego czasu, miejsca i mechanizmu dla rzadkich przypadków. PEG są jednoznaczne z definicji, ale posiadają aberrację, gdzie reguła  $A \rightarrow a|ab$  (co oznacza że „A pasuje do a bądź do ab”) nigdy nie może pasować do ab, ponieważ PEG wybierają pierwszą alternatywę, która pasuje do prefiksu pozostałych danych wejściowych. Zagnieżdżony algorytm z nawrotami (backtracking) utrudnia debugowanie PEG.

Po drugie, akcje dostarczane przez programistę mające działania uboczne (mutatory), takie jak składnia print, muszą być unikane należy unikać w jakiegokolwiek strategii, która bez przerwy spekuluje (PEG) lub obsługuje wiele interpretacji danych wejściowych (GLL i GLR), ponieważ takie działania nigdy nie powinny mieć miejsca [17]. (Chociaż DParser [24] wspiera „finalne” akcje, gdy programista jest pewny, że redukcja jest częścią jednoznacznej finalnej analizy). Aby nie było efektów ubocznych, akcje muszą buforować dane dla wszystkich interpretacji w niezmiennych strukturach danych lub dostarczać akcje cofania (undo). Poprzedni mechanizm jest ograniczony poprzez rozmiar pamięci, a drugi nie zawsze jest łatwy albo możliwy. Typowym podejściem unikania mutatorów jest skonstruowanie drzewa analizy do analizy po zakończeniu przetwarzania, ale takie wytwory zasadniczo ograniczają analizowanie do plików wejściowych, których drzewa mieszczą się w pamięci. Parsery które budują drzewa analizy, nie mogą analizować dużych plików danych albo nieskończonych strumieni, taki jak ruch w sieci, chyba że mogą być przetwarzane w logicznych kawałach.

Po trzecie, nasze badania (Część 7) wykazują, że GLL i GLR mogą być powolne i o nieprzewidywalnej złożoności w czasie i przestrzeni. Ich złożoności są, odpowiednio  $O(n^3)$  i  $O(np+1)$  gdzie p jest długością najdłuższej produkcji w gramatyce [14]. (GLR zazwyczaj jest określane jako  $O(n^3)$  ponieważ Kipps [15] przedstawił taki algorytm, aczkolwiek z czynnikiem stałym tak wysokim że aż niepraktycznym). Teoretycznie, ogólne parsery powinny obsługiwać deterministyczne gramatyki w prawie liniowym czasie. W praktyce okazało się, że GLL i GLR są 135x wolniejsze niż ALL(\*) w zbiorze 12'920 plików źródłowych biblioteki Java 6 (123 M) i odpowiednio 6 rzędów wielkości wolniejsze w pojedynczym pliku 3.2 M Java.

LL(\*) obchodzą te słabości dostarczając głównie deterministycznej strategii analizy składniowej, która używa wyrażeń regularnych stanowiących deterministyczne automaty skończone (DFA), aby potencjalnie zbadać wszystkie pozostałe dane wejściowe zamiast ustalonych k-sekwencji LL(k). Użycie DFA dla lookahead limituje decyzje LL(\*) do rozróżniania alternatywy do regularnego języka symboli podglądanych (lookahead), mimo że języki lookahead (zbiór wszystkich możliwych pozostałych wyrażeń wejściowych) są często bezkontekstowe. Ale głównym problemem jest to, że warunek gramatyki LL(\*) jest statycznie nierozstrzygalny, a analiza gramatyczna, aby znaleźć wyrażenia regularne, które rozróżniają alternatywne produkcje, czasami nie powiedzie się. Statyczna analiza ANTLR 3 wykrywa i unika potencjalnie nierozstrzygalnych sytuacji, zamiast tego wydobywa się z niepowodzenia doprowadzając do analizy składniowej z powrotami. Wykazując w LL(\*) tą samą aberrację  $a|ab$  co w PEG dla takich decyzji. Cofanie się, wybierając pierwszą pasującą alternatywę również nie może wykrywać oczywistych niejednoznaczności, takich jak  $A \rightarrow \alpha|\alpha$  gdzie  $\alpha$  jest ciągiem symbolów gramatycznych, co sprawia że  $\alpha|\alpha$  jest nie-LL(\*).

## 1.1 Dynamiczna analiza gramatyczna

W niniejszym artykule przedstawiliśmy ALL(\*) czyli adaptacyjne LL(\*) - parsery które łączą w sobie prostotę deterministycznych zstępujących parserów z siłą mechanizmów GLR odnośnie analizy decy-

zyjnej. W szczególności, analiza składniowa LL zawiesza działanie w każdym punkcie przewidywania decyzji (symbol nieterminalny), a następnie zostaje wznowiona po wyborze odpowiedniej produkcji do rozwinięcia przez mechanizm przewidywania. Kluczową innowacją jest nakierowanie analizy gramatycznej na czas analizy, nie jest tu potrzebna żadna statyczna analiza gramatyczna. Wybór ten pozwoli nam uniknąć nierozstrzygalności statycznej LL(\*) w analizie gramatycznej i umożliwi wygenerowanie odpowiednich parserów (Twierdzenie 6.1) dla nie-lewostronnej rekursywnej bezkontekstowej gramatyki (CFG). Podczas gdy analiza statyczna musi uwzględniać wszystkie możliwe sekwencje wejściowe, analiza dynamiczna rozważa tylko skończony zbiór sekwencji wejściowych w rzeczywistości widoczny.

Ideą mechanizmu przewidywania ALL(\*) jest uruchomienie subparserów w punkcie decyzyjnym, jeden na alternatywę produkcji. Subparsery działają pseudo-równolegle odkrywając wszystkie możliwe ścieżki. „Wymierają” te subparsery których ścieżki nie dopasowują pozostałych danych wejściowych. Subparsery przechodzą przez dane wejściowe równym krokiem tak że analiza może zidentyfikować jedyną ocalałą subparser na minimalnej głębokości podglądu symboli (lookahead) który jednoznacznie przewiduje produkcję. Jeśli wiele subparserów łączy się razem albo dochodzi do końca pliku, predyktor ogłasza niejednoznaczność i rozwiązuje to na korzyść produkcji o najniższym numerze powiązanej z ocalałym subparserem. (Produkcje są numerowane co w automatyczny sposób określa pierwszeństwo rozwiązując niejednoznaczności, niczym PEG; Bison również rozwiązuje konflikty wybierając produkcję określoną jako pierwszą). Programiści mogą również wstawiać semantyczne predyktory [22], aby wybrać między niejednoznaczными interpretacjami.

Parseery ALL(\*) zapamiętują wyniki analizy, stopniowo i dynamicznie budując cache automatów DFA, która mapuje frazy lookahead do przewidzianych produkcji. (Wykorzystujemy termin analiza w tym sensie że analiza ALL(\*) przynosi lookahead DFA jak statyczna analiza LL(\*)). Analizator może tworzyć przyszłe przewidywania w takiej samej decyzji analizatora i frazy lookahead poprzez zapoznanie się z cache. Nieznane frazy wejściowe uruchamiają mechanizm analizy gramatycznej, jednocześnie przewidując alternatywę i uaktualniając DFA. DFA są odpowiednie dla wyników przewidywania, pomimo faktu że język lookahead przy danej decyzji zazwyczaj tworzy język bezkontekstowy. Analiza dynamiczna musi tylko uwzględniać skończone podzbiory języka bezkontekstowego napotkane podczas przeprowadzania analizy składniowej, a jakikolwiek skończony zbiór jest regularny.

Aby uniknąć wykładniczej natury niedeterministycznych subparserów, przewidywanie wykorzystuje graph-structured stack (GSS) [25] w celu uniknięcia zbędnych obliczeń. GLR wykorzystuje zasadniczo tą samą strategię, jednakże ALL(\*) przewiduje tylko produkcje z takimi subparserami, natomiast GLR faktycznie przeprowadza analizę składniową z nimi. Wskutek tego, GLR muszą wkładać symbole terminalne na GSS, czego ALL(\*) nie robi.

Parseery ALL(\*) dopasowują symbole terminalne i rozwijają nieterminalne z prostotą LL, jednakże posiadają teoretyczną złożoność czasową  $O(n^4)$  (Twierdzenie 6.3), ponieważ w najgorszym przypadku, parser musi przewidywać przy każdym symbolu wejściowym, a każde przewidywanie musi analizować pozostałe dane wejściowe; badanie symbolu wejściowego może być kosztowne  $O(n^2)$ .  $O(n^4)$  jest zgodne ze złożonością GLR. W Części 7, przedstawiono empirycznie, że parseery ALL(\*) dla rozpowszechnionych języków są efektywne i wykazują w praktyce zachowanie linearne.

Zalety ALL(\*) wynikają z przeniesienia analizy gramatycznej do czasu parsowania, ale wybór ten powoduje dodatkowe obciążenie na funkcjonalne testowanie. Podobnie jak w przypadku wszystkich metod dynamicznych, programiści muszą pokryć tyle samo pozycji gramatycznych i kombinacji sekwencji wejściowych, aby możliwe było znalezienie niejednoznaczności gramatycznej. Standardowe narzędzia pokrycia kodu źródłowego mogą pomóc programistom zmierzyć pokrycie gramatyczne dla parserów ALL(\*). Wysokie pokrycie w wygenerowanym kodzie odpowiada wysokiemu pokryciu gramatycznemu.

Algorytm ALL(\*) jest podstawą generatora parserów ANTLR 4 (ANTLR 3 opiera się na LL(\*)). ANTLR 4 został wypuszczony w styczniu 2013 i dostaje ok. 5000 pobrań miesięcznie (źródła, binaria,

albo środowisko ANTLRworks2, licząc wejścia nie botów w logach z unikatowych adresach IP). Taka aktywność dostarcza dowodów, że ALL(\*) jest przydatny i użyteczny.

Pozostała część artykułu uwzględnia następujące tematy: Po pierwsze, przedstawiliśmy generator parserów ANTLR 4 (Sekcja 2) i omówiliśmy strategię analizy składniowej ALL(\*) (Sekcja 3). Następnie, określiliśmy predykatywną gramatykę, ich rozszerzone sieci przejść, oraz lookahead DFA (Sekcja 4). Kolejno, opisaliśmy analizę gramatyczną ALL(\*) i przedstawiliśmy algorytm analizy składniowej (Sekcja 5). Ostatecznie, wspomagamy się twierdzeniami dotyczącymi poprawności (Sekcja 6) i wydajności ALL(\*) (Sekcja 7), oraz zbadaliśmy powiązane prace (Sekcja 8). Załącznik A uwzględnia dowody dla twierdzenia ALL(\*), Załącznik B opisuje pragmatykę algorytmu, Załącznik C uwzględnia lewostronne rekursywne szczegóły eliminacyjne.

## 2 ANTLR 4

ANTLR 4 akceptuje jako dane wejściowe gramatykę bezkontekstową, która nie zawiera lewostronnej rekursji pośredniej lub ukrytej.<sup>2</sup> Z tej gramatyki, ANTLR 4 generuje parser rekurencyjny, który korzysta z funkcji przewidywania produkcji ALL(\*) (Część 3). ANTLR obecnie generuje parsery w Java i C#. Gramatyka ANTLR 4 wykorzystuje składnię yacc z rozszerzonym BNF (EBNF), takim jak domknięcie Kleene’ego(\*) i symbol literałów w pojedynczym cudzysłowie. Gramatyka zawiera zarówno leksykalne jak i składniowe reguły wraz ze specyfikacjami. ANTLR 4 generuje zarówno lekser jak i parser z połączonych specyfikacji. Używając pojedynczych znaków jako symboli wejściowych, gramatyka ANTLR 4 może być bez skanera i tworzyć całość ponieważ języki ALL(\*) są zamknięte w ramach unii (Twierdzenie 6.2), zapewniając korzyści płynące z modularności opisanej przez Grimm [10]. (W dalszej części ANTLR 4 jest określane jako ANTLR).

Programiści mogą wstawiać akcje z efektami ubocznymi (mutatory), zapisywane językiem docelowym (np. w Javie). Działania mają dostęp do bieżącego stanu analizatora. Parser ignoruje mutatory podczas spekulacji, nie dopuszczając do „uruchomienia rakiety” spekulacyjnie. Działania zazwyczaj pozyskują informacje ze strumienia wejściowego i tworzą struktury danych.

ANTLR obsługuje również semantyczne predykaty, które są wolnymi od efektów ubocznych wyrażeniami boolowskimi napisane w języku docelowym, które określają semantyczną wykonalność danej produkcji. Semantyczne predykaty, które przyjmują wartość false podczas analizy składniowej, określając produkcję niezgodną do wykonania, dynamicznie zmieniają język generowany przez gramatykę w czasie analizowania.<sup>3</sup> Predykaty znacznie zwiększają moc strategii analizy składniowej, ponieważ predykaty mogą zbadać stos analizy i okoliczny kontekst wejściowy, aby zapewnić możliwość nieformalnej analizy kontekstowej. Semantyczne działania i predykaty zazwyczaj współpracują ze sobą, aby zmienić analizę składniową opartą o poprzednio odkryte informacje. Na przykład, gramatyka C może osadzić działania, aby zdefiniować typ symboli z konstrukcji, takich jak `typedef int i32;`, a predykaty aby rozróżnić nazwy typów od innych identyfikatorów w kolejnych definicjach, takich jak `i32 x;`.

### 2.1 Przykładowa gramatyka

Obrazek 1 ilustruje yacco-podobny metajęzyk ANTLR za pomocą przykładu prostego języka programowania z przypisaniami i wyrażeniami zakończonymi średnikami. Istnieją dwie cechy gramatyczne, które nadają tej gramatyce własność nie-LL(\*), a zatem nie do przyjęcia dla ANTLR 3. Po pierwsze, reguła

<sup>2</sup>Pośrednio lewostronnie rekurencyjne reguły wołają siebie przez inną regułę; np.,  $A \rightarrow B, B \rightarrow A$ . Ukryta lewostronna rekurencja jest wtedy gdy pusta produkcja ujawnia lewostronną rekurencję; np.,  $A \rightarrow BA, B \rightarrow \epsilon$

<sup>3</sup>Poprzednie wersje ANTLR produkowały syntaktyczne predykaty aby pozbyć się przypadków niejednoznaczności gdzie statyczna analiza zawodziła; ta ustepliwość nie jest potrzebna w ANTLR4 z powodu dynamicznej analizy ALL(\*)

expr jest lewostronnie rekurencyjna. ANTLR 4 automatycznie przepisuje regułę jako nie lewostronnie rekurencyjną i jednoznaczną, jak opisano w Sekcji 2.2. Po drugie, alternatywne produkcje reguły stat posiadają rekurencyjny przedrostek (expr), który wystarcza aby nadać stat nierozstrzygalność z perspektywy LL(\*). ANTLR 3 wykrywa rekurencję w lewych stronach produkcji i wykazuje niepowodzenie w decyzji z nawrotami (backtracking) podczas uruchomienia.

Predykat `{!enum_is_keyword?}` w regule id umożliwia lub uniemożliwia enum jako prawidłowy identyfikator według predykatu w chwili przewidywania. Gdy predykat jest false, parser traktuje id jako tylko id:ID; odrzucając enum jako id gdy lexer pasuje do enum jako oddzielny symbol ID. Przykład ten przedstawia jak predykaty umożliwiają pojedynczej gramatyce opisanie podzbiorów albo wariacji tego samego języka.

```
grammar Ex; // generuje klasę ExParser
// akcja definiuje pole ExParser: enum_is_keyword
@members boolean enum_is_keyword = true;
stat: expr '=' expr ';' // produkcja 1
    | expr ';' // produkcja 2
    ;
expr: expr '*' expr
    | expr '+' expr
    | expr '(' expr ')' // f(x)
    | id ;

id : ID | {!enum_is_keyword?} 'enum' ;
ID : [A-Za-z]+ ; // dopasowuje id z wielkimi i małymi literami
WS : [ \t \r \n]+ -> skip ; // ignoruj białe znaki
```

Rysunek 1: Przykładowa lewostronnie rekurencyjna predykatowa ANTLR 4 gramatyka Ex

## 2.2 Usuwanie lewostronnej rekurencji

Strategia analizy składniowej ALL(\*) nie obsługuje lewostronnej rekurencji, ale ANTLR obsługuje bezpośrednią lewostronną rekurencję poprzez przepisywanie gramatyki przed generacją analizatora składni. Bezpośrednia lewostronna rekurencja obejmuje najczęstsze przypadki, takie jak generowanie wyrażenia arytmetycznego, np.  $E \rightarrow E.id$ , i deklaratywnych C. Podjęliśmy decyzję, aby nie posługiwać się pośrednią albo ukrytą lewostronną rekurencją, ponieważ te formy są znacznie mniej powszechne, a usuwanie całej lewostronnej rekurencji może doprowadzić do dużego przekształcenia gramatycznego. Na przykład, specyfikacja języka gramatyki C11 zawiera mnóstwo bezpośredniej lewostronnej rekurencji, ale bez rekurencji pośrednich lub ukrytych. Zobacz Załącznik 2.2 w celu uzyskania więcej szczegółów.

## 2.3 Analiza leksykalna przy użyciu ALL(\*)

ANTLR używa wariacji ALL(\*) dla lekserów, które w pełni przypasowują tokeny zamiast po prostu przewidywać produkcje, jak to robią parsery ALL(\*). Po rozbiegu, lekser tworzy DFA podobne do tego, co utworzyłyby statycznie wyrażenia regularne w oparciu o narzędzia takie jak lex. Podstawową różnicą jest to, że lekser ALL(\*) obsługuje predykatywną gramatykę bezkontekstową a nie wyrażenia regularne, tak więc mogą rozpoznawać bezkontekstowe symbole, takie jak zagnieżdżone komentarze i mogą wpuszczać lub nie symbole zgodnie z semantycznym kontekstem. Ten zamysł jest możliwy ponieważ ALL(\*) jest wystarczająco szybki, aby obsłużyć zarówno analizę leksykalną jak i parsowanie.

ALL(\*) nadaje się również do analizy składniowej bez skanera ze względu na siłę rozpoznania, która jest przydatna w leksykalnych problemach kontekstowych, takich jak łączenie języków C i SQL. Takie

połączenie nie ma wyraźnych leksykalnych granic wytyczających leksykalne regiony:

```
int next = select ID from users where name='Raj'+1;
int from = 1, select = 2;
int x = select * from;
```

Zobacz gramatyczny kod/dodatki/CSQL [19] dla dowiedzenia koncepcji.

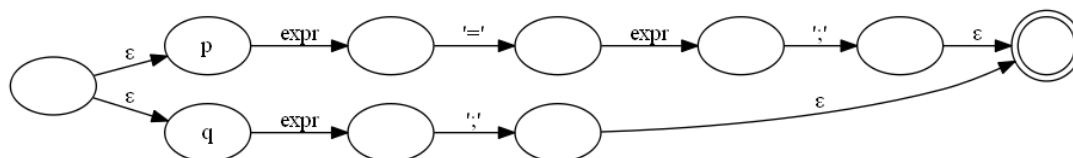
### 3 Wprowadzenie do analizy składniowej ALL(\*)

W tej sekcji opisano idee i intuicje dotyczące analizy składniowej ALL(\*). Następnie w sekcji 5 przedstawiono algorytm bardziej formalnie. Moc strategii zstępującej analizy składniowej jest związana ze strategią wyboru alternatywnej produkcji do rozwinięcia bieżącego symbolu nieterminalnego. W przeciwieństwie do parserów LL(k) i LL(\*), parsery ALL(\*) zawsze wybierają pierwszą alternatywę z tych która prowadzi do prawidłowej analizy składniowej. Wszystko nie lewostronnie rekurencyjne gramatyki są zatem ALL(\*).

Zamiast polegać na statycznej analizie gramatyki, parser ALL(\*) przystosowuje się do zdań wejściowych przedstawionych w czasie analizowania. Parser analizuje bieżący punkt decyzyjny (symbol nieterminalny przy wielu produkcjach) używając mechanizmu GLR, aby zbadać wszystkie możliwe ścieżki decyzyjne w odniesieniu do bieżącego „stosu wywołań” wewnątrz-procesowych symboli nieterminalnych, a pozostałe dane wejściowe na żądanie. Analizator stopniowo i dynamicznie tworzy jeden automat lookahead DFA na jedną decyzję, która rejestruje mapowania z sekwencji lookahead na numer przewidywanej produkcji. Jeśli utworzone DFA pasuje do bieżącego lookahead, parser może ominąć analizę i natychmiast rozwinąć przewidzianą alternatywę. Opisane badania w Sekcji 7 wskazują, że parsery ALL(\*) zazwyczaj wykorzystują DFA istniejące w już w cache a te DFA mają decydujące znaczenie dla wydajności.

```
void stat() { // parse according to rule stat
    switch ( adaptivePredict("stat", call stack)) {
        case 1 : // predict production 1
            expr(); match('='); expr(); match(';');
            break ;
        case 2 : // predict production 2
            expr(); match(';'); break ;
    }
}
```

Rysunek 2: Rekurencyjnie zstępujący kod dla star gramatyki Ex



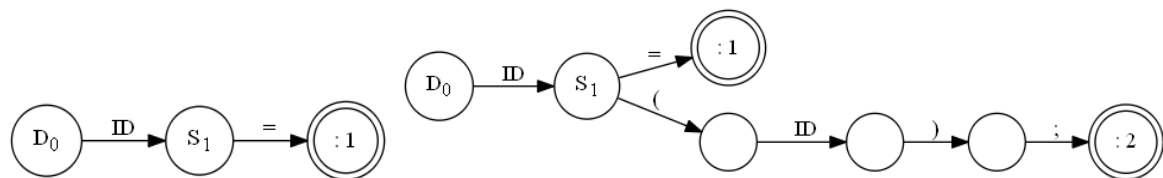
Rysunek 3: ATN dla reguły ANTLR stat w gramatyce Ex

Ze względu na fakt, iż ALL(\*) różni się od deterministycznych zstępujących metod tylko w mechanizmie przewidywania, możemy utworzyć konwencjonalne parsery rekurencyjne LL, ale z ważnym wyróżnikiem. Parsery ALL(\*) wywołują specjalne funkcje przewidywania, adaptivePredict, która analizuje gramatykę w celu utworzenia lookahead DFA zamiast po prostu porównywać lookahead z statycznie

obliczonym zbiorem symboli. Funkcja `adaptivePredict` przyjmuje symbole nieterminalne i stos wywołań parsera jako parametry i zwraca przewidziany numer produkcji lub zgłasza wyjątek, jeśli nie ma żadnej wykonalnej produkcji. Na przykład, zasada stat z przykładu w Sekcji 2.1 odzwierciedla analizę składniową przedstawioną na Rysunku 2.

Przewidywanie  $ALL(*)$  ma podobną strukturę do znanego algorytmu budowy podzbiór NFA-to-DFA. Celem jest wykrycie zbioru stanów, które parser może osiągać po obejrzeniu niektórych lub wszystkich pozostałych danych wejściowych w stosunku do obecnej decyzji. Podobnie jak w utworzonym podzbiórze, stan DFA  $ALL(*)$  jest możliwym zbiorem konfiguracji analizatora po dopasowaniu danych wejściowych prowadzących do tego stanu. Zamiast NFA,  $ALL(*)$  symuluje działania rozszerzonej rekurencyjnej sieci przejść (ATN) [27] odzwierciedlając gramatykę, gdyż ATNs ściśle odzwierciedlają strukturę gramatyki.

(ATNs wyglądają podobnie jak diagramy składniowe, które mogą posiadać działania i semantyczne predykaty). Statyczna analiza  $LL(*)$  również działa w ATN z tego samego powodu. Rysunek 3 przedstawia podautomat ATN dla zasady stat. Konfiguracja ATN reprezentuje stan przeprowadzenia subparser i śledzi stan ATN, przewidziany numer produkcji, oraz stos wywołań subparsera ATN: krotka  $(p, i, y)$ . 1 Konfiguracje obejmują numery produkcji, tak więc przewidywanie może identyfikować która produkcja pasuje do bieżącego lookahead. W przeciwieństwie do analizy statycznej  $LL(*)$ ,  $ALL(*)$  stopniowo buduje DFA, biorąc pod uwagę tylko sekwencje lookahead, zamiast wszystkich możliwych sekwencji.



(po lewo) Po  $x=y$ ;  
(po prawo) Po  $x=y$ ;  $i f(x)$ ;

Rysunek 4: Przewidyujące DFA dla decyzji stat

Gdy analiza składniowa podejmuje decyzję po raz pierwszy, `adaptivePredict` inicjuje lookahead DFA dla tej decyzji poprzez utworzenie stanu DFA,  $D_0$ .  $D_0$  jest zbiorem konfiguracji subparser ATN osiągalnym bez wykorzystywania początkowego symbolu wejściowego w każdej lewej stronie produkcji. Na przykład, tworzenie  $D_0$  dla nieterminali stat na Rysunku 3 rozpoczyna się od dodania konfiguracji ATN  $(p; 1; [])$  i  $(q; 2; [])$  gdzie  $p$  i  $q$  są stanami ATN analogicznymi dla produkcji 1 i 2 lewych stron, a  $[]$  jest pustym subparserem stosu wywołań (jeśli stat jest symbolem początkowym).

Analiza następnie oblicza nowy stan DFA, wskazując gdzie symulacja ATN może być osiągalna po wykorzystaniu pierwszego symbolu lookahead, po czym łączy dwa stany DFA z krawędzią oznaczoną tym symbolem. Analiza postępuje, dodając nowe stany DFA, aż wszystkie konfiguracje ATN w nowo utworzonym stanie DFA przewidują taką samą produkcję:  $(-; i; -)$ . Funkcja `adaptivePredict` uznaje ten stan za akceptowalny i powraca do parsera z tą liczbą produkcji. Rysunek 4a przedstawia lookahead DFA dla decyzji stat, po tym jak `adaptivePredict` przeanalizował zdania wejściowy  $x = y$ . DFA nie posiada wglądu poza  $=$  ponieważ  $=$  jest wystarczające, aby jednoznacznie rozróżnić wyrażenie produkcji. (Zapis: 1 oznacza „przewidywaną produkcję 1”).

Najczęściej `adaptivePredict` odnajduje istniejący DFA dla konkretnej decyzji. Celem jest znalezienie lub utworzenie ścieżki poprzez DFA do akceptowalnego stanu. Jeśli `adaptivePredict` osiągnie (nieakceptowalny) stan DFA bez krawędzi dla bieżącego symbolu lookahead, powraca do symulacji ATN aby rozszerzyć DFA (bez przewijania danych wejściowych). Na przykład, do analizy drugiego zwrotu danych wejściowych dla stat, takich jak  $f(x)$ ; `adaptivePredict` znajduje istniejącą krawędź ID z  $D_0$  i przeskakuje do  $s_1$  bez symulacji ATN. Nie ma żadnego istniejącej krawędzi z  $s_1$  dla lewego nawiasu, tak więc ana-



liza symuluje ATN aby zakończyć ścieżkę do akceptowalnego stanu, który przewiduje drugą produkcję, zgodnie z Rysunkiem 4b. Należy zauważyć, że z faktu iż sekwencja ID (ID) przewiduje obie produkcje, analiza postępuje aż DFA będzie posiadać krawędzie dla symboli = i;

Jeśli symulacja ATN oblicza nowy stan docelowy, który już istnieje w DFA, symulacja dodaje nową krawędź nakierowując istniejący stan i przełączając się na tryb symulacji DFA, począwszy od tego stanu. Nakierowanie istniejących stanów przedstawia jak cykle mogą pojawiać się w DFA. Rozszerzając DFA do obsługi nieznanymi zwrotów empirycznie zmniejszając prawdopodobieństwo przyszłych symulacji ATN, tym samym zwiększając szybkość analizy składniowej (Część 7).

### 3.1 Przewidywania wrażliwe na stos wywołań

Parseery nie zawsze mogą opierać się na lookahead DFA w podejmowaniu właściwej decyzji. Aby obsłużyć wszystkie gramatyki nie lewostronnie rekurencyjne, przewidywanie ALL(\*) musi od czasu do czasu rozważyć stos wywołań parsera dostępnego na początku przewidywania (oznaczone jako 0 w Części 5). Aby przedstawić potrzebę przewidywania zależnego od stosu, należy wziąć pod uwagę że przewidywania podczas rozpoznawania metody Javy mogą zależeć od tego czy metoda została zdefiniowana w ramach definicji klasy lub interfejsu. (metody interfejsu Java nie mogą posiadać ciała). Oto przykład uproszczonej gramatyki, która wykazuje decyzję zależną od stosu dla symbolu nieterminalnego A:

$$S \rightarrow xB|yC \quad B \rightarrow Aa \quad C \rightarrow Aba \quad A \rightarrow b|\varepsilon$$

Bez stosu analizatora, żadna ilość lookahead nie może jednoznacznie rozróżnić produkcji A. Lookahead ba przewiduje  $A \rightarrow b$  gdy B wywołuje A, natomiast przewiduje  $A \rightarrow \varepsilon$  gdy C wywołuje A. W przypadku gdy przewidywanie ignoruje stos wywołań analizatora, występuje konflikt przewidywania wobec ba.

Parseery, które ignorują stos wywołań analizatora dla przewidywania nazywamy Silnymi (Strong) LL (SLL). Parseery rekurencyjne programiści tworzą ręcznie w klasie SLL. Zazwyczaj, literatura odnosi się do SLL jako LL, ale my rozróżniamy pojęcia, ponieważ „rzeczywiste” LL jest potrzebne aby obsłużyć wszystkie gramatyki. Powyższa gramatyka to LL(2), a nie SLL(k) dla jakiegokolwiek k, jednak duplikując A otrzymamy gramatykę SLL (2).

Tworzenie różnych lookahead DFA dla każdego możliwego stosu wywołań analizatora nie jest możliwe, ponieważ liczba permutacji stosu jest wykładnicza w funkcji głębokości stosu. Zamiast tego możemy skorzystać z faktu, iż większość decyzji nie jest zależna od stosu i utworzyć lookahead DFA ignorując stos wywołań analizatora. Jeśli symulacja ATN SLL znajduje konflikt przewidywania (Część 5.3), to nie możemy być pewni czy zwrot lookahead nie jest jednoznaczny albo zależny od stosu. W tym przypadku, adaptivePredict musi ponownie zbadać lookahead używając stosu parsera  $\gamma_0$ . Ten hybrydowy lub zoptymalizowany tryb LL zwiększa wydajność poprzez zapisywanie w pamięci podręcznej wyników przewidywania niezależnych od stosu w lookahead DFA, gdy jest to możliwe, przy zachowaniu pełnej siły przewidywania zależnej od siły stosu. Zoptymalizowany tryb LL stosuje się na podstawie decyzji, ale dwustopniowa analiza składniowa, opisana w dalszej części, często może całkowicie uniknąć symulacji LL. (Od tej pory używamy SLL, aby wskazać analizę składniową niezależną od stosu i LL do wskazania zależności od stosu).

### 3.2 Dwuetapowa analiza składniowa ALL(\*)

SLL jest słabsze, ale szybsze niż LL. Z faktu iż wykazano, że większość decyzji jest SLL w praktyce, wydaje się sensowne aby wykonać próbę analizy składniowej wszystkich danych wejściowych „tylko w trybie SLL”, co jest pierwszym etapem dwuetapowej analizy składniowej algorytmu ALL(\*). Jeśli jednak, tryb SLL wykryje błąd składniowy, wówczas albo jest to słabość SLL albo prawdziwy błąd składniowy, tak więc musimy ponownie rozpatrzyć wszystkie dane wejściowe używając zoptymalizowanego

trybu LL, który jest drugim etapem. Ta nieintuicyjna strategia, która potencjalnie parsuje cały strumień wejściowy dwukrotnie, może dramatycznie zwiększyć prędkość w porównaniu do jednoetapowego zoptymalizowanego trybu LL. Na przykład, dwu-etapowa analiza składniowa z gramatyką Java (Część 7) jest 8x szybsza niż jednoetapowy zoptymalizowany tryb LL do przeprowadzania analizy składniowej korpus 123M. Dwuetapowa strategia opiera się na fakcie, że SLL zachowuje się jak LL lub otrzymujemy błąd składniowy (Twierdzenie 6.5). Dla nieprawidłowych zdań, **nie występuje żadne wyprowadzenie dla danych wejściowych** niezależnie od tego jak parser wybiera produkcje. Dla prawidłowych zdań, SLL wybiera produkcje podobnie jak LL albo dobiera produkcję, która ostatecznie prowadzi do błędu składniowego (LL wykazuje niewykonalny wybór). Nawet w obecności niejednoznaczności, SLL często rozwiązuje konflikty, podobnie jak LL. Na przykład, pomimo kilku niejednoznaczności w naszej gramatyce Javy, tryb SLL poprawnie przeprowadza analizę składniową wszystkich danych wejściowych, bez doznania niepowodzenia w LL. Niemniej jednak, drugi etap (LL) musi pozostawać do zapewnienia poprawności.

## 4 Gramatyka predykatoowa, ATN i DFA

Aby przeprowadzić formalny proces analizy składniowej ALL(\*), najpierw należy przypomnieć sobie niektóre materiały, zwłaszcza formalne definicje gramatyki predykatoowej, ATN i Lookahead DFA.

### 4.1 Gramatyka predykatoowa

Aby przeprowadzić formalny proces analizy składniowej ALL(\*), najpierw należy formalnie określić gramatykę predykatoową z której jest ona czerpana. Gramatyka predykatoowa  $G = (N, T, P, S, \Pi, \mathcal{M})$  składa się z następujących elementów:

- $N$  jest zbiorem nie-terminali (nazwy reguł)
- $T$  jest zbiorem terminali (symboli)
- $P$  jest zbiorem produkcji
- $S \in N$  jest symbolem początkowym
- $\Pi$  jest zbiorem efektów ubocznych semantycznych predykatów
- $\mathcal{M}$  jest zbiorem działań (mutatorów)

Gramatyki predykatoowe ALL(\*) różnią się od tych z LL(\*) [20] jedynie tym że gramatyka ALL(\*) nie potrzebuje albo nie obsługuje składni predykatów. Gramatyki predykatoowe w formalnych częściach niniejszego dokumentu używają notacji przedstawionej na Rysunku 5. Zasady wyprowadzania na Rysunku 6 określają znaczenie gramatyki predykatoowej. Do obsługi semantycznych predykatów i mutatorów, zasady odnoszą się do stanu  $S$ , który abstrahuje stan użytkownika podczas analizowania. Przejście  $(S, \alpha) \Rightarrow (S', \beta)$  może zostać odczytane: „W stanie  $S$  maszyny, sekwencja gramatyczna  $\alpha$  redukuje się w jednym kroku do zmodyfikowanego stanu  $S'$  i sekwencji gramatycznej  $\beta$ ”. Przejście  $(S, \alpha) \Rightarrow^* (S', \beta)$  oznacza wielokrotne zastosowanie jednostopniowej zasady redukcji. Te zasady redukcji określają wyprowadzenie lewostronne. Produkcja z semantycznym predykatem  $\pi_i$  jest wykonalna tylko wtedy, gdy  $\pi_i$  jest true z bieżącym stanem  $S$ . Na koniec akcja produkcji używa określonego mutatora  $\mu_i$  aby zaktualizować stan.

Formalnie, język generowany przez sekwencję gramatyczną  $\alpha$  w stanie użytkownika  $S$  jest  $L(S, \alpha) = \{w | (S, \alpha) \Rightarrow^* (S', w)\}$  a język gramatyki  $G$  jest  $L(S_0, G) = \{w | (S_0, S) \Rightarrow^* (S, w)\}$  dla początkowego stanu  $S_0$  użytkownika ( $S_0$  może być puste). Jeśli  $\mu$  jest przedrostkiem  $w$  albo równe  $w$ , zapisujemy  $\mu \preceq w$ . Język  $L$  jest ALL(\*) wtedy i tylko wtedy jeśli występuje gramatyka ALL(\*) dla  $L$ . Teoretycznie,

klasa języka  $L(G)$  jest rekurencyjnie przeliczalna, ponieważ każdy mutator może być maszyną Turinga. W rzeczywistości, autorzy gramatyki nie wykorzystują tego ogólnika, tak więc jest to przyjęty sposób postępowania do rozważenia klasy języka, zamiast kontekstowego języka. Klasa jest zależna od kontekstu, a nie bezkontekstowa, ponieważ predykaty mogą badać stos wywołań i terminale z lewej i prawej.

Ten formalizm uwzględnia różne składniowe ograniczenia, które nie są obecne w rzeczywistej gramatyce ANTLR, na przykład zmuszając mutatory do ich własnych zasad i wykluczając powszechnie notacje Rozszerzonego (Extended) BNF (EBNF), takie jak domknięcia  $\alpha^*$  i  $\alpha^+$ . Możemy ustalić te ograniczenia bez utraty ogólnika, ponieważ jakakolwiek gramatyka w ogólnej formie może przekładać się na bardziej ograniczoną formę.

## 4.2 Sprecyzowanie niejednoznaczności

Niejednoznaczna gramatyka jest taką, w której taka sama sekwencja danych wejściowych może być rozpoznawana na wiele sposobów. Zasady na Rysunku 6 nie wykluczają niejednoznaczności.

---

$A \in N$  symbol nieterminalny  
 $a, b, c, d \in T$  symbol terminalny  
 $X \in (N \cup T)$  element produkcji  
 $\alpha, \beta, \delta \in X^*$  sekwencja symboli gramatyki  
 $u, v, w, x, y \in T^*$  sekwencja symboli terminalnych  
 $\varepsilon$  pusty ciąg  
 $\$$  koniec strumienia symboli  
 $\pi \in \Pi$  predykat w języku docelowym  
 $\mu \in \mathcal{M}$  akcja w języku docelowym  
 $\lambda \in (N \cup \Pi \cup \mathcal{M})$  etykieta redukcji  
 $\rightarrow$   
 $\lambda = \lambda_1.. \lambda_n$  sekwencja etykiet redukcji  
 Reguły produkcji:  
 $A \rightarrow \alpha_i$  i-ta bezkontekstowa produkcja A  
 $A \rightarrow \{\pi_i\}?\alpha_i$  i-ta produkcja predykowana na semantyce  
 $A \rightarrow \{\mu_i\}$  i-ta produkcja z mutatorem

---

Rysunek 5: Notacja gramatyki predykatywnej

---

Prod  $\frac{A \rightarrow \alpha}{(\mathbb{S}, uA\delta) \Rightarrow (\mathbb{S}, u\alpha\delta)}$   
 $\pi(\mathbb{S})$   
 Sem  $\frac{A \rightarrow \{\pi\}?\alpha}{(\mathbb{S}, uA\delta) \Rightarrow (\mathbb{S}, u\alpha\delta)}$   
 Action  $\frac{A \rightarrow \{\mu\}}{(\mathbb{S}, uA\delta) \Rightarrow (\mu(\mathbb{S}), u\delta)}$   
 Closure  $\frac{(\mathbb{S}, \alpha) \Rightarrow (\mathbb{S}', \alpha'), (\mathbb{S}', \alpha') \Rightarrow^* (\mathbb{S}'', \beta)}{(\mathbb{S}, \alpha) \Rightarrow^* (\mathbb{S}'', \beta)}$

---

Rysunek 6: Reguły lewostronnego wyprowadzania gramatyki predykatywnej

Jednakże, dla praktycznego analizatora języka programowania, wszystkie dane wejściowe powinny odpowiadać analizie składniowej. W tym celu, ALL(\*) używa kolejności produkcyjnych w regule do rozpoznania niejednoznaczności na korzyść produkcji o najniższym numerze. Strategia ta jest związłym sposobem dla programistów, aby rozpoznać niejednoznaczności automatycznie oraz znaną niejednoznaczność if-then-else w zwykły sposób poprzez kojarzenie 'else' z ostatnim 'if'. Parsery PEG i Bison mają te same zasady rozpoznawania.

Do rozpoznania niejednoznaczności, które zależą od bieżącego stanu S, programiści mogą wprowadzać semantyczne predykaty, jednakże muszą wzajemnie wykluczyć dla wszystkich potencjalnie niejednoznacznych sekwencji wejściowych do otrzymania tego typu jednoznacznych produkcji. Statycznie wzajemnych wykluczeń nie da się wymusić, ponieważ predykaty są napisane w języku Turinga. Jednakże, w czasie analizy ALL(\*) wylicza predykaty i dynamicznie raportuje frazy wejściowe dla których wielokrotnie, predykowalne produkcje są wykonalne. Jeśli programistom nie udaje się ustalić wzajemnej wyłączności, ALL(\*) wykorzystuje kolejność produkcji do rozpoznania niejednoznaczności.

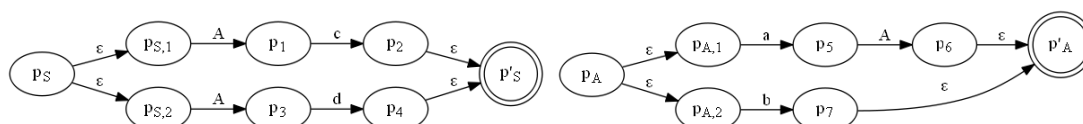
### 4.3 Rozszerzone sieci przejść

Biorąc pod uwagę gramatykę predykatową  $G = (N, T, P, S, \Pi, \mathcal{M})$  odpowiedni ATN  $M_G = (Q, \Sigma, \Delta, E, F)$  ma elementy [20]:

- Q jest zbiorem stanów
- $\Sigma$  jest alfabetem krawędzi  $N \cup T \cup \Pi \cup \mathcal{M}$
- $\Delta$  relacją przejść mapującą  $Q \times (\Sigma \cup \epsilon) \rightarrow Q$
- $E \subset Q = \{p_A | A \in N\}$  jest zbiorem stanów początkowych subautomatu
- $F \subset Q = \{p'_A | A \in N\}$  jest zbiorem stanów końcowych subautomatu

Element gramatyki wejściowej	Wynikowe przejścia ATN
$A \rightarrow \alpha_i$	$p_A \xrightarrow{\epsilon} p_{A,i} \xrightarrow{\epsilon} \boxed{\alpha_i} \xrightarrow{\epsilon} p'_A$
$A \rightarrow \{\pi_i\}?\alpha_i$	$p_A \xrightarrow{\epsilon} p_{A,i} \xrightarrow{\pi_i} \boxed{\alpha_i} \xrightarrow{\epsilon} p'_A$
$A \rightarrow \{\mu_i\}$	$p_A \xrightarrow{\epsilon} p_{A,i} \xrightarrow{\mu_i} p'_A$
$A \rightarrow \epsilon_i$	$p_A \xrightarrow{\epsilon} p_{A,i} \xrightarrow{\epsilon} p'_A$
$\boxed{\alpha_i} = X_1 X_2 \dots X_m$	
for $X_j \in N \cup T, j=1..m$	$p_0 \xrightarrow{X_1} p_1 \xrightarrow{X_2} \dots \xrightarrow{X_m} p_m$

Rysunek 7: Transformacja gramatyki predykatowej do ATN



Rysunek 8: ATN dla G z  $P = \{S \rightarrow Ac|Ad, A \rightarrow aA|b\}$

ATNy przypominają diagramy składni, używane do dokumentowania języków programowania, z podautomatami ATN dla poszczególnych symboli nieterminalnych. Rysunek 7 przedstawia jak utworzyć zbiór stanów Q i krawędzie  $\Delta$  z produkcji gramatyki. Początkowy stan dla A jest  $p_A \in Q$  i jest skierowany na  $p_{A,i}$  utworzony z lewej strony krawędzi  $\alpha_i$ , z krawędzią w  $\Delta$ . Ostatni stan utworzony z  $\alpha_i$  jest skierowany na  $p'_A$ . Nieterminalne krawędzie  $p \xrightarrow{A} q$  są niczym wywołania funkcji. Przenoszą kontrolę ATN na podautomat A, wkładając stan powrotny q na stos wywołań, tak aby mógł kontynuować z q po osiągnięciu stanu stop dla A podautomatu  $p'_A$ . Rysunek 8 przedstawia ATN dla prostej gramatyki. Język rozpoznawany przez ATN jest taki sam, jak oryginalny język gramatyczny.

### 4.4 Lookahead DFA

Parserzy ALL(\*) odnotowują wyniki przewidywań uzyskane z symulacji ATN wraz z lookahead DFA, które są rozszerzonym DFA z akceptowalnym stanem, odzwierciedlając numer przewidywanej produkcji.

Występuje jeden akceptowalny stan na decyzję produkcji. Definicja 4.1. Lookahead DFA to DFA rozszerzony o akceptujące stany, który dostarcza numer przewidywanej produkcji. Dla gramatyki predykatowej  $G = (N, T, P, S, \Pi, \mathcal{M})$ ,  $DFAM = (Q, \Sigma, \Delta, D_0, F)$  gdzie

- $Q$  jest zbiorem stanów
- $\Sigma = T$  jest alfabetem krawędzi
- $\Delta$  jest funkcją przejścia mapującą  $Q \times \Sigma \rightarrow Q$
- $D_0 \in Q$  jest stanem startowym
- $F \subset Q = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  stany końcowe, jeden  $f_i$  dla produkcji  $i$

Przejście w  $\Delta$  ze stanu  $p$  do stanu  $q$  na symbolu  $a \in \Sigma$  ma postać  $p \xrightarrow{a} q$  i wymagamy by  $p \xrightarrow{a} q'$  implikowało  $q = q'$ .

## 5 Algorytm analizy składniowej ALL(\*)

Z definicji gramatyki, sformalizowanych ATN i lookahead DFA, możemy przedstawić główne funkcje algorytmu analizy składniowej ALL(\*). W części tej podsumowano wszystkie funkcje i opisano jak łączą się one, następnie omówiono wykres struktury danych przed przedstawianiem samych funkcji. Ostatecznie przedstawiono przykład jak działa algorytm.

Parsowanie rozpoczyna się od funkcji *parse*, która zachowuje się jak konwencjonalna zstępująca analiza funkcji LL(k), z wyjątkiem tego że parsery ALL(\*) przewidują produkcje ze specjalną funkcją zwaną *adaptivePredict*, zamiast zwykłego mechanizmu „przełącz na następny typ symbolu k”. Funkcja *adaptivePredict* symuluje ATN odzwierciedlając pierwotną gramatykę predykatu w wyborze produkcji  $\alpha_i$  w celu rozwinięcia punktu decyzyjnego  $A \rightarrow \alpha_1 | \dots | \alpha_n$ . Od strony koncepcyjnej, przewidywanie jest funkcją bieżącej analizy składniowej stosu wywołań  $\gamma_0$ , pozostałych danych wejściowych  $w_r$  i stanu użytkownika  $\mathbb{S}$  jeśli  $A$  posiada predykaty. Jeżeli chodzi o wydajność, przewidywanie ignoruje  $\gamma_0$ , gdy to tylko możliwe (Sekcja 3.1) i używa minimalnego lookahead z  $w_r$ .

Aby uniknąć powtarzania symulacji ATN dla tych samych danych wejściowych i symboli nieterminalnych, *adaptivePredict* składa DFA, który gromadzi mapowania danych wejściowych do przewidywanej produkcji, jeden DFA na symbol nieterminalny. Należy mieć na uwadze, że każdy stan DFA,  $D$ , jest zbiorem konfiguracji ATN dopuszczalnym po dopasowaniu symboli lookahead prowadzących do tego stanu. Funkcja *adaptivePredict* wywołuje *startState* do utworzenia początkowego stanu DFA,  $D_0$  a następnie wywołuje *SLLpredict* w celu uruchomienia symulacji.

Funkcja *SLLpredict* dodaje ścieżki do lookahead DFA, które pasują do niektórych lub wszystkich  $w_r$  poprzez wielokrotne wołanie *target*. Funkcja *target* oblicza DFA docelowego stanu  $D'$  z bieżącego stanu  $D$  przy użyciu operacji *move* i *closure* podobnych do tych znalezionych w *subset construction*. Funkcja *move* wykrywa wszystkie konfiguracje ATN jako osiągalne na bieżącym symbolu wejściowym, a funkcja *closure* wykrywa wszystkie konfiguracje jako osiągalne bez przemierzenia krawędzi terminalnej. Podstawową różnicą od podzbioru konstrukcji jest to, że *closure* symuluje wywołanie i powrót podautomatów ATN związanych z symbolami nieterminali.

W przypadku, gdy symulacja SLL wykryje konflikt (Sekcja 5.3), *SLLpredict* przewija dane wejściowe i wywołuje *LLpredict* w celu ponowienia próby przewidywania, tym razem biorąc pod uwagę  $\gamma_0$ . Funkcja *LLpredict* jest podobna do *SLLpredict*, ale nie aktualizuje symboli nieterminalnych DFA, ponieważ DFA musi być niezależny od stosu, aby mógł być wykorzystywany we wszystkich kontekstach stosu. Konflikty w zbiorach konfiguracji ATN wykryte przez *LLpredict* reprezentują niejednoznaczności. Obie funkcje przewidywania używają *getConflictSetsPerLoc* do wykrywania konfliktów, które są konfiguracjami określającymi tę samą lokalizację parsera, ale różne produkcje. Aby uniknąć niepowodzenia *LLpredict*,

*SLLpredict* wykorzystuje *getProdSetsPerState* aby zobaczyć czy potencjalnie bezkonfliktowa ścieżka DFA pozostaje gdy *getConflictSetsPerLoc* zgłasza konflikt. Jeśli tak, to warto kontynuować proces *SLLpredict*, mając nadzieję że więcej lookahead rozwiąże konflikt bez uciekania się do pełnej analizy składniowej LL.

Zanim szczegółowo omówimy te funkcje, przedstawimy przegląd fundamentalnych danych struktury grafu, które efektywnie zarządzają wieloma stosami wywołań GLL i GLR.

## 5.1 Stosy wywołań o strukturze grafowej

Najprostszym sposobem implementacji przewidywania ALL(\*) byłoby klasyczne podejście algorytmu z nawrotami (backtrackingu), uruchamiając subparser dla każdego  $\alpha_j$ . Subparsery przetworzą wtedy wszystkie pozostałe dane wejściowe, ponieważ algorytm z nawrotami subparserów nie wie kiedy zaprzestać analizy – nie zna statusu pozostałych subparserów. Niezależne subparsery wywołałyby również gwałtowną złożoność czasową. Zajęliśmy się obiema kwestiami poprzez postępowanie przewidujących subparserów równym krokiem poprzez  $w_r$ . Przewidywanie wygasa po przetworzeniu przedrostka  $u \preceq w_r$ , gdy wszystkie subparsery oprócz jednego zamierają lub przewidywanie identyfikuje konflikt. Praca w równym kroku również stanowi okazję dla subparserów do podziału stosów wywołań, w ten sposób unikając zbędnych obliczeń.

Dwa subparsery w stanie ATN-u  $p$ , które dzielą taki sam szczyt stosu ATN,  $q\gamma_1$  i  $q\gamma_2$ , odzwierciedlają takie samo zachowanie dotąd aż symulacja pobierze  $q$  ze stosów. Przewidywanie może traktować te subparsery jako pojedynczy subparser poprzez łączenie stosów. Możemy łączyć stosy dla wszystkich konfiguracji w stanie DFA w postaci  $(p, i, \gamma_1)$  oraz  $(p, i, \gamma_2)$ , tworząc ogólną konfigurację  $(p, i, \Gamma)$  z *graph-structured stack* (GSS) [25]  $\Gamma = \gamma_1 \uplus \gamma_2$  gdzie  $\uplus$  określa połączenie.  $\Gamma$  może być pustym stosem  $\square$ , specjalnym stosem  $\#$  wykorzystywanym do przewidywania SLL (wkrótce się odniesiemy), indywidualnym stosem, albo grafem węzłów stosu. Łączenie poszczególnych stosów w GSS zmniejsza potencjalną wielkość wykładniczej do złożoności liniowej (Twierdzenie 6.4). Do reprezentacji GSS używamy niezmiennej struktury danych grafu z maksymalnym współdzieleniem węzłów. Oto dwa przykłady, które dzielą stos parsera  $\gamma_0$  w dolnej części stosu:

$$p\gamma_0 \uplus q\gamma_0 = \begin{array}{c} p \quad q \\ \swarrow \quad \searrow \\ \boxed{\gamma_0} \end{array} \quad q\Gamma\gamma_0 \uplus q\Gamma'\gamma_0 = \begin{array}{c} q \\ \swarrow \quad \searrow \\ \boxed{\Gamma} \quad \boxed{\Gamma'} \\ \swarrow \quad \searrow \\ \boxed{\gamma_0} \end{array}$$

W funkcjach, które omówimy, wszystkie dodatki do zbiorów konfiguracji, takie jak w przypadku operatora  $+=$ , domyślnie łączą stosy.

Występuje szczególny przypadek związany z warunkiem stosu na początku przewidywania.  $\Gamma$  musi rozróżniać pomiędzy pustym stosem a brakiem informacjami stosu. Dla przewidywania LL, początkowa symulacja stosu ATN jest bieżącym parserem stosu wywołań  $\gamma_0$ . Początkowy stos jest pusty,  $\gamma_0 = \square$ , gdy reguła decyzji wejścia jest symbolem startowym. Przewidywanie SLL niezależne od stosu, z drugiej strony, ignoruje parser stosu wywołań i używa początkowego stosu  $\#$  wskazując brak informacji stosu. To rozróżnienie jest ważne obliczając *closure* (Funkcja 7) konfiguracji stanowiące stan zatrzymania podmaszyny. Bez informacji stosu parsera, subparser który zwraca z decyzji wejścia regułę A musi wziąć pod uwagę wszystkie możliwe wywołania miejsc czyli *closure* widzi konfigurację  $(p'_A, -, \#)$ .

Pusty stos  $\square$  jest traktowany podobnie jak inne węzły do przewidywania LL:  $\Gamma \uplus \square$  przedstawia grafową równowartość zbioru  $\{\Gamma, \square\}$ , co oznacza że zarówno  $\Gamma$  jak i pusty stos są dopuszczalne. Wkładając stan  $p$  na  $\square$  mamy  $p\square$ , a nie  $p$ , ponieważ pobranie  $p$  musi pozostawić symbol pustego stosu. Dla przewidywania SLL,  $\Gamma \uplus \# = \#$  dla dowolnego grafu  $\Gamma$ , ponieważ  $\#$  stanowi symbol wieloznaczny i reprezentuje zbiór wszystkich stosów. Dlatego też, znak wieloznaczny zawiera wszelkie  $\Gamma$ . Wkładając stan  $p$  na  $\#$  mamy  $p\#$ .

## 5.2 Funkcje parsowania ALL(\*)

Teraz możemy omówić kluczowe funkcje ALL(\*), które zostały zaznaczone w boksach i wymienione poniżej. Niniejszy opis został zapisany w zstępującym porządku i zakłada że ATN odpowiadający gramatyce G, semantyczny stan  $\mathbb{S}$ , tworzone DFA, oraz dane wejściowe są odpowiednie dla wszystkich funkcji algorytmu i że semantyczne predykaty oraz działania mogą mieć bezpośredni dostęp do  $\mathbb{S}$ .

**Funkcja parse.** Głównym punktem wejściowym jest funkcja *parse* (przedstawiona w Funkcji 1), która inicjuje parsowanie z początkowym symbolem, argument S. Funkcja rozpoczyna się od uruchomienia symulacji stosu wywołań  $\gamma$  do pustego stosu i ustawienia „kursora” stanu ATN  $p$  na  $p_{S,i}$  stanu ATN w lewej krawędzi produkcji S o numerze i przewidzianego za pomocą *adaptivePredict*. Funkcja jest w pętli do czasu gdy kursor osiągnie stan zatrzymania  $p'_S$  podmaszyny dla S. Gdy kursor osiągnie kolejny stan zatrzymania podmaszyny  $p'_B$ , funkcja *parse* symuluje „powrót” wyświetlając stan powrotny  $q$  ze stosu wywołań i przenosząc  $p$  do  $q$ .

```

Function 1:parse(S)
 $\gamma := []$ ;  $i := \text{adaptivePredict}(S, \gamma)$ ;  $p := p_{S,i}$ ;
while true do
  if  $p = p'_B$  {czyli p jest regułą stanu stop} then
    if  $B = S$  {startowa reguła S końcowego dopasowania} then return;
    else let  $\gamma = q\gamma'$  in  $\gamma := \gamma'$ ;  $p := q$ ;
  else
    switch  $t$  where  $p \xrightarrow{t} q$  do
      case  $b$ : {czyli przejście symbolu terminalnego}
        if  $b = \text{input.curr}()$  then
           $p := q$ ;  $\text{input.advance}()$ ;
        else parse error;
      case  $B$ :  $\gamma := q\gamma$ ;  $i := \text{adaptivePredict}(B, \gamma)$ ;  $p := p_{B,i}$ ;
      case  $\mu$ :  $\mathbb{S} := \mu(\mathbb{S})$ ;  $p := q$ ;
      case  $\pi$ : if  $\pi(\mathbb{S})$  then  $p := q$  else parse error;
      case  $\epsilon$ :  $p := q$ ;
    endsw

```

Dla  $p$  nie w stanie zatrzymania, analiza dokonuje przejścia ATN  $p \xrightarrow{t} q$ . Może wystąpić tylko jedno przejście z  $p$ , ze względu na sposób w jaki ATNy są utworzone. Jeśli  $t$  jest symbolem terminalnym krawędzi i pasuje do bieżącego symbolu wejściowego, *parse* przechodzi przez krawędź i przechodzi do następnego symbolu. Jeśli  $t$  jest symbolem nieterminalnym krawędzi, odwołującym się do niektórych B, *parse* symuluje wywołania podmaszyny wkładając stan powrotny  $q$  na stos i wybierając odpowiednie produkcje lewej krawędzi w B poprzez wywołanie *adaptivePredict* i ustawiając odpowiednio kursor. Dla krawędzi akcji, *parse* aktualizuje stan zgodnie z mutatorem i przechodzi do  $q$ . Dla krawędzi predykatu, *parse* przechodzi tylko jeśli predykat  $\pi$  ocenia za prawdziwy. Podczas parsowania, niezatwierdzone predykaty zachowują się jak niedopasowane symbole. Dla krawędzi  $\epsilon$ , *parse* przechodzi do  $q$ . Funkcja *parse* nie sprawdza jawnie czy parsowanie zatrzymuje się na końcu pliku, ponieważ aplikacje, takie jak środowisko programistyczne powinny parsować wejściowe podfrazy.

**Funkcja adaptivePredict.** Do przewidywania produkcji, *parse* wywołuje *adaptivePredict* (Funkcja 2), która jest funkcją decyzji symboli nieterminalnych A i bieżącego stosu analizatora  $\gamma_0$ . Ponieważ w trakcie pełnej symulacji LL przewidywanie ocenia tylko predykaty, *adaptivePredict* przechodzi do *LLpredict* jeśli przynajmniej jedna z produkcji jest predykatem.<sup>5</sup> W przypadku decyzji, które nie posiadają

<sup>5</sup>Predykcja SLL nie włącza predykatów dla czytelności w tym naświetleniu tematu, ale w praktyce ANTLR włącza pre-

jeszcze DFA, *adaptivePredict* tworzy DFA  $dfa_A$  z początkowym stanem  $D_0$  w przygotowaniu do *SLLpredict* aby dodać ścieżki DFA.  $D_0$  jest zbiorem konfiguracji ATN osiągalnym bez przechodzenia przez krawędzie terminali. Funkcja *adaptivePredict* tworzy również zbiór stanów końcowych  $F_{DFA}$ , który zawiera jeden stan końcowy  $f_i$  dla każdej produkcji A. Zbiór stanów DFA,  $Q_{DFA}$ , jest powiązany z  $D_0$ ,  $F_{DFA}$  oraz stanem błędu  $D_{error}$ . Słownik  $\Sigma_{DFA}$  to zbiór terminali gramatycznych T. W przypadku nieprzewidzianych decyzji z istniejącym DFA, *adaptivePredict* wywołuje *SLLpredict* do uzyskania przewidywania z DFA, z możliwością rozszerzenia DFA poprzez symulację ATN w procesie. Ostatecznie, z faktu iż *adaptivePredict* tylko przegląda, a nie przeprowadza analizy składniowej, musi cofnąć jakiegokolwiek zmiany wprowadzone do kursora wejściowego, poprzez przechwytywanie indeksu wejściowego jako start na początku przewijanie na początek przed wyjściem.

```

Function 2:adaptivePredict(A, $\gamma_0$ ) returns int alt
start:=input.index(); // checkpoint input
if  $\exists A \rightarrow \pi_i \alpha_i$  then
  alt:=LLpredict(A,start, $\gamma_0$ );
  input.seek(start); //wycofanie zmian pozycji strumienia
  return alt;
if  $\nexists dfa_A$  then
   $D_0 := \text{startState}(A, \#)$ ;
   $F_{DFA} := \{ f\_i \mid f\_i := \text{DFA.State}(i) \forall A \rightarrow \alpha_i \}$ 
   $Q_{DFA} := D_0 \cup F_{DFA} \cup D_{error}$ 
   $dfa_A := \text{DFA}(Q_{DFA}, \Sigma_{DFA} = T, \Delta_{DFA} = \emptyset, D_0, F_{DFA})$ ;
alt:=SLLpredict(A, $D_0$ ,start, $\gamma_0$ );
input.seek(start); //wycofanie zmian pozycji strumienia
return alt;

```

**Funkcja startState.** Aby utworzyć startowy stan DFA  $D_0$ , *startState* (Funkcja 3) dodaje konfiguracje  $(p_{A,i}, i, \gamma)$  dla każdego  $A \rightarrow \alpha_i$  oraz  $A \rightarrow \pi_i \alpha_i$ , jeśli  $\pi_i$  oceniony jako prawdziwy. W przypadku wywołania z *adaptivePredict* argument stosu wywołań  $\gamma$  jest specjalnym symbolem # wymaganym przez predykcję SLL, wskazując „brak informacji stosu analizatora”. W przypadku wywołania z *LLpredict*,  $\gamma$  jest początkowym stanem stosu analizatora  $\gamma_0$ . Obliczenie *closure* konfiguracji skompletuje  $D_0$ .

```

Function 3:startState(A, $\gamma$ ) returns DFA.State  $D_0$ 
 $D_0 := \emptyset$ 
foreach  $p_A \xrightarrow{\epsilon} p_{A,i} \in \Delta_{ATN}$  do
  if  $p_A \xrightarrow{\epsilon} p_{A,i} \xrightarrow{\pi_i} p$  then  $\pi := \pi_i$  else  $\pi := \epsilon$ ;
  if  $\pi = \epsilon$  or eval( $\pi_i$ ) then  $D_0 += \text{closure}(\{ \}, D_0, (p_{A,i}, i, \gamma))$ ;
return  $D_0$ ;

```

**Funkcja SLLpredict.** Funkcja *SLLpredict* (Funkcja 4) dokonuje zarówno symulację DFA jak i SLL ATN, stopniowo dodając ścieżki do DFA. W najlepszym przypadku, występuje już ścieżka DFA z  $D_0$  do akceptowalnego stanu,  $f_i$  dla przedrostka  $u \preceq w_r$  i pewnej produkcji o numerze  $i$ . W najgorszym przypadku symulacja ATN jest wymagana dla wszystkich  $a$  w sekwencji  $u$ . Główna pętla w *SLLpredict* znajduje istniejącą krawędź wychodzącą ze stanu DFA kursora D w  $a$  lub oblicza nową za pomocą *target*. Możliwe jest że *target* obliczy stan docelowy  $\underline{D}'$ , który już istnieje w DFA, w którym funkcja *target* zwraca  $\underline{D}'$ ; ponieważ  $\underline{D}'$  może już mieć obliczone krawędzie wychodzące, nieefektywne jest odrzucenie pracy przez zastępując  $\underline{D}'$ . W następnej iteracji, *SLLpredict* rozważy krawędzie z  $\underline{D}'$ , skutecznie przełączając dykaty do stanów akceptowalnych DFA (Sekcja B.2). DFA ANTLR 3 używało predykatowych krawędzi a nie predykatowych stanów akceptujących.



na symulację DFA.

```

Function 4: SLLpredict(A, D0, start, γ0) returns int prod
a:=input.curr(); D = D0;
while true do
  let D' be DFA target D  $\xrightarrow{a}$  D'
  if D'=Derror then parse error;
  if D' stack sensitive then
    input.seek(start); return LLredict(A, start, γ0);
  if D'=fi ∈ FDFA then return i;
  D:=D'; a:=input.next();

```

Gdy tylko *SLLpredict* osiągnie stan docelowy D', wówczas sprawdza pod kątem błędów, zależności stosu i ukończenia. W przypadku gdy *target* D' jest oznaczony jako zależny od stosu, przewidywanie wymaga pełnej symulacji LL, a *SLLpredict* wywołuje *LLpredict*. W przypadku gdy D' jest akceptowalnym stanem f<sub>i</sub> jsko określone przez *target*, *SLLpredict* zwraca i. W tym przypadku, wszystkie konfiguracje w D' przewidują taką samą produkcję i. Dalsza analiza nie jest już potrzebna, a algorytm może zostać zatrzymany. Dla jakiegokolwiek innego D' algorytm ustawia D na D', pobiera następny symbol i powtarza.

**Funkcja target.** Przy użyciu połączonych operacji *move-closure* funkcja *target* wykrywa zbiór konfiguracji ATN osiągalny z D na jednym symbolu terminalnym a ∈ T. Funkcja *move* oblicza konfiguracje osiągalne bezpośrednio na a poprzez przejście terminalnej krawędzi:

$$\text{move}(D, a) = \{(q, i, \Gamma) \mid p \xrightarrow{a} q, (p, i, \Gamma) \in D\}$$

Te konfiguracje i ich *closure* formują D'. Jeśli D' jest puste, żadna alternatywa nie jest wykonalna, ponieważ żadna nie może dopasować a z bieżącego stanu, tak więc *target* zwraca stan błędu D<sub>error</sub>. Jeśli wszystkie konfiguracje w D' przewidują taki sam numer produkcji i, *target* dodaje krawędź D  $\xrightarrow{a}$  f<sub>i</sub> i zwraca stan akceptowalny f<sub>i</sub>. Jeśli D' ma konfliktujące konfiguracje, *target* zaznacza D' jako zależny od stosu. Konfliktem może być niejednoznaczność albo słabość wynikająca z braku informacji stosu parsera SLL. (Konflikty wraz z *getConflictSetsPerLoc* i *getProdSetsPerState* zostały opisane w Sekcji 5.3). Funkcja kończy poprzez dodanie stanu D', jeśli odpowiedni stan D' nie występuje już w DFA, oraz dodając krawędź D  $\xrightarrow{a}$  D'.

```

Function 5: target(D, a) returns DFA.State D'
mv:=move(D, a);
D':=∪c∈mv closure({}, c);
if D'=∅ then ΔDFA += D  $\xrightarrow{a}$  Derror; return Derror;
if { j | (-, k, -) ∈ D' } = { i } then
  ΔDFA += D  $\xrightarrow{a}$  fi; return fi; //Predykcja reguły i
//Patrz na konflikt między konfiguracjami D'
a.conflict:=∃alts ∈getConflictSetsPerLoc(D'): |alts|>1;
viablealt:=∃alts ∈getProdSetsPerState(D'): |alts|=1;
if a.conflict and not viablealt then
  mark D' as stack sensitive;
if D'= D' ∈ QDFA then D':= D'; else QDFA += D';
ΔDFA += D  $\xrightarrow{a}$  D';
return D';

```

**Funkcja LLpredict.** W przypadku konfliktu symulacji SLL, *SLLpredict* przewija dane wejściowe i wywołuje *LLpredict* (Funkcja 6) w celu uzyskania przewidywania opartego na symulacji LL ATN, która uwzględni pełny stos analizatora γ<sub>0</sub>. Funkcja *LLpredict* jest podobna do *SLLpredict*. Wykorzystuje stan DFA D jako kursor i stan D' jako cel przejścia dla spójności, ale nie aktualizuje DFA A, tak więc

przewidywanie SLL w dalszym ciągu może używać DFA. Przewidywanie LL postępuje aż  $D' = \emptyset$ ,  $D'$  jednoznacznie przewidzi alternatywę, lub  $D'$  będzie miało konflikt. Jeśli  $D'$  z symulacji LL wykazuje konflikt, podobnie jak SLL, algorytm raportuje niejednoznaczność frazę (jako dane wejściowe od startu do bieżącego indeksu) i rozwiązuje do minimalnego numeru produkcji wśród sprzecznych konfiguracji. (Seksja 5.3 opisuje wykrywanie niejednoznaczności). W przeciwnym razie, kursor  $D$  przenosi się do  $D'$  i uwzględnia następną symbol wejściowy.

```

Function 6:LLpredict(A,start,  $\gamma_0$ ) returns int alt
D:= $D_0$ :=startState(A,  $\gamma_0$ );
while true do
  mv:=move(D, input.curr());
  D':= $\bigcup_{c \in mv}$  closure({},c);
  if D'= $\emptyset$  then parse error;
  if { j|(-,j,-)  $\in$  D' } = {i} then return i;
  /* Jeśli wszystkie pary p, $\Gamma$  przewidzą > 1 alt i wszystkie
  zbiory produkcji są takie same, input niejednoznaczny */
  altsets:=getConflictSetsPerLoc(D');
  if  $\forall x, y \in altsets, x=y$  and  $|x|>1$  then
    x:=dowolny zbiór z altsets;
    raportuj niejednoznaczny alt x z start..input.index();
    return min(x);
  D:=D'; input.advance();

```

**Funkcja closure.** Operacja *closure* (Funkcja 7) przechodzi przez wszystkie  $\epsilon$  krawędzie osiągalne z  $p$ , stanu ATN rzutowanego z parametru konfiguracji  $c$  oraz symuluje wywołanie i powrót podmaszyn. Funkcja *closure* traktuje krawędzie  $\mu$  i  $\pi$  jako krawędzie  $\epsilon$ , ponieważ mutatory nie powinny zostać wykonywane podczas przewidywania, a predykaty są oceniane tylko podczas wyliczenia stanu początkowego. Z parametru  $c = (p, i, \Gamma)$  i krawędzi  $p \xrightarrow{\epsilon} q$  *closure* dodaje  $(q, i, \Gamma)$  do zbioru roboczego  $C$ . W przypadku submaszyny wywołującej krawędź  $p \xrightarrow{B} q$ , *closure* dodaje *closure*  $(p_B; i; q\Gamma)$ . Powracając ze stanu stopu submaszyny  $p'_B$  dodaje *closure* konfiguracji  $(q, i, \Gamma)$  w którym  $c$  wyglądałoby następująco  $(p'_B; i; q\Gamma)$ . Ogólnie rzecz biorąc, stos konfiguracji  $\Gamma$  jest grafem reprezentującym wiele indywidualnych stosów. Funkcja *closure* musi symulować powrót z każdego szczytu stosu z  $\Gamma$ . Algorytm używa notacji  $q\Gamma' \in \Gamma$  do reprezentacji wszystkich szczytów stosów  $q$  z  $\Gamma$ . Aby uniknąć braku zakończenia z powodu prawej rekursji SLL oraz  $\epsilon$  krawędzi w podregułach, takich jak  $()+$ , *closure* wykorzystuje zbiór *busy* dzielony pomiędzy wszystkie operacje zamknięcia, używanych do wyliczenia takiego samego  $D'$ .

Gdy zamknięcie osiągnie stan stopu  $p'A$  dla decyzji wejściowej reguły, przewidywania LL i SLL zachowują się inaczej. Przewidywanie LL pobiera ze stosu wywołań parsera  $\gamma_0$  i „powraca” do stanu, który wywołał podmaszynę  $A$ . Natomiast przewidywanie SLL nie ma dostępu do stosu wywołań analizatora i musi rozważać wszystkie możliwe miejsca wywołań  $A$ . Funkcja *closure* w tej sytuacji znajduje  $\Gamma = \#$  (oraz  $p'_B = p'_A$ ), w tej sytuacji ponieważ *startState* powinno ustawić początkowy stan stosu jako  $\#$  a nie  $\gamma_0$ ; Zachowanie się podczas powrotu w decyzji reguły wejściowej jest tym co odróżnia SLL od analizy składniowej LL.

```

Function 7:closure(busy, c=(p,i,Γ)) returns zbiór C
if c ∈ busy then return ∅;else busy += c;
C:={c};
if p=p'B (czyli p jest jakimkolwiek stanem stopu włączając p'A) then
  if Γ=# (czyli stos jest wieloznaczny SLL) then
    C+= ∪∀p2:p1→p2∈ΔATNB closure(busy,(p2,i,#)) //wołanie closure położenia
  else //niepusty stos SLL lub LL
    for qΓ' ∈ Γ (czyli każdy szczyt q stosu w grafie Γ) do
      C+= closure(busy (q,u,Γ')); //„return” do q
    return C;
end
foreach p edge → q do
  switch edge do
    B: C+= closure(busy, (pB, i, qΓ));
    π, μ, ε: C+= closure(busy, (q, i, Γ));
return C;

```

### 5.3 Detekcja konfliktu i niejednoznaczności

Pojęcie sprzecznych konfiguracji ma kluczowe znaczenie dla analizy ALL(\*). Konflikty wywołują pracę awaryjną w pełnym przewidywaniu LL podczas przewidywania SLL i wskazują na niejednoznaczność podczas przewidywania LL. Wystarczającym warunkiem konfliktu między konfiguracjami jest, gdy różnią się tylko w przewidzianej alternatywie:  $(p, i, \Gamma)$  oraz  $(p, j, \Gamma)$ . Wykrywanie konfliktów jest wspomagane przez dwie funkcje. Pierwsza, *getConflictSetsPerLoc* (Funkcja 8) zbiera zbiory numerów produkcji powiązanych z wszystkimi konfiguracjami  $(p, -, \Gamma)$ . Jeśli para  $p, \Gamma$  przewiduje więcej niż jedną produkcję, wówczas występuje konflikt. Poniżej przykład zbioru konfiguracji i powiązanego zbioru konfliktu:

$$\left\{ \underbrace{(p, 1, \Gamma), (p, 2, \Gamma), (p, 3, \Gamma)}_{1,2,3}, \underbrace{(p, 1, \Gamma'), (p, 2, \Gamma')}_{1,2}, \underbrace{(r, 2, \Gamma'')}_{2} \right\}$$

Te zbiory konfliktów wskazują, że lokalizacja  $p, \Gamma$  jest osiągalna z produkcji 1, 2, 3, lokalizacja  $p, \Gamma'$  jest osiągalna z produkcji 1, 2, a lokalizacja  $r, \Gamma''$  jest osiągalna z produkcji 2.

```

//Dla każdego p,Γ daj zbiór alts(i) z (p,-,Γ) ∈ konfiguracji D
Function 8:getConflictSetsPerLoc(D) returns zbiór zbiorów
s:=∅;
for (p,-,Γ) in D do prods:={i|(p,i,Γ)}; s:=s ∪ prods;
return s;

```

Druga funkcja, *getProdSetsPerState* (Funkcja 9), jest podobna, ale zbiera numery produkcji powiązane tylko ze stanem p ATN. Dla takiego samego zbioru konfiguracji, *getProdSetsPerState* oblicza następujące zbiory konfliktu:

$$\left\{ \underbrace{(p, 1, \Gamma), (p, 2, \Gamma), (p, 3, \Gamma), (p, 1, \Gamma'), (p, 2, \Gamma')}_{1,2,3}, \underbrace{(r, 2, \Gamma'')}_{2} \right\}$$

Wystarczający warunek dla niepowodzenia w przewidywaniu LL (*LLpredict*) z SLL mógłby wystąpić w przypadku, gdy jest przynajmniej jeden zbiór sprzecznych konfiguracji: *getConflictSetsPerLoc* zwraca co najmniej jeden zbiór z więcej niż jedną liczbą produkcji. Np. konfiguracje  $(p, i, \Gamma)$  i  $(p, j, \Gamma)$  występują w parametrze D. Jednak naszym celem jest kontynuowanie przy użyciu przewidywania SLL tak długo, jak to tylko możliwe, ponieważ przewidywanie SLL aktualizuje cache lookahead DFA. W tym celu, przewidywanie SLL postępuje, jeśli występuje przynajmniej jedna konfiguracja niesprzeczna (gdy *getProdSet-*

$sPerState$  zwraca co najmniej jeden zbiór wielkości 1). Mając nadzieję, że więcej lookahead doprowadzi do zbioru konfiguracji, który przewiduje jednoznaczny produkt za pośrednictwem niesprzecznych konfiguracji. Na przykład, decyzja dla  $S \rightarrow a|a|a \cdot_p b$  jest niejednoznaczna względem  $a$  pomiędzy produkcjami 1 i 2, jednakże jest jednoznaczna względem  $ab$ . (Lokalizacja  $\cdot_p$  jest stanem ATN między  $a$  i  $b$ .) Po dopasowaniu danych wejściowych  $a$ , zbiór konfiguracji wyglądałby następująco  $\{(p'_S, 1, \square), (p'_S, 2, \square), (p, 3, \square)\}$ . Funkcja  $getConflictSetsPerLoc$  zwraca  $\{\{1, 2\}, \{3\}\}$ . Następnie  $move-closure$  względem  $b$  prowadzi do zbioru konfiguracji niesprzecznych  $\{(p'_S, 3, \square)\}$  z  $(p, 3, \square)$ , omijając konflikt. W przypadku gdy wszystkie zwrócone zbiory z  $getConflictSetsPerLoc$  przewidują więcej niż jedną alternatywę, żadna ilość lookahead nie doprowadzi do jednoznacznego przewidywania. Analiza musi zostać wznowiona ponownie ze stosem wywołań  $\gamma_0$  za pośrednictwem  $LLpredict$ .

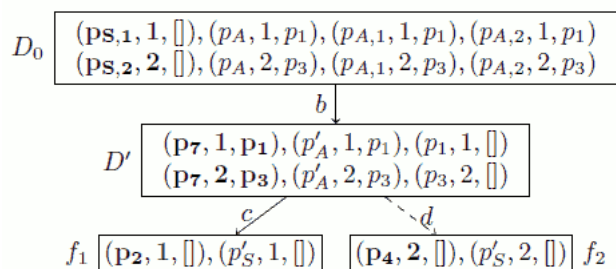
```
//Dla każdego p daj zbiór alts(i) z (p,-,-) ∈ konfiguracji D
Function 9:getProdSetsPerState(D) returns zbiór zbiorów
s:=∅;
for (p,-,-) in D do prods:={i|(p,i,-)}; s:=s ∪ prods;
return s;
```

Konflikty podczas symulacji LL są niejednoznacznościami i występują gdy każdy zbiór konfliktu z  $getConflictSetsPerLoc$  zawiera więcej niż 1 produkcję – każda lokalizacja w D jest osiągalna z więcej niż 1 produkcją. Gdy tylko wiele subparserów osiągnie to samo  $(p, -, \Gamma)$  wszystkie przyszłe symulacje wyprowadzone z  $(p, -, \Gamma)$  będą zachowywać się identycznie. Więcej lookahead nie rozwiąże niejednoznaczności. Przewidywanie może zostać przerwane w tym momencie i zaraportować lookahead przedrostka  $u$  jako niejednoznaczne, jednakże  $LLpredict$  nadal postępuje aż się upewni **która** produkcja  $u$  jest niejednoznaczna. Należy wziąć pod uwagę zbiory konfliktu  $\{1,2,3\}$  oraz  $\{2,3\}$ . Ponieważ oba mają więcej niż jeden stopień, zbiory te reprezentują niejednoznaczność, jednakże dodatkowe dane wejściowe będą identyfikować czy  $u \preceq w_r$  jest niejednoznaczne względem  $\{1,2,3\}$  czy  $\{2,3\}$ . Funkcja  $LLpredict$  postępuje aż wszystkie zbiory konfliktu, które identyfikują niejasności będą równe; warunek  $x = y$  oraz  $|x| > 1 \forall x, y \in altsets$  odzwierciedla ten test.

W celu wykrycia konfliktów, algorytm porównuje grafowo-strukturalne stosy często. Technicznie konflikt występuje gdy konfiguracje  $(p, i, \Gamma)$  i  $(p, j, \Gamma')$  występują w tym samym zbiorze konfiguracji z  $i \neq j$  oraz przynajmniej jednym śladem stosu zarówno dla  $\Gamma$  jak i  $\Gamma'$ . Z faktu iż weryfikacja pod kątem przecięć grafu jest kosztowna, algorytm wykorzystuje regułę równości,  $\Gamma = \Gamma'$ , jako metodę heurystyczną. Równość jest znacznie szybsza ze względu na wspólne podgrafy. Wykres algorytmu równości często może sprawdzać identyczność węzła do porównywania dwóch całych podgrafów. W najgorszym przypadku, równość kontra podzbiór heurystycznie opóźnia wykrycie konfliktu aż GSS między sprzecznymi konfiguracjami będzie prostymi liniowymi stosami, gdzie przecięcie grafów jest takie same jak graf równości. Kosztem tej heurystyki jest głębszy lookahead.

## 5.4 Przykładowa konstrukcja DFA

Aby przedstawić zachowanie algorytmu, należy rozważyć dane wejściowe  $bc$  i  $bd$  dla gramatyki i ATN przedstawione na Rysunku 8. Symulacja ATN dla decyzji S rozpoczyna subparsery w lewej krawędzi węzłów  $p_{S,1}$  i  $p_{S,2}$  z początkowymi konfiguracjami  $D_0(p_{S,1}, 1, \square)$  i  $(p_{S,2}, 2, \square)$ . Funkcja  $closure$  dodaje trzy dodatkowe konfiguracje do  $D_0$ , gdyż „wywołuje” A z węzłami „powrotu”  $p_1$  i  $p_3$ . Poniżej przedstawiono DFA wynikające z symulacji ATN względem  $bc$ , a następnie  $bd$  (konfiguracje dodane przez  $move$  zostały zapisane pogrubioną czcionką):



Po przewidywaniu bc, DFA posiada stany  $D_0$ ,  $D'$ , i  $f_1$ . Ze stanu  $D'$  DFA, *closure* dochodzi do końca A i pobiera ze stosów  $\Gamma$ , wracając do stanów ATN w S. Stan  $f_1$  jednoznacznie przewiduje numer produkcji na 1. Stan  $f_2$  zostaje utworzony i podłączony do DFA (wskazany przerywaną strzałką) podczas przewidywania drugiej frazy bd. Funkcja *adaptivePredict* najpierw używa symulacji DFA, aby dojść do  $D'$  z  $D_0$  względem b. Przed zobaczeniem bd,  $D'$  nie posiada żadnych krawędzi d, tak więc *adaptivePredict* musi użyć symulacji ATN, aby dodać krawędź  $D' \xrightarrow{d} f_2$

## 6 Rezultaty teoretyczne

Ta sekcja identyfikuje kluczowe twierdzenia ALL(\*) i pokazuje złożoność czasową parsera. Zobacz Dodatek A dla dokładnych dowodów.

**Twierdzenie 6.1.** (Poprawność). Parser ALL(\*) dla nie-lewostronnie-rekurencyjnej G rozpoznaje zdanie w wtedy i tylko wtedy gdy  $w \in L(G)$ .

**Twierdzenie 6.2.** Języki ALL(\*) są zamknięte ze względu na unię

**Twierdzenie 6.3.** Parsowanie ALL(\*) n symboli ma złożoność czasową  $O(n^4)$

**Twierdzenie 6.4.** GSS ma  $O(n)$  węzłów dla n symboli wejściowych.

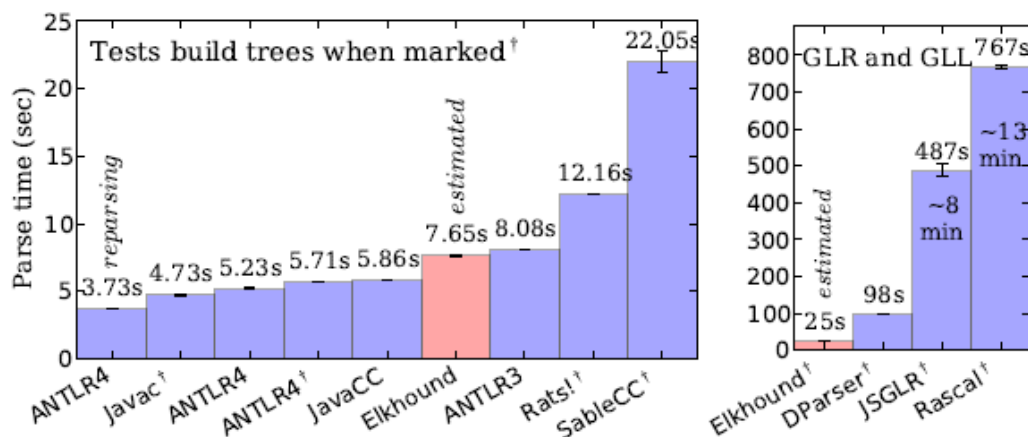
**Twierdzenie 6.5.** Dwufazowy parsing dla nie-lewostronnie-rekurencyjnej G rozpoznaje zdanie w wtedy i tylko wtedy gdy  $w \in L(G)$ .

## 7 Rezultaty empiryczne

Wykonaliśmy eksperymenty aby porównać wydajność parserów Java ALL(\*) z innymi strategiami do zbadania wydajności ALL(\*) dla różnorodnych innych języków, do podkreślenia efektu lookahead DFA cache na prędkość parsowania, i do dostarczenia dowodu linowej wydajności ALL(\*) w praktyce.

### 7.1 Porównanie prędkości ALL(\*) do innych parserów

Nasz pierwszy eksperyment porównuje prędkość parsowania Java przez 10 narzędzi i 8 strategii parsowania: ręcznie-wyregulowany zejść rekurencyjnych z parsowaniem pierwszeństwa, LL(k), LL(\*), PEG, LALR(1), ALL(\*) GLR, i GLL. Rysunek 9 pokazuje czas dla każdego narzędzia parsowania 12'920 plików źródłowych biblioteki Javy 6 i kompilatora. Wybraliśmy Javę ponieważ miała ona najbardziej dostępną gramatykę wśród narzędzi i przykładowe źródła Javy są obfite. Gramatyki Java użyte w eksperymencie przyszły bezpośrednio z powiązаныmi narzędziami z wyjątkiem DParser i Elkhound, które nie oferowały odpowiedniej gramatyki Javy. Przenieśliśmy gramatykę Java ANTLR do meta-składni tych narzędzi używając jednoznacznych reguł wyrażeń arytmetycznych. Również osadzone akcje merge w gramatyce Elkhound do ujednoznacznienia podczas parsowania do imitacji rozdzielczości ANTLR w niejednoznaczności. Wszystkie pliki input były ładowane do RAM przed parsowaniem i czasy odzwierciedlają średni czas obliczony przez 10 całkowitych przejść korpusu, opuszczając dwa pierwsze dla upewnienia się że nie mamy do czynienia z rozgrzewką kompilatora JIT. Dla ALL(\*) użyliśmy dwufazowego parsowania z



Rysunek 9: Porównanie Java czasu parsowania dla 10 narzędzi i 8 strategii na bibliotece Java 6 i źródłach kompilatora (mniejsze wartości oznaczają szybciej). 12'920 plików, 3.6M linii, wielkość 123M. Opis narzędzia zawiera: "tool name version [strategi]." ANTLR4 4.1 [ALL(\*)]; Javac 7 [ręcznie zbudowany parser zejść rekurencyjnych i pierwszeństwa dla wyrażeń]; JavaCC 5.0 [LL(k)]; Elkhound 2005.08.22b [GLR] (testowany na Windows); ANTLR3 3.5 [LL(\*)]; Rats! 2.3.1 [PEG]; SableCC 3.7 [LALR(1)]; DParser 1.2 [GLR]; JSGLR (z Spoofox) 1.1 [GLR]; Rascal 0.6.1 [GLL]. Testy uruchomione 10x z obfitą pamięcią, średnia/stddev obliczona dla ostatnich 8 do uniknięcia kosztu JIT. Słupki błędów są znikome ale pokazują pewne niestalości z powodu działania garbage collector. Aby uniknąć logarytmicznej skali, użyliśmy oddzielnego obrazka dla czasu parsowania GLR, GLL.

Sekcji 3.2. Testową maszyną był 6 core 3.33Ghz 16G RAM Mac OS X 10.7 desktop mający uruchomioną Java 7 virtual machine. Elkhound and DParser parsers were implemented in C/C++, które nie miały garbage collectora biegnącego równolegle. Elkhound był ostatnio uaktualniony w 2005 roku i dłużej nie był bufowany na Linuxie czy OS X, ale byliśmy w stanie zbudować go na Windows 7 (4 core 2.67Ghz 24G RAM). Elkhound również mógł jedynie czytać z pliku tak że Elkhound czas parsowania jest nieporównywalny. W wysiłku by kontrolować prędkość maszyny różnice RAM kontra SSD, obliczyliśmy współczynnik naszej Java test rig na naszej maszynie OS X czytającej z RAM do ANTLR4 Javac ANTLR4 ANTLR4 JavaCC Elkhound ANTLR3 Rats! SableCC 5 0 10 15 20 25 Parse time (sec) 3.73s 4.73s 5.23s 5.71s 5.86s 7.65s 8.08s 12.16s 22.05s estimated reparsing Tests build trees when marked Elkhound DParser JSGLR Rascal 0 100 200 300 400 500 600 700 800 25s 98s 487s 767s GLR and GLL estimated 13 min 8 min test rig uruchomiony pod Windows z SSD. Nasze czasy Elkhound są w czasie Windows pomnożonym przez współczynnik OS X do Windows.

Dla tego eksperymentu, ALL(\*) wyprzedza inne generatory parserów i jest jedynie 20uruchomione z konstrukcją drzewa (oznaczone przez † na Rysunku 9), ANTLR 4 jest około 4.4x szybszy niż Elkhound, najszybsze narzędzie GLR które testowaliśmy, i 135x szybsze niż GLL (Rascal). ANTLR 4 is niedeterministyczny ALL(\*) parser był nieco szybszy niż JavaCC's deterministyczny LL(k) parser i około 2x szybszy niż Rats!'s PEG. W oddzielnym teście, wyszło że ten ALL(\*) wyprzedza Rats! Na jego własnej gramatyce PEG konwertowanej na składnięANTLR (8.77s vs 12.16s). Parser LALR(1) nie wykonywał dobrze przeciw narzędziom LL ale on mógłby być SableCC's implementacją a nie niedociągnięcie LALR(1). (Gramatyka Java z JavaCUP, inny narzędzie LALR(1), było niekompletne i nie mogło parsować korpusu.) Kiedy reparsowaliśmy korpus, ALL(\*) lookahead z powodu trafię cache jest szybsze 3.73s. Kiedy reparsowaliśmy z konstrukcją drzewa (czas nie pokazany), ALL(\*) pokonał ręcznie budowane Javac (4.4s kontra 4.73s). Prędkość ponownego parsowania jest kwestią dla narzędzi takich jak środowisko deweloperskie.

Parsery GLR które testowaliśmy są nawet o dwa rzędy wielkości wolniejsze w parsowaniu Javy niż

Tool	Time	RAM(M)
<i>Javac</i> <sup>t</sup>	89 ms	7
ANTLR4	201 ms	8
JavaCC	206 ms	7
<i>ANTLR4</i> <sup>t</sup>	360 ms	8
ANTLR3	1048 ms	143
<i>SableCC</i> <sup>t</sup>	1'174 ms	201
<i>Rats!</i> <sup>t</sup>	1'365 ms	22
<i>JSGLR</i> <sup>t</sup>	15.4 sec	1'030
<i>Rascal</i> <sup>t</sup>	24.9 sec	2'622
(no DFA) ANTLR4	42.5 sec	27
<i>elkhound</i> <sup>a</sup>	3.35 min	3
<i>DParser</i> <sup>t</sup>	10.5 hours	100+
<i>elkhound</i> <sup>t</sup>	out of mem	5390+

Rysunek 10: Czas i pamięć użyta do parsowania i opcjonalnego budowania drzew dla 3.2M pliku Java. Rozmiar pamięci jest medianą podawaną po GC podczas parsowania używając -XX:+PrintGC opcji (dla C++ process monitoring). Czasy obejmują lexing; all input preloaded. <sup>t</sup> Budowanie drzew; <sup>a</sup> Niejednoznaczność podczas parsowania, bez drzew

ALL(\*). Z narzędzi GLR, Elkhound ma najlepszą wydajność ponieważ polega on na liniowym stosie LR(1) zamiast GSS gdzie możliwe. Dalej, pozwoliliśmy Elkhound pozbyć się niejednoznaczności podczas parsowania jak ALL(\*). Elkhound używa oddzielnego lexera, w odróżnieniu od JSGLR i DParser, które nie mają skanera. Możliwe wyjaśnienie dla obserwowanej różnicy wydajności z ALL(\*) jest że gramatykę Java przenieśliśmy do Elkhound i Dparser jest stronniczy w kierunku ALL(\*), ale ten zarzut nie jest zasadny. GLR powinien także korzystać z wysoko deterministycznej i jednoznacznej gramatyki. GLL było najwolniejsze w tym teście może dlatego że zespół Rascala przeniósł SDF GLR gramatykę Java,

a Ujednoznacznienie poprzez parsowanie, bez drzew, szacowany czas. Który jest nie optymalizowany dla GLL (wariacje gramatyki mają wpływ na wydajność.) Rascal jest również bez skanera i jest obecnie jedynym dostępnym narzędziem GLL.

Największym problemem z generalnymi algorytmami jest to że one są wysoko nieprzewidywalne jeśli chodzi o czas i pamięć, które mogą czynić je nieodpowiednie dla niektórych komercyjnych aplikacji. Obrazek 10 podsumowuje wydajność tych samych narzędzi z pojedynczym plikiem Java 3.2M. Elkhound wzięte 7.65s do parsowania 123M Java korpus, ale wzięte 3.35 minuty do parsowania pliku Java 3.2M. Spowodował on błąd (out of memory) z konstrukcją lasu parsowania. Czas DParsera skoczył z czasu korpusu 98s do 10.5 godzin. na pliku 3.2M file. Prędkość Rascala JSGLR skalowały się miarę dobrze do 3.2M pliku, ale użyły 2.6G and 1G RAM, odpowiednio. W przeciwieństwie, ALL(\*) parsował plik 3.2M w 360ms z konstrukcją drzewa używając 8M. ANTLR 3 jest szybki ale jest wolniejszy i używa więcej pamięci (z powodu wstecznego pamiętania) niż ANTLR 4.

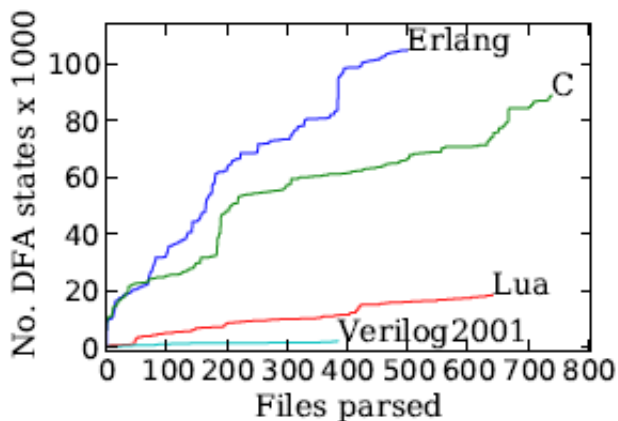
## 7.2 Wydajność ALL(\*) ze względu na języki

Obrazek 11 podaje wydajność w bajtach na sekundę wszystkich parserów ALL(\*) dla 8 języków włączając w to Javę dla porównania. Ilość plików testowych i rozmiary plików różnią się znacznie (według wejścia które mogliśmy rozsądnie zebrać); mniejsze pliki uzyskują wyższą wariancję czasu parsowania.

- C Pochodzi ze specyfikacji C11; nie ma pośredniej lewej rekursji, zmieniona reguła wrażliwa na stos aby wykonać SLL (zobacz tekst poniżej): 813 preprocesowanych plików, 159.8M źródeł z bazy postgres.
- Verilog2001 Pochodzi z specyfikacji Verilog 2001, usunięta pośrednia lewa rekursja: 385 plików,

Grammar	KB/sec
XML	45'993
Java	24'972
JSON	17'696
DOT	16'152
Lua	5'698
C	4'238
Verilog2001	1'994
Erlang	751

Rysunek 11: Wydajność w KByte/sec. Lexing+parsing; cały wejście załadowane do RAM.



Rysunek 12: Tempo wzrostu DFA vs ilość parsowanych plików. Pliki parsowane w kolejności w jakiej były na dysku.

659k z [3] i internetu.

- JSON Pochodzi ze specyfikacji. 4 pliki, 331k z twittera.
- DOT: Pochodzi ze specyfikacji. 48 plików, 19.5M zebranych z internetu.
- Lua: Pochodzi ze specyfikacji Lua 5.2. 751 plików, 123k z githuba.
- XML Pochodzi ze specyfikacji. 1 plik, 117M z XML benchmark.
- Erlang Pochodzi z gramatyki LALR(1). 500 preprocesowanych plików, 8M.

Niektóre z tych gramatyk mają wydajność rozsądną ale dużo wolniejszy czas parsowania w porównaniu do Javy i XML ale demonstrują że programiści mogą konwertować język specyfikacji do ANTLR meta-składni i dostać działającą gramatykę bez dużej modyfikacji. (W naszym doświadczeniu specyfikacje gramatyki są rzadko dostrajane do szczególnych narzędzi lub strategii parsowania i są często niejednoznaczne.) Później, programiści mogą użyć profilowania ANTLR i diagnostyki do polepszenia wydajności tak jak inne programistyczne zadanie. Dla przykładu, specyfikacja gramatyki C11 jest LL nie SLL z powodu reguły declarationSpecifiers, która zmieniliśmy aby była SLL w naszej gramatyce C (dostając 7x przyspieszenia prędkości).

### 7.3 Oddziaływanie lookahead DFA na wydajność

Lookahead DFA cache jest krytyczne gdy chodzi o wydajność ALL(\*). Aby zademonstrować oddziaływanie cache na prędkość parsowania, zablokowaliśmy DFA i powtórzyliśmy nasze eksperymenty z Javą. Rozważmy czas parsowania 3.73s z Obrazka 9 reparsowania korpusu Javy z czystymi trafieniami w cache.

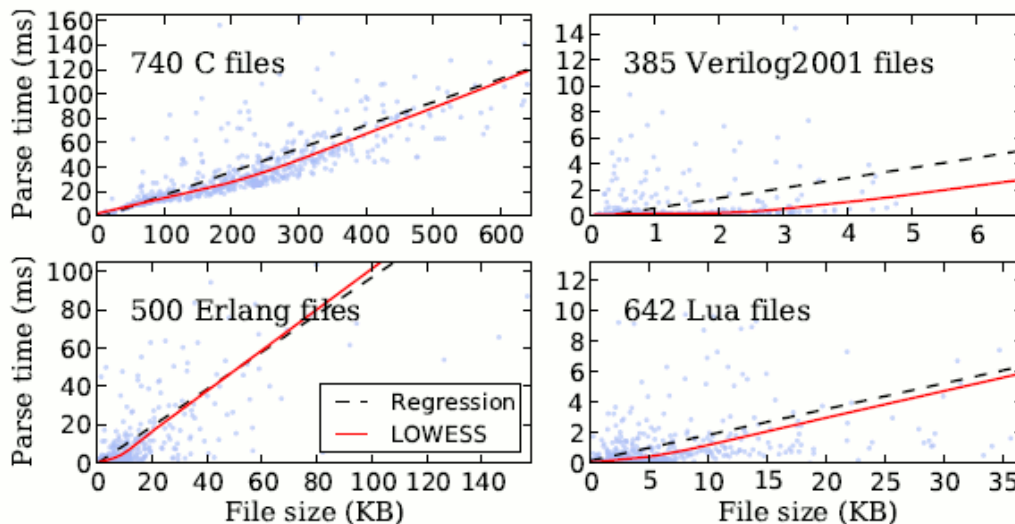


Z zablokowanym zupełnie lookahead DFA cache, parserowi zajmowało to 12 minut (717.6s). Obrazek 10 pokazuje że zablokowanie cache zwiększa czas parsowania z 203ms do 42.5s na 3.2M pliku. Ta wydajność jest zgodna z wysokim kosztem parserów GLL i GLR które również nie redukują spekulacji przez zapamiętywanie decyzji parsera. Jako pośrednia wartość, czyszczenie cache DFA przed parsowaniem każdego pliku korpusu powoduje że całkowity czas wynosi 34s zamiast 12 minut. To izoluje użycie cache do jednego pliku i demonstuje że rozgrzewka cache zdarza się szybko nawet przy pojedynczym pliku.

Wielkość DFA zwiększa się liniowo gdy parser napotyka nowe frazy lookahead. Obrazek 12 pokazuje wzrost ilości stanów DFA jak (najwolniejsze cztery) parsery z Obrazka 11 napotyka nowe pliki. Języki jak C które są skonstruowane z wspólną lewy-prefix wymaga głębokiego lookahead w LL parserach do rozróżnienia fraz; np. struct ... x; i struct ...f(); dzielą wielki lewy-prefiks. W przeciwieństwie Verilog2001 parser używa bardzo mało stanów DFA (ale działa wolniej z powodu reguły nie SLL). Podobnie, po przejrzaniu całego 123M korpusu Java, Java parser używa właśnie 31'626 stanów DFA, dodając średnio ~2.5 stanu na parsowany plik. Wielkość DFA jednak rośnie gdy parser napotyka nieznane wejście. Programiści mogą czyścić cache i ALL(\*) zaadaptuje się do kolejnego wejścia.

## 7.4 Empiryczna złożoność czasowa parsowania

Biorąc pod uwagę szeroki zakres wydajności na Rysunku 11, można by posądzać o nieliniowe zachowanie dla wolniejszych parserów. Aby prześledzić, wykreślimy czas parsowania według wielkości pliku na Rysunku 13 i narysujemy regresję najmniejszych kwadratów i krzywej dopasowania danych LOWESS [6]. Krzywe LOWESS są parametrycznie nieskrępowane (nie wymagane aby były linią lub jakimś szczegól-



Rysunek 13: Liniowy czas pasowania vs wielkość pliku. Regresja liniowa (linia przerywana) i nieskrępowana krzywa LOWESS zbiegają się dając silny dowód liniowości. Krzywe obliczone na (dolne) 99% wielkości plików ale powiększone aby pokazać szczegóły dolnego 40% czasu parsowania.

nym wielomianem) i one wirtualnie odzwierciedlają każdą linię regresji, dostarczając silnego dowodu że relacja pomiędzy czasem parsowania a wielkością wejścia jest liniowa. Ta sama metodologia pokazuje że parser wygenerowany z gramatyki nie-SLL (nie pokazane) wzięty ze specyfikacji C11 jest również liniowy, pomimo że dużo wolniejszy niż nasza wersja SLL.

Powinniśmy jeszcze zobaczyć nieliniowe zachowanie w praktyce ale teoretyczne zachowanie najgorszego przypadku parsowania ALL(\*) jest  $O(n^4)$ . Eksperymentalne dane czasu parsowania dla następującej wymyślonej gramatyki najgorszego przypadku wykazuje zachowanie czwartego stopnia dla wejścia a, aa,

aaa, ...,  $a^n$  ( $n \leq 120$  symboli mogliśmy przetestować w rozsądnym czasie). //  $S \rightarrow A, A \rightarrow aAA|aA|a$ .  
// Generowany parser wymaga predykcji na każdym symbolu wejściowym i każda predykcja musi badać cały pozostały input. Operacja closure wykonana dla każdego symbolu unput musi badać całą głębokość GSS, która może być rozmiaru  $n$ , Ostatecznie, łączenie dwóch GSS może zająć  $O(n)$  w naszej implementacji, dając złożoność  $O(n^4)$ .

Z naszych eksperymentów otrzymaliśmy że przeniesienie analizy gramatyki do czasu parsowania do dania ALL(\*) siły jest nie tylko praktyczne ale daje ekstremalnie wydajne parsery, rywalizujące z ręcznie dostrajanymi rekurencyjnymi parserami kompilatora Javy. Pamiętanie rezultatów analizy w DFA jest krytyczne do takiej wydajności. Mimo teoretycznej złożoności  $O(n^4)$ , w praktyce ALL(\*) zdaje się być liniowe i nie wykazuje nieprzewidzianego zachowania jeśli chodzi o czas lub pamięć jak ogólne algorytmy.

## 8 Powiązane prace

Przez dekady pracowano w kierunku zwiększenia siły rozpoznawania recognition wydajnych ale nie ogólnych parserów LL i LR i zwiększenia wydajności ogólnych algorytmów Earleya  $O(n^3)$  [8]. Parr [21] i Charles [4] statystycznie generowane parsery LL(k) i LR(k) dla  $k > 1$ . Parr i Fisher's LL(\*) [20] i Bermudez i Schimpf's LAR(m) [2] statystycznie liczone parsery LL i LR wzbogacone o cykliczny DFA który mógł badać dowolną ilość podglądanych symboli. Te parsery bazowały na parserach LL-regular [12] i LR-regular [7] które miały niepożądaną właściwość bycia nierozstrzygalnym w ogólności. Wprowadzenia algorytmu z nawrotami(backtrackingu) dramatycznie zwiększyło się rozpoznawania i uniknięto kwestii nierozstrzygalności statycznej analizy gramatyki ale jest niepożądane ponieważ osadzone mutatory redukowały wydajność i komplikowały debugowanie krok po kroku. parsery Packrat (PEGs) [9] próbowały decyzji produkcji w kolejności I wybierały pierwszą która dawała sukces. PEG są  $O(n)$  ponieważ one pamiętają częściowy rezultat parsowania ale cierpią na aberrację  $a|ab$  gdzie  $ab$  jest milcząco niebrane pod uwagę.

Aby zwiększyć ogólną wydajność parsowania, Tomita [26] wprowadził GLR, ogólny algorytm bazujący na LR(k) który konceptualnie forkuje subparsery dla każdego stanu LR(k) z konfliktem w czasie parsowania to badania wszystkich możliwych ścieżek. Tomita pokazuje że GLR jest 5x-10x szybszy niż Earley. Kluczowy komponent parsowania GLR jest graph-structured stack (GSS) [26] który zapobiega parsowaniu tego samego wejścia dwukrotnie w ten sam sposób. (GLR wkłada symbole wejściowe i stany LR na GSS podczas gdy ALL(\*) wkłada stany ATN) Elkhound [18] wprowadził hybrydowe parsery GLR które używają pojedynczy stos dla wszystkich decyzji LR(1) a GSS kiedy niezbędne jest dopasowanie niejednoznacznych porcji wejścia. (Zobaczyliśmy że parsery Elkhounda są szybsze niż inne GLR.) GLL [25] jest analogiem LL parserów GLR i również używa subparserów i GSS do badania wszystkich możliwych ścieżek; GLL używa lookahead  $k = 1$  gdzie można dla wydajności. GLL jest  $O(n^3)$  a GLR jest  $O(np+1)$  gdzie  $p$  jest długością najdłuższej produkcji gramatyczne.

Parsery Earleya skalują się dobrze od  $O(n)$  dla deterministycznych gramatyk do  $O(n^3)$  dla niejednoznacznych gramatyk ale wydajność nie jest dość dobra w ogólnym użyciu. LR(k) maszyny stanów mogą polepszyć wydajność takich parserów przez statystyczne obliczanie tak dużo jak to możliwe. LRE [16] jest jednym takim przypadkiem. Mimo tych optyimizacji ogólne algorytmy pozostają bardzo wolne w porównaniu do deterministycznych parserów wzbogaconych o głęboki podgląd symboli.

Problem z dowolną liczbą podglądanych symboli jest taki że jest niemożliwe wyliczyć statystycznie dla wielu użytecznych gramatyk (warunek LLregular jest nierozstrzygalny.) Przez przeniesienie analizy podglądanych symboli do czasu analizy ALL(\*) zdobył siłę do obsługi jakiegokolwiek gramatyki bez lewostronnej rekurencji ponieważ może uruchomić subparsery do określenia jaka ścieżka prowadzi do poprawnego parsowania. Inaczej niż GLR, spekulacja zatrzymuje się kiedy wszystkie pozostałe subparsery

są powiązane z pojedynczą alternatywą a produkcji, tak więc wyliczając minimalną sekwencję podglądanych symboli.. Aby zyskać wydajność, ALL(\*) zapamiętuje mapowanie z tej sekwencji lookahead to przewidzianej produkcji używając DFA dla użycia przez kolejne decyzje. Podzbiory języka bezkontekstowego napotymane podczas parsowania są skończone i dlatego języki ALL(\*) lookahead są regularne. Ancona et al [1] również wykonują analizę czasu parsowania ale oni jedynie obliczają stały lookahead LR(k) i nie adaptują do faktycznego wejścia jak to robi ALL(\*). Perlin [23] działa na RTN jak ALL(\*) ale oblicza lookahead  $k = 1$  podczas parsowania.

ALL(\*) jest podobne do Earley w tym że obydwie są top-down i operują na reprezentacji gramatyki w czasie parsowania ale Earley parsuje nie licząc lookahead DFA. W tym sensie, Earley nie wykonuje analizy gramatycznej, Earley również nie zarządza jawnie GSS podczas parsowania. Zamiast tego element w stanach Earleya mają “wskaźniki rodzica” które odnoszą się do innych stanów kiedy są w wątku razem Operacja SCANNER Earleya koresponduje do funkcji ALL(\*) move. Operacje PREDICTOR i COMPLETER korespondują do push i pop in funkcji closure ALL(\*) Stan Earleya jest zbiorem wszystkich konfiguracji parsera osiągalnych w pewnej absolutnej głębokości wejścia podczas gdy stan DFA ALL(\*) jest zbiorem konfiguracji osiągalnych z głębokości podglądu relatywnej do bieżącej decyzji Inaczej niż w kompletnie ogólnych algorytmach, ALL(\*) wyszukuje pojedyncze parsowanie wejścia, które pozwala użyć wydajnego stosu LL podczas parsowania.

Strategie parsowania które ciągle spekulują lub wspomagają niejednoznaczność mają trudności z mutatorami ponieważ ciężko wtedy o cofnięcie działania. Brak mutatorów redukuje ogólność semantycznych predykatów które zmieniają parsowanie ponieważ nie można testować dowolnie stanu obliczonego wcześniej podczas parsowania. Rats! [10] wspomaga ściśle semantyczne predykaty a Yakker [13] wspomaga semantyczne predykaty które są funkcjami poprzednio parsowanych symboli terminalnych. Ponieważ ALL(\*) nie spekuluje podczas faktycznego parsowania, wspomaga dowolne mutatory i semantyczne predykaty.. Miejsce wyklucza bardziej szczegółowe dyskusje o powiązanych pracach; bardziej szczegółowa analiza może być znaleziona w [20].

## Literatura

- [1] ANCONA, M., DODERO, G., GIANUZZI, V., AND MORGAVI, M. Efficient construction of LR(k) states and tables. *ACM Trans. Program. Lang. Syst.* 13, 1 (Jan. 1991), 150–178
- [2] BERMUDEZ, M. E., AND SCHIMPF, K. M. Practical arbitrary lookahead LR parsing. *Journal of Computer and System Sciences* 41, 2 (1990).
- [3] BROWN, S., AND VRANESIC, Z. *Fundamentals of Digital Logic with Verilog Design*. McGraw-Hill series in ECE. 2003.
- [4] CHARLES, P. *A Practical Method for Constructing Efficient LALR(k) Parsers with Automatic Error Recovery*. PhD thesis, New York University, New York, NY, USA, 1991.
- [5] CLARKE, K. *The top-down parsing of expressions*. Unpublished technical report, Dept. of Computer Science and Statistics, Queen Mary College, London, June 1986.
- [6] CLEVELAND, W. S. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association* 74 (1979), 829–836.
- [7] COHEN, R., AND CULIK, K. LR-Regular grammars—an extension of LR(k) grammars. In *SWAT '71* (Washington, DC, USA, 1971), IEEE Computer Society, pp. 153–165.

- [8] EARLEY, J. An efficient context-free parsing algorithm. *Communications of the ACM* 13, 2 (1970), 94–102.
- [9] FORD, B. Parsing Expression Grammars: A recognition-based syntactic foundation. In *POPL* (2004), ACM Press, pp. 111–122.
- [10] GRIMM, R. Better extensibility through modular syntax. In *PLDI* (2006), ACM Press, pp. 38–51.
- [11] HOPCROFT, J., AND ULLMAN, J. *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1979.
- [12] JARZABEK, S., AND KRAWCZYK, T. LL-Regular grammars. *Information Processing Letters* 4, 2 (1975), 31 – 37.
- [13] JIM, T., MANDELBAUM, Y., AND WALKER, D. Semantics and algorithms for data-dependent grammars. In *POPL* (2010).
- [14] JOHNSON, M. The computational complexity of GLR parsing. In *Generalized LR Parsing*, M. Tomita, Ed. Kluwer, Boston, 1991, pp. 35–42.
- [15] KIPPS, J. *Generalized LR Parsing*. Springer, 1991, pp. 43–59.
- [16] MCLEAN, P., AND HORSPOOL, R. N. A faster Earley parser. In *CC* (1996), Springer, pp. 281–293.
- [17] MCPEAK, S. *Elkhound: A fast, practical GLR parser generator*. Tech. rep., University of California, Berkeley (EECS), Dec. 2002.
- [18] MCPEAK, S., AND NECULA, G. C. *Elkhound: A fast, practical GLR parser generator*. In *CC* (2004), pp. 73–88.
- [19] MCPEAK, S., AND NECULA, G. C. *Elkhound: A fast, practical GLR parser generator*. In *CC* (2004), pp. 73–88.
- [20] PARR, T., AND FISHER, K. LL(\*): The Foundation of the ANTLR Parser Generator. In *PLDI* (2011), pp. 425–436.
- [21] PARR, T. J. *Obtaining practical variants of LL(k) and LR(k) for  $k > 1$  by splitting the atomic k-tuple*. PhD thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 1993.
- [22] PARR, T. J., AND QUONG, R. W. Adding Semantic and Syntactic Predicates to LL(k)—pred-LL(k). In *CC* (1994).
- [23] PERLIN, M. LR recursive transition networks for Earley and Tomita parsing. In *Proceedings of the 29th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics (1991)*, *ACL '91*, pp. 98–105.
- [24] PLEVYAK, J. *DParser: GLR parser generator*, Visited Oct. 2013.
- [25] SCOTT, E., AND JOHNSTONE, A. GLL parsing. *Electron. Notes Theor. Comput. Sci.* 253, 7 (Sept. 2010), 177–189.
- [26] TOMITA, M. *Efficient Parsing for Natural Language*. Kluwer Academic Publishers, 1986.
- [27] WOODS, W. A. Transition network grammars for natural language analysis. *Comm. of the ACM* 13, 10 (1970), 591–606.

## A Analiza poprawności i złożoności

**Twierdzenie A.1.** Języki  $ALL(*)$  są zamknięte w unii.

Dowód. Niech predykowalne gramatyki  $G_1 = (N_1, T, P_1, S_1, \Pi_1, \mathcal{M}_1)$  i  $G_2 = (N_2, T, P_2, S_2, \Pi_2, \mathcal{M}_2)$  opisują odpowiednio  $L(G_1)$  i  $L(G_2)$ . Dla stosowalności zarówno do parserów jak i parserów bezskanerowych przyjmijmy że przestrzeń terminali  $T$  jest zbiorem poprawnych znaków. Przyjmijmy że  $N_1 \cap N_2 = \emptyset$  przez przezwanie nieterminali w razie potrzeby. Przyjmijmy że predykaty i mutatory  $G_1$  i  $G_2$  działają w rozłącznych środowiskach  $S_1$  and  $S_2$ . Konstruujemy:

$$G' = (N_1 \cup N_2, T, P_1 \cup P_2, S', \Pi_1 \cup \Pi_2, \mathcal{M}_1 \cup \mathcal{M}_2)$$

z  $S' = S_1 | S_2$ . Wtedy  $L(G') = L(G_1) \cup L(G_2)$ .

**Lemat A.1.** Parser  $ALL(*)$  dla nie lewostronnie rekurencyjnej  $G$  z deaktywowanym lookahead DFA rozpoznaje zdanie wtedy i tylko wtedy gdy  $w \in L(G)$ .

Dowód. ATN dla  $G$  rozpoznaje  $w$  wtedy i tylko wtedy gdy  $w \in L(G)$ . Dlatego możemy równoważnie dowieść że  $ALL(*)$  jest wierną implementacją ATN. Bez lookahead DFA predykcja jest prostą symulacją ATN: zstępujący parser który podejmuje dokładne decyzje parsowania używając GLR-podobnych podparserów które mogą badać cały pozostały input i wołanie stosu podmaszyn ATN.

**Twierdzenie A.2.** (Poprawność). Parser  $ALL(*)$  dla nie lewostronnie rekurencyjnej  $G$  rozpoznaje zdanie  $w$  wtedy i tylko wtedy gdy  $w \in L(G)$ .

Dowód. Lemat A.1 pokazuje że parser  $ALL(*)$  poprawnie rozpoznaje  $w$  bez cache DFA. Istotą dowodu następnie jest pokazać że adaptacyjny lookahead  $ALL(*)$  DFA nie psuje parsowania dając inną decyzję predykcji niż prosta symulacja ATN. Potrzebujemy jedynie rozważyć przypadek nieprzewidywanego parsingu SLL jak  $ALL(*)$  jedynie tylko buforuje w cache rezultaty decyzji w tym przypadku.

przypadek "wtedy": Przez indukcję na stanie lookahead DFA dla dowolnie danej decyzji  $A$ . Przypadek podstawowy. Pierwsza predykcja dla  $A$  zaczyna się pustym DFA i musi aktywować symulację ATN do wybrania alternatywy  $\alpha_i$  używając prefisku  $u \preceq w_r$ . Skoro symulacja ATN daje właściwe przewidywania, parser  $ALL(*)$  poprawnie przewiduje  $\alpha_i$  na starcie i następnie zapisuje mapowanie  $u : i$  w DFA. Jeśli jest tam pojedyncza wykonalna alternatywa,  $i$  jest związanym z nią numerem produkcji. Jeśli symulacja znajduje ATN wiele wykonalnych alternatyw,  $i$  jest minimalnym numerem produkcji związanych z alternatywami z tego zbioru.

Krok indukcji. Przyjmijmy że lookahead DFA poprawnie przewiduje produkcje dla każdego prefiksu  $u$  z  $w_r$  widzanego przez parser w A. Muismy pokazać że startując z istniejącego DFA,  $ALL(*)$  właściwie doda ścieżkę przez DFA dla nieznanego prefiksu  $u$  z  $w'_r$ . Mamy kilka przypadków:

1.  $u \preceq w'_r$  i  $u \preceq w_r$  dla poprzedniego  $w_r$ . Lookahead DFA daje poprawną odpowiedź dla  $u$  przez założenie indukcyjne. DFA jest nie uaktualniane.
2.  $w'_r = bx$  i wszystkie poprzednie  $w_r = ay$  dla pewnego  $a \neq b$ . Ten przypadek redukuje się do podstawowego przypadku zimnego startu ponieważ nie mam tam krawędzi  $D_0 \xrightarrow{b} D$ . Symulacja ATN przewiduje  $\alpha_i$  i ododaje ścieżkę dla  $u \preceq w'_r$  z  $D_0 \text{dof}_i$ .
3.  $w'_r = vax$  i  $w_r = vby$  dla pewnego poprzednio widzianego  $w_r$  ze wspólnym prefiksem  $v$  i  $a \neq b$ . Symulacja DFA osiągnie  $D$  z  $D_0$  dla wejścia  $v$ .  $D$  ma krawędź dla  $b$  ale nie  $a$ . Symulacja ATN

przewidzi  $\alpha_i$  i wzbogaci DFA, startując z krawędzi na  $a$  z  $D$  prowadząc ostatecznie do  $f_i$ .

przypadek "tylko wtedy": Parser ALL(\*) zgłasza błąd składni dla  $w \notin L(G)$ . Przyjmijmy odwrotnie, że parser z sukcesem parsuje  $w$ . To pociąga za sobą że istnieje sekwencja wyprowadzająca konfigurację ATN  $(\mathbb{S}, p_S, [], w) \rightarrow^* (\mathbb{S}, p'_S, [], \epsilon)$  dla  $w$  przez odpowiadający G ATN. Ale to wymagało by  $w \in L(G)$ , z Definicji ???. Dlatego parser ALL(\*) zgłasza błąd składni dla  $w$ . Dokładność lookahead cache ALL(\*) jest bez znaczenia ponieważ nie ma możliwej ścieżki przez ATN lub parser.

**Lemat A.2.** Zbiór wykonalnych produkcji dla LL jest zawsze podzbiorem wykonalnych produkcji SLL dla danej decyzji A i pozostałego wejściowego ciągu  $w_r$ .

Dowód. Jeśli kluczowa operacja analizy move-closure nie osiągnie stanu stop  $p'_A$  dla podmaszyny A, SLL i LL postępują identycznie i dzielą ten sam zbiór wykonalnych produkcji.

Jeśli closure osiągnie stan stopu dla reguły wejściowej decyzji,  $p'_A$ , tam są konfiguracje w formie  $(p'_A, -, \gamma)$  gdzie, dla wygody, zwykły GSS  $\Gamma$  jest dzielony na pojedyncze stosy,  $\gamma$ . W trybie predykcji LL,  $\gamma = \gamma_0$ , które jest bądź pojedynczym stosem lub pustym jeśli  $A = S$ . W trybie SLL,  $\gamma = \#$ , sygnalizując brak informacji o stosie. Funkcja *closure* musi rozważać wszystkie możliwe  $\gamma_0$  wołania stosu parsera. Ponieważ jakikolwiek pojedynczy stos musi być zawarty w zbiorze wszystkich możliwych wołań stosu, operacje LL closure rozważają co najwyżej tę samą ilość ścieżek przez ATN co SLL.

**Lemat A.3.** Dla  $w \notin L(G)$  i nie lewostronnie rekurencyjnej G, SLL zgłasza błąd składni.

Dowód. Podobnie jak w przypadku "tylko wtedy" Twierdzenia 6.1, nie ma poprawnego wyprowadzenia konfiguracji ATN dla  $w$  bez względu jak adaptivePredict wybierze produkcje.

**Twierdzenie A.3.** Dwustopniowe parsowanie dla nie lewostronnie rekurencyjnej G rozpozna zdanie  $w$  wtedy i tylko wtedy gdy  $w \in L(G)$ .

Dowód. Z Lematu A.3, SLL i LL zachowują się tak samo kiedy  $w \notin L(G)$ . Pozostaje pokazać że predykcja SLL bądź zachowuje się jak LL dla wejścia  $w \in L(G)$  lub zgłasza błąd składni, sygnalizując potrzebę drugiej fazy LL. Niech  $\mathcal{V}$  i  $\mathcal{V}'$  będą zbiorami numerów wykonalnych produkcji dla A odpowiednio używając SLL i LL, Z Lematu A.2,  $\mathcal{V}' \subseteq \mathcal{V}$ . Są dwa przypadki do rozważenia:

1. If  $\min(\mathcal{V}) = \min(\mathcal{V}')$ , SLL i LL wybierają tę samą produkcję. SLL powiedzie się dla  $w$ . To jest,  $\mathcal{V} = \{1, 2, 3\}$  i  $\mathcal{V}' = \{1, 3\}$  or  $\mathcal{V} = \{1\}$  i  $\mathcal{V}' = \{1\}$ .
2. If  $\min(\mathcal{V}) \neq \min(\mathcal{V}')$  wtedy  $\min(\mathcal{V}) \notin \mathcal{V}$  ponieważ LL znajduje że  $\min(\mathcal{V})$  jest niewykonalna. SLL powinien zgłosić błąd składni. To jest,  $\mathcal{V} = \{1, 2, 3\}$  i  $\mathcal{V}' = \{2, 3\}$  lub  $\mathcal{V} = \{1, 2\}$  i  $\mathcal{V}' = \{2\}$ .

We wszystkich możliwych kombinacjach  $\mathcal{V}$  i  $\mathcal{V}'$ , SLL zachowuje się jak LL lub zgłasza błąd syntaktyczny dla  $w \in L(G)$ .

**Twierdzenie A.4.** GSS ma  $O(n)$  węzłów dla  $n$  wejściowych symboli. Dowód. Dla nieterminali N i stanów Q ATN jest  $|N| \times |Q|$  przejść ATN jeśli każda pozycja gramatyczna wywoła każdy nieterminal. To limituje ilość nowych węzłów GSS do  $|Q|^2$  dla operacji closure (która nie może przejść krawędzi terminalowych). ALL(\*) wykonują  $n + 1$  operacji closure dla  $n$  symboli wejściowych dając  $|Q|^2(n + 1)$  węzłów lub  $O(n)$  skoro Q nie jest funkcją wejścia.

**Lemat A.4.** Złożoność czasowa badania symbolu lookahead wynosi  $O(n^2)$ .

Dowód. Lookahead jest operacją move-closure która wylicza nowy docelowy stan DFA  $D'$  jako funkcję konfiguracji ATN w  $D$ . Jest  $|Q| \times m \approx |Q|^2$  konfiguracji postaci  $(p, i, \_)$   $\in D$  dla  $|Q|$  stanów ATN i  $m$  alternatywnych produkcji w bieżącej decyzji. Koszt move nie jest funkcją rozmiaru  $n$  wejścia. Closure  $D$  oblicza  $\text{closure}(c) \forall c \in D$  and  $\text{closure}(c)$  może przejść spowrotem całe GSS do korzenia (pustego stosu). To daje koszt  $|Q|^2$  konfiguracji razy  $|Q|2(n+1)$  węzły GSS (z Twierdzenia A.4) lub  $O(n)$  operacji dodawania by zbudować  $D'$ . Dodawanie konfiguracji jest dominujące przez łączenie grafu, które (w naszej implementacji) jest proporcjonalne do głębokości grafu. Całkowity koszt move-closure jest  $O(n^2)$ .

**Twierdzenie A.5.** Parsowanie  $\text{ALL}^*$   $n$  wejściowych symboli zajmuje  $O(n^4)$  czasu.

Dowód. W najgorszym przypadku parser musi badać wszystkie pozostałe symbole wejściowe podczas predykcji dla każdego z  $n$  wejściowych symboli dając  $O(n^2)$  operacji lookahead. Koszt każdej operacji lookahead jest  $O(n^2)$  z Lematu A.4 dając ogólny koszt parsowania  $O(n^4)$ .

## B Pragmatyka

Ta część opisuje pewne praktyczne rozważania związane z implementacją algorytmu  $\text{ALL}^*$ .

### B.1 Redukowanie czasu rozgrzewki

Dużo decyzji w gramatyce jest  $\text{LL}(1)$  i one są łatwe do identyfikacji statycznie. Zamiast zawsze generować "przełącz się na adaptivePredict" decyzje w rekurencyjnych zstępujących parserach, ANTLR generuje decyzje "przełącz się na typ tokenu" gdziekolwiek jest możliwe. Ta optymalizacja  $\text{LL}(1)$  nie wpływa na wielkość generowanego parsera ale redukuje ilość lookahead DFA które parser musi wyliczyć.

Oryginalnie przeczuliśmy "trenowanie" parsera na wielkim korpusie wejściowym a następnie zapisanie lookahead DFA na dysk aby uniknąć jeszcze raz obliczania DFA dla kolejnych przebiegów parsera. Jak pokazane w części 7, konstrukcja lookahead DFA jest wystarczająco szybka tak że zapisanie i odczyt DFA jest zbyteczny.

### B.2 Wyliczenie semantycznych predykatów

Dla jasności, algorytm opisany w tym artykule używa czystej symulacji ATN dla wszystkich decyzji które mają that semantyczne predykaty na lewym krawędziach produkcji W praktyce ANTLR używa lookahead DFA które śledzą predykaty i akceptują stany do obsługi semantycznej zależnej od kontekstu predykcji. Śledzenie predykatów w DFA pozwala predykcjom uniknąć drogiej symulacji ATN jeśli wyliczenie predykatu w ciągu symulacji SLL przewidzi unikalną produkcję. Semantyczne predykaty nie są powszechne ale są krytyczne do rozwiązywania pewnych zależnych od kontekstu problemów parsowania, to jest, predykaty są używane wewnętrznie przez ANTLR do kodowania priorytetu operatorów przy przepisywaniu lewostronnie rekurencyjnych reguł. Tak że to jest warte dodatkowej złożoności do obliczenia predykatów podczas predykcji SLL. Rozważmy repdykowaną regułę z Części 2.1:

```
id : ID | {!enum_is_keyword}? 'enum' ;
```

Druga produkcja jest wykonalna tylko kiedy `!enum_is_keyword` jest wycizony do true. W skrócie to oznacza że parser mógłby potrzebować dwa lookahead DFA, jeden na warunek semantyczny. Zamiast tego implementacja ANTLR  $\text{ALL}^*$  tworzy DFA (przez predykcję SLL) z krawędzią  $D_0 \xrightarrow{\text{enum}} f_2$  gdzie  $f_2$  jest wzbogaconym stanem akceptującym DFA który testuje `!enum_is_keyword`. Funkcja `adaptivePredict` zwraca produkcję 2 na `enum` jeśli `!enum_is_keyword` w przeciwnym razie rzuca wyjątek

no-viable-alternative.

Algorytm opisany w tym artykule również nie obsługuje semantycznych predykatów poza regułą wejścia decyzji. W praktyce analiza ALL(\*) musi wyliczyć wszystkie predykaty osiągalne z reguły wejścia decyzji bez przestępowania krawędzi terminalu w ATN. Na przykład uproszczony algorytm ALL(\*) w tym artykule rozważa jedynie predykaty  $\pi_1$  i  $\pi_1$  dla produkcji S dla następującej (niejednoznacznej) gramatyki.

- $S \rightarrow \{\pi_1\}? Ab|\{\pi_2\}? Ab$
- $A \rightarrow \{\pi_3\}? a|\{\pi_4\}? a$

Wejście dopasowuje zarówno alternatywę S i w praktyce ANTRL wylicza " $\pi_1$  and ( $\pi_3$  or  $\pi_4$ )" do testowania wykonalności pierwszej produkcji a nie tylko "i A, lookahead DFA dla S byłby  $D_0 \xrightarrow{a} D' \xrightarrow{b} f_{1,2}$  Wzbogacony akceptujący stan  $f_{1,2}$  przewiduje produkcje 1 lub 2 w zależności od semantycznego kontekstu odpowiednio  $\pi_1 \wedge (\pi_3 \vee \pi_4)$  Do trzymania śladu kontekstu semantycznego podczas symulacji SLL, konfiguracje ANTLR ATN zawierają dodatkowy  $\pi$ : (p, i,  $\Gamma$ ,  $\pi$ ). Element  $\pi$  niesie ze sobą kontekst semantyczny i ANTLR pamięta pary predykat-do-produkcji we wzbogaconym stanie akceptującym DFA.

### B.3 Raportowanie i naprawa błędów

Predykcja ALL(\*) może skanować dowolnie daleko naprzód tak że błędna sekwencja lookahead może być długa. Domyślnie parsery generowane przez ANTLR wypisują całą sekwencję. Do naprawy parsery konsumują wszystkie tokeny aż będzie token spełniający bieżącą regułę. ANTLR dostarcza możliwości zmiany strategii raportowania i naprawy.

Parsery ANTLR emitują komunikat błędu dla błędnej frazy wejściowej i próbują naprawić. Dla niezgodnych tokenów ANTLR próbuje wstawiania i usuwania pojedynczych tokenów do synchronizacji. Jeśli pozostałe symbole wejściowe są niezgodne z jakąkolwiek produkcją bieżącego nieterminala, parser konsumuje tokeny aż znajdzie token który rozsądnie nastąpił by po bieżącym nieterminalu. Następnie parser kontnuje parsowanie jakby bieżący nieterminal był prawidłowy. ANTLR naprawił obsługę błędów w porównaniu z ANTLR 3 dla podreguł EBNF przez wstawienie sprawdzania synchronizacji na początek i do "pętli" kontynuacji test by uniknąć przedwczesnego wyjścia z subreguły. Na przykład, rozważmy następującą regułę definicji klasy.

```
classdef : 'class' ID 'f' member+ 'g' ;  
member : 'int' ID ',' ;
```

Dodatkowy średnik w liście member taki jak i; int j; nie powinien zmuszać otaczającą regułę classdef do przerwania. Zamiast tego, parser ignoruje dodatkowy średnik i patrzy na inny member. Aby zredukować kaskadę błędnych komunikatów, parser nie emituje dalszych komunikatów aż poprawnie dopasuje token.

### B.4 Wykonywanie wielowątkowe

Aplikacje często wymagają równoległego wykonania wielu wystąpień parsera, nawet dla tego samego języka. Na przykład, webowe aplikacje serwerowe parsują wiele przychodzących strumieni danych XML lub JSON używając wielu wystąpień tego samego parsera. Dla wydajności pamięci, wszystkie parsery ALL(\*) dla danego języka muszą dzielić lookahead DFA. Kod Java, który generuje ANTLR używa model pamięci dzielonej i wątków dla współbieżności, co oznacza że parsery muszą uaktualniać dzielone DFA w bezpieczny wątkowo sposób. Wiele wątków może symulować DFA podczas gdy inne wątki dodają stany i krawędzie do nich. Naszym celem jest bezpieczeństwo wątkowe, ale wielowątkowość również dostarcza małego przyspieszenia przy konstrukcji DFA (obserwowane empirycznie).

Kluczową sprawą dla bezpieczeństwa wątkowego w Java podczas utrzymywania wysokiej wydajności jest unikanie nadmiernego blokowania (synchronizowane bloki) Są tylko dwie struktury, które wymagają



blokowania:  $Q$  - zbiór stanów DGA oraz  $\Delta$  - zbiór krawędzi. Nasza implementacja rozkłada dodawanie stanów  $Q \Rightarrow D'$  na funkcję `addDFASState` która czeka na blokowaniu na  $Q$  przed testowaniem stanu DFA na członkostwo lub dodaje stan, TO nie jest wąskie gardło ponieważ symulacja DFA może wykonywać się podczas konstrukcji DFA bez blokowania ponieważ ona przechodzi krawędzi do wizytacji istniejących stanów DFA bez badania  $Q$ .

Dodając krawędzi DFA do istniejącego stanu wymaga drobnoziarnistego blokowania, ale wyłącznie na takim specyficznym stanie DFA jak nasza implementacja utrzymuje tablicę krawędzi dla każdego stanu DFA, Pozwalamy na wielu czytających ale pojedynczego piszącego. Blokowanie przy testowaniu krawędzi jest niekonieczne nawet jeśli inny wątek ściga się ustawić tę krawędź. Jeśli krawędź  $D \xrightarrow{a} D'$  istnieje, symulacja po prostu przechodzi do  $D'$ . Jeśli symulacja nie znajduje istniejącej krawędzi, woła symulację ATN statując od  $D$  do obliczenia  $D'$  i wtedy ustawia element `edge[a]` dla  $D$ . Dwa wątki mogą znaleźć brakującą krawędź na  $a$  i obie wołać symulację ATN, ściągając się z dodaniem  $D \xrightarrow{a} D'$ .  $D'$  byłoby teakie samo w obu przypadkach tak że tam nie ma hazardu tak długo jak specyficzna tablica krawędzi jest uaktualniana bezpiecznie z użyciem synchronizacji. Do napotkania spornego locka dwa lub więcej wątków symulacji ATN musi próbować dodać krawędź do tego samego stanu DFA.

## C Eliminacja lewostronnej rekurencji

ANTLR wspiera bezpośrednio lewostronnie rekurencyjne reguły przez przepisanie ich na nie-lewostronnie rekurencyjną wersję która również usuwa niejednoznaczność. Na przykład, naturalna gramatyka do opisu składni wyrażeń arytmetycznych jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych (niejednoznacznych) lewostronnie rekurencyjnych reguł. Następująca gramatyka obsługuje proste wyrażenia modulo i dodawanie.

$$E \rightarrow E\%E|E + E|id$$

$E$  jest bezpośrednio lewostronnie rekurencyjna ponieważ co najmniej jedna produkcja zaczyna się od  $E$  ( $\exists E \Rightarrow E\alpha$ ), co jest problemem dla zstępujących parserów.

Gramatyki znaczące dla zstępujących parserów muszą użyć kłopotliwego nie lewostronnie rekurencyjnego odpowiednika mającego oddzielny nieterminal dla każdego poziomu priorytetu operatora:

- $E' \rightarrow M(+M)^*$  Dodawanie, niski priorytet
- $M \rightarrow P(\%P)^*$  Modulo, wyższy priorytet
- $P \rightarrow id$  Primary (id oznacza identyfikator)

Im głębsze jest wywołanie reguły, tym wyższy priorytet. Podczas czasu parsowania dopasowanie pojedynczego identyfikatora wymaga wywołania jednej reguły dla jednego poziomu priorytetu.

$E$  jest łatwiejsze do czytania niż  $E'$ , ale lewostronnie rekurencyjna wersja jest niejednoznaczna ponieważ są dwie interpretacje wejścia  $a+b+c$ :  $(a+b)+c$  i  $a+(b+c)$ . Generatory parserów wstępujących takie jak bison używają specyfikatorów priorytetu operatorów (e.g., `%left '%'`) do rozwiązania takiej niejednoznaczności. Nie lewostronnie rekurencyjna gramatyka  $E'$  jest jednoznaczna ponieważ niejawnie koduje reguły priorytetu według głębokości zagnieżdżenia nieterminalu.

Idealnie, parser powinien wspomagać lewostronną rekurencję i dostarczać sposobu do rozwiązania niejednoznaczności niejawnie przez samą gramatykę bez uciekania się do zewnętrznych specyfikatorów priorytetu. ANTLR robi to przez przepisanie nieterminali z bezpośrednią lewostronną rekurencją i wstawienie semantycznych predykatów by rozwiązać niejednoznaczność zgodnie z porządkiem produkcji. Proces przepisywania prowadzi do generowanych parserów które imitują technikę Clarke'a [5].

Wybraliśmy do eliminacji tylko bezpośrednią lewostronną rekurencję ponieważ ogólna eliminacja lewostronnej rekurencji może skutkować transformowanymi gramatykami o rząd wielkości większymi niż

oryginalna [11] i dostarczać drzewa parsowania jedynie luźno powiązane do tych z oryginalnej gramatyki. ANTLR automatycznie konstruuje drzewa parsowania zgodne z oryginalną lewostronnie rekurencyjną gramatyką tak że programista jest nie powiadomiony o wewnętrznej restrukturyzacji. Lewostronna rekurencja również pokrywa większość powszechnych gramatycznych przypadków (z długiego doświadczenia budowania gramatyki). Ta dyskusja skupia się na gramatykach dla wyrażeń arytmetycznych ale reguły transformacji działają równie dobrze dla innych lewostronnie rekurencyjnych konstrukcji takich jak deklaracje C:  $D \rightarrow *D, D \rightarrow D[], D \rightarrow D(), D \rightarrow id$

Eliminacja bezpośredniej lewostronnej rekurencji bez koncentrowania się na niejednoznaczności jest prosta [11]. Niech  $A \rightarrow \alpha_j$  dla  $j = 1..s$  będzie nie lewostronnie rekurencyjnymi produkcjami  $A \rightarrow A\beta_k$  dla  $k = 1..r$  będzie bezpośrednimi lewostronnymi produkcjami gdzie  $\alpha_j, \beta_k \neq^* \epsilon$ . Zastąpimy te produkcje przez:

- $A \rightarrow \alpha_1 A' | \dots | \alpha_s A'$
- $A' \rightarrow \beta_1 A' | \dots | \beta_r A' | \epsilon$

Łatwiej jest zobaczyć transformację używając EBNF:

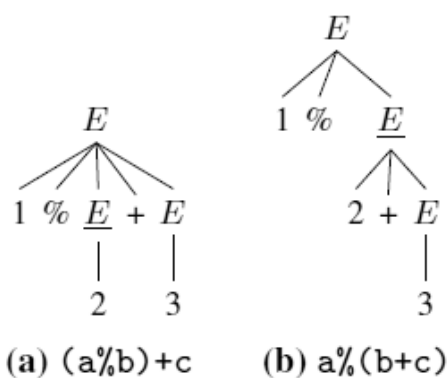
- $A \rightarrow A' A''^*$
- $A' \rightarrow \alpha_1 | \dots | \alpha_s$
- $A'' \rightarrow \beta_1 | \dots | \beta_r$

albo właśnie  $A \rightarrow (\alpha_1 | \dots | \alpha_s)(\beta_1 | \dots | \beta_r)^*$  Na przykład lewostronnie rekurencyjna reguła E staje się:

$$E \rightarrow id(\%E|+E)^*$$

Ta nie lewostronnie rekurencyjna wersja pozostaje niejednoznaczna ponieważ są dwa wyprowadzenia dla  $a+b+c$ . Domyślnie polityka rozwiązywania niejednoznaczności wybiera do dopasowania tak dużo symboli wejściowych jak to jest możliwe dając interpretację  $(a+b)+c$ .

Różnica w łączności nie ma znaczenia w wyrażeniach używających pojedynczego operatora ale wyrażenia z mieszaniną operatorów muszą łączyć operandy i operatory zgodnie z priorytetem operatorów, Na przykład, parser musi rozpoznawać  $a\%b+c$  jako  $(a\%b)+c$  a nie  $a\%(b+c)$ . Dwie interpretacje są pokazane na Rysunku 14.



Rysunek 14: Drzewa parsowania dla  $a\%b+c$  i  $E \rightarrow (\%E|+E)^*$

Aby wybrać właściwą interpretację, generowany parser musi porównać priorytet poprzedniego operatora do priorytetu bieżącego operatora w  $(\%E|+E)^*$  w "pętli." Na Rysunku 14, underscoreE jest krytyczną ekspansją E. Musi jedynie dopasować id i od razu powrócić, pozwalając wołanemu E dopasować + do formy drzewa parsowania (a) lub odwrotnie (b).

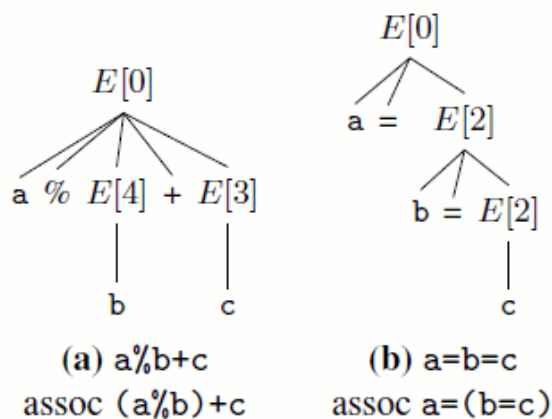
Aby obsługiwać takie porównania, produkcje dostają numer priorytetu, który jest przeciwieństwem numeru produkcji. Priorytet  $i$ -tej produkcji jest  $n-i+1$  dla  $n$  oryginalnych produkcji  $E$ . To przypisuje priorytet 3 do  $E \rightarrow E\%E$ , priorytet 2 do  $E \rightarrow E + E$  i priorytet 1 do  $E \rightarrow id$ .

Następnie każde zagnieżdżone wywołanie  $E$  potrzebuje informacji o priorytecie operatora zwołanego  $E$ . Najprostszym mechanizmem jest włożenie parametru priorytetu  $pr$  do  $E$ : *Rozwinięcie  $E[pr]$  może dopasować jedynie te podwyrażenia których priorytet odpowiada albo przekracza  $pr$ .*

By zmusić do tego, procedura eliminacji lewostronnej rekurencji wstawia predykaty do pętli  $(\% E | + E)^*$ . Tutaj jest transformowana jednoznaczna i nie lewostronnie rekurencyjna reguła:

$$E[pr] \rightarrow id(\{3 \geq pr\}?\%E[4]|\{2 \geq pr\}? + E[3])^*$$

Odniesienia do  $E$  wszędzie w gramatyce stają się  $E[0]$ : czyli  $S \rightarrow E$  staje się  $S \rightarrow E[0]$ . Wejście  $a\%b+c$  daje drzewo parsowania dla  $E[0]$  pokazane na (a) obrazka 15.



Rysunek 15: Drzewa Rozwinięcia Nieterminali dla nieterminalu  $E[pr] \rightarrow id(\{3 \geq pr\}?\%E[4]|\{2 \geq pr\}? + E[3])^*$

Produkcja “ $\{3 \geq pr\}?\%E[4]$ ” jest wykonalna kiedy priorytet operacji modulo 3, odpowiada lub przekracza parametr  $pr$ . Pierwsze wołanie  $E$  ma  $pr = 0$  i ponieważ  $3 \geq 0$  parser rozwija “ $\% E[4]$ ” w  $E[0]$ .

Kiedy wołamy parsowanie  $E[4]$ , predykat  $2 \geq pr?$  nie przechodzi ponieważ priorytet operatora  $+$  jest zbyt niski:  $2 \not\geq 4$ . Konsekwentnie  $E[4]$  nie dopasowuje operatora  $+$  opóźniając wołanie  $E[0]$ .

Kluczowym elementem transformacji jest wybór parametrów  $E$ ,  $E[4]$  i  $E[3]$  w tej gramatyce. Dla operatorów lewostronnej łączności jak  $\%$  i  $+$ , prawy operand dostaje o jeden stopień priorytetu więcej niż sam operator. To gwarantuje że wołanie  $E$  dla prawego operandu dopasuje wyłącznie operacje wyższego priorytetu.

Dla prawostronnie łącznych operacji, operand  $E$  dostaje ten sam priorytet co bieżący operator. Tutaj jest wariacja gramatyki wyrażenia która ma prawostronny operator przypisania zamiast operatora dodawania:

$$E \rightarrow E\%E|E =^r ightE|id$$

gdzie notacja  $=^{\wedge}right$  jest skrótem dla rzeczywistej ANTLR składni “ $\langle \text{assoc}=\text{right} \rangle E =^{\wedge}right E$ .” Interpretacja  $a=b=c$  powinna być prawostronnie łączną  $a=(b=c)$ . Aby dostać łączność, transformowana reguła potrzebuje różnić się wyłącznie w prawym operandzie,  $E[2]$  kontra  $E[3]$ :

$$E[pr] \rightarrow id(\{3 \geq pr\}?\%E[4]|\{2 \geq pr\}? = E[2])^*$$

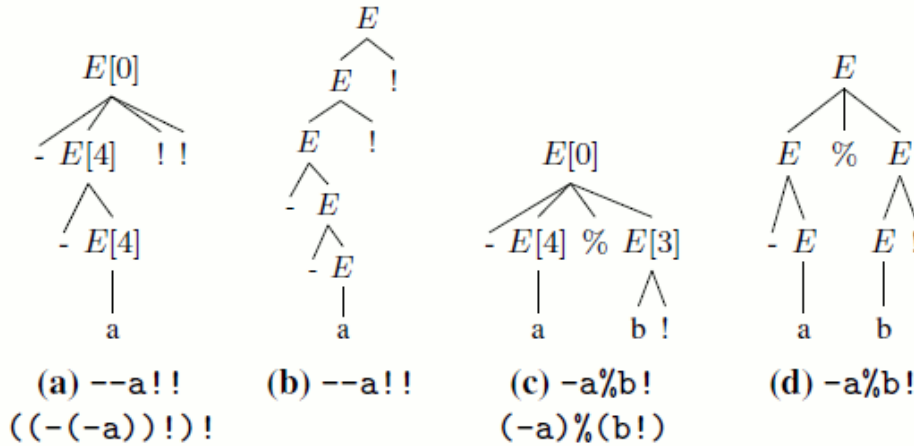
Rozwinięcie  $E[2]$  może dopasować przypisanie jak pokazano na (b) Obrazka 15, ponieważ predykat  $2 \geq 2$  jest true.

Operatory unarnych prefiksów i sufiksów są natomiast traktowane jako prawe lewostronnie łączne. Rozważmy następujące  $E$  z prefiksem negacji i sufiksem „not”.

$$E \rightarrow -E|E!|E\%E|id$$

Operatory prefiksu nie są lewostronnie rekurencyjne i stąd idą do pierwszej podreguły podczas gdy lewostronnie rekurencyjne operatory sufiksu idą do pętli predykatu jak operatory binarne:

$$E[pr] \rightarrow (id|-E[4]) (\{3|wieksze_rownep\}?!|\{2 \geq pr\}?\%E[3])^*$$



Rysunek 16: Drzewa wołania nieterminali i drzewa parsowania dla produkcji  $E \rightarrow -E|E!|E\%E|id$

wołania reguł (zapis stosu wołań) i powiązane drzewa parsowania będące rezultatem parsera generowanego przez ANTLR. Operacje unarne w przyległych produkcjach wszystkie mają ten sam relatywny priorytet i są dlatego “wyliczane” w podanej kolejności. Czyli  $E \rightarrow -E|+E|id$  musi interpretować  $-+a$  jako  $-(+a)$  nie  $+(-a)$ .

Nonkonformistyczne lewostronne produkcje  $E \rightarrow E$  lub  $E \rightarrow \epsilon$  są przepisane bez koncentrowania się na niejednoznaczności używając typowych technik eliminacji.

Ponieważ potrzeba rozwiązania niejednoznaczności z predykatami i obliczenia parametrów A

### C.1 Reguły eliminacji lewostronnej rekursji

Aby wyeliminować bezpośrednią lewostronną rekurencję w nie terminalach i rozwiązać niejednoznaczność ambiguities, ANTLR patrzy na cztery wzorce:

1.  $A_i \rightarrow A\alpha_i A$  (operator binarny i ternarny)
2.  $A_i \rightarrow A\alpha_i$  (operator sufiksu)
3.  $A_i \rightarrow \alpha_i A$  (operator prefiksu)
4.  $A_i \rightarrow \alpha_i$  (pierwotny lub “inny”)

Indeks na produkcji  $A_i$ , chwytka numer produkcji w oryginalnej gramatyce kiedy potrzeba. Ukryta lub niebezpośrednia lewostronna rekurencja skutkuje statycznymi błędami lewostronnej rekurencji w ANTLR. Procedura transformacji z G do G0 jest:

1. Pozbaw bezpośrednio lewostronnie rekurencyjnych nieterminali odniesień
2. Zgromadź prefiks, pierwotne produkcje do nowo utworzonego A’
3. Zgromadź binarne, ternarne i sufiksowe produkcje to nowo utworzonego A”
4. Produkcje prefiksowe w A” z semantyką sprawdzania priorytetu predykat  $\{pr(i) \geq pr\}$  gdzie  $pr(i) = \{n - i + 1\}$

5. Przepisz odniesienia  $A$  pośród binarnych, ternarnych, i prefiksowych produkcji jako  $A[\text{nextpr}(i, \text{assoc})]$  gdzie  $\text{nextpr}(i, \text{assoc}) = \{\text{assoc} == \text{left} ? i + 1 : i\}$
6. Przepisz jakiegokolwiek inne odniesienia  $A$  w produkcji  $P$  (włączając  $A0$  i  $A00$ ) jako  $A[0]$
7. Przepisz oryginalną regułę  $A$  jako  $A[\text{pr}] \rightarrow A'A''$

W praktyce ANTLR używa formy EBNF zamiast  $A'A''$ .