



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ

Praca dyplomowa inżynierska

*Automatyczne odkrywanie procesów biznesowych przy użyciu
programowania genetycznego*

Automated Business Process Discovery using Genetic Programming

Autor:

Piotr Seemann

Kierunek studiów:

Informatyka

Opiekun pracy:

dr inż. Krzysztof Kluza

Kraków, 2021

Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystycznego wykonania albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.): „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej «sądem koleżeńskim».”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Serdecznie dziękuję ...

Spis treści

1. Wprowadzenie	7
1.1. Zarys tematyki pracy	7
1.2. Cele pracy	7
1.3. Zawartość pracy	7
2. Wstęp teoretyczny	9
2.1. Procesy biznesowe	9
2.1.1. Procesy Biznesowe	9
2.1.2. Dzienniki zdarzeń	9
2.2. Modelowanie procesów biznesowych	9
2.3. Algorytmy do wykrywania procesów biznesowych	9
2.4. Ewolucja genetyczna	9
2.4.1. Algorytmy genetyczne	9
2.4.2. Ewolucja genetyczna a inne algorytmy uczenia maszynowego	10
2.4.3. Ewolucja gramatyczna	10
2.5. Gramatyka	11
2.5.1. BNF	11
2.5.2. Tworzenie gramatyki pod kątem ewolucji	11
2.6. Metryki	11
2.6.1. Prostota	11
2.6.2. Odwzorowanie	11
2.6.3. Precyzja	12
2.6.4. Generalizacja	12
2.6.5. Złożoność	12
3. Projekt i implementacja	13
3.1. Wykorzystane technologie	13
3.1.1. Python 3.8.1	13
3.1.2. PonyGE2	13

3.2.	Tworzenie gramatyki procesu biznesowego	13
3.3.	Projekt systemu	16
3.4.	Implementacja	19
3.5.	Wybór parametrów algorytmu	30
4.	Dyskusja rezultatów	33
4.1.	Przykładowe wyniki	33
4.2.	Porównanie z innymi algorytmami	33
4.3.	Wyniki w zależności od przyjętych metryk	33
4.4.	Wnioski	33
5.	Podsumowanie	35

1. Wprowadzenie

1.1. Zarys tematyki pracy

Procesy biznesowe

1.2. Cele pracy

Celem pracy jest projekt i implementacja metody odkrywania procesów biznesowych przy użyciu programowania genetycznego. W pracy zbadano jak wybór metod programowania genetycznego, wybór gramatyki, a także parametrów programu wpływa na jakość rozwiązania. Zaprezentowano też przykłady użycia algorytmu do okrywania procesów biznesowych oraz porównano z innymi dostępnymi algorytmami. Ponadto w pracy zostały zbadana hipoteza czy rozwiązywania problemu najpierw dla prostych przypadków i wykorzystanie rozwiązań tego problemu może mieć korzystny wpływ na rozwiązanie bardziej skomplikowanego problemu.

1.3. Zawartość pracy

Praca zastała podzielona na cztery części. We wstępie teoretycznym zostały przybliżone zagadnienia potrzebne do zrozumienia pracy. W kolejnej części została przedstawiona implementacja algorytmu do wyszukiwania procesów genetycznych. Następnie zaprezentowane zostały wyniki działania algorytmu dla przykładowych dzienników zdarzeń. Omówione zostało też jak na czas znajdowania rozwiązania oraz jego jakość wpływają przyjęte parametry algorytmu w szczególności wybór metryk oraz wagi z jakimi każda metryka powinna być brana pod uwagę.

2. Wstęp teoretyczny

2.1. Procesy biznesowe

2.1.1. Procesy Biznesowe

2.1.2. Dzienniki zdarzeń

2.2. Modelowanie procesów biznesowych

2.3. Algorytmy do wykrywania procesów biznesowych

2.3.0.1. Alpha algorithm

2.3.0.2. The ILP Miner

2.3.0.3. Heuristic Miner

2.3.0.4. Multi-phase Miner

2.4. Ewolucja genetyczna

2.4.1. Algorytmy genetyczne

[1] Algorytmy genetyczne są inspirowaną selekcją naturalną heurystyką, która używa znanych z ewolucji biologicznej operacji jak mutacja, selekcja czy krzyżowanie do rozwiązywania problemów wyszukiwania i optymalizacji. Ich ideą jest zaproponowanie metody przeszukiwania przestrzeni losowy rozwiązań w celu wyszukania najlepszych z nich. Pierwszy raz zostały zaproponowane w [2].

Sposób działania algorytmów genetyczny polega na stworzeniu populacji losowych rozwiązań zwanych genotypami lub chromosomami, które kodowane są za pomocą liczb całkowitych i zapisywane w tablicy jednowymiarowej. Następnie dla każdego elementu populacji obliczane są metryki pozwalające ocenić jak dobre jest wygenerowane rozwiązanie. Po sklasyfikowaniu rozwiązań generujemy nową populację mutując lub krzyżując głównie choć nie tylko najlepsze chromosomy. Proces ten jest powtarzany do momentu otrzymania satysfakcjonującego rozwiązania.

Selekcja: Selekcja proporcjonalna - wybieramy losowo rozwiązania z puli wszystkich rozwiązań z warunkiem, że rozwiązania z największą wartością metryk mają największą szansę na bycie zachowanymi w populacji. Jest to najpopularniejsza metoda selekcji i najczęściej umożliwia najszybsze znalezienie rozwiązania. Pozwala na elityzm, czyli zachowanie części najlepszych genotypów w przyszłej populacji.

Selekcja turniejowa - wybieramy podzbiór ze zbioru rozwiązań i zachowujemy w przyszłej najlepsze rozwiązanie z tego podzbioru. Rozwiązanie to pozwala na duży wpływ na presję genetyczną - zwiększając wielkość podzbioru ograniczamy szansę na wybór z niską wartością metryk. Jest to także metoda, która łatwiej zrównoleglenie.

Krzyżowanie - : Krzyżowanie punktowe - spośród dwóch genotypów losowo wybieramy jeden punkt, następnie tworzymy dwa nowe genotypy pierwszy z chromosomów na prawo od punktu w pierwszym genotypie i na lewo w genotypie drugim oraz drugi z dwóch pozostałych.

Krzyżowanie dwupunktowe - spośród dwóch genotypów losowo wybieramy dwa punkty, następnie część pomiędzy tymi punktami jest zamieniana pomiędzy genotypami.

Krzyżowanie n-punktowe - uogólnienie powyższych krzyżowań dla n punktów.

Krzyżowanie zamiana w drzewie - genotyp może być reprezentowany jako drzewo, w tej metodzie zamieniamy ze sobą dwa poddrzewa, tworzone są tylko prawidłowe rozwiązania, jednak jest to metoda wymagająca większej ilości obliczeń.

Mutacja: Mutacja punktowa - dowolna wartość w tablicy zostaje zmieniona na inną losową wartość. Pozostałe produkcje pozostają niezmiennione.

Mutacja zamiana w drzewie - genotyp może być reprezentowany jako drzewo, w tej metodzie tworzone jest nowe poddrzewo, przy tej metodzie tworzone są tylko prawidłowe rozwiązania, jednak jest to metoda wymagająca większej ilości obliczeń.

2.4.2. Ewolucja genetyczna a inne algorytmy uczenia maszynowego

Algorytmy genetyczne pozwalają przeszukać najszerzą przestrzeń rozwiązań. Pozwalają na znajdowanie nieoczywistych rozwiązań. Inną heurystyką, która używa losowo rozwiązuje problem jest simulated annealing. Algorytm genetyczny jest łatwy w zrównolegnię i pozwala znaleźć globalne rozwiązanie. Sieci neuronowe: Pula rozwiązań zamiast jednego rozwiązywania. Szersze przeszukiwanie rozwiązań.

2.4.3. Ewolucja gramatyczna

Ewoluuje gramatykę za pomocą metod ewolucji genetycznej w celu znalezienia programu, który najlepiej rozwiązuje problem. Podejście to zostało zaproponowane w [1].

2.5. Gramatyka

2.5.1. BNF

Backus-Naur form jest notacją używaną do kodowania gramatyk bezkontekstowych.

Gramatyka bezkontekstowa -

Gramatyka $G=(N,\Sigma,P,S)$ -

2.5.2. Tworzenie gramatyki pod kątem ewolucji

W celu ograniczenia niepotrzebnych obliczeń gramatyka powinna tworzyć jak najmniej niewłaściwych rozwiązań. Tworząc gramatykę pod kątem wykorzystania jej w procesie ewolucji ważne jest, żeby ilość produkcji jak najlepiej odzwierciedlała jak często chcemy uzyskać dany stan. Stosując operator mutacji możemy uzyskać genotypy, które nie należą do języka, czyli nie są właściwym rozwiązaniem. Żeby ograniczyć zbędne obliczenia gramatyka powinna minimalizować szansę na to, że zamieniając produkcję na dowolną inną dostępną dla danego symbolu produkcję uzyskamy słowo które nie należy do języka. Przykład: $a+b \langle e \rangle = aSe \mid b \langle S \rangle = + \mid -$

$\langle e \rangle = aee \mid b \mid + \mid -$

Produkcja 1:

$\langle e \rangle \rightarrow aSe \rightarrow a+e \rightarrow a+b$ Produkcja 2: $\langle e \rangle \rightarrow aee \rightarrow a+e \rightarrow a+b$

Jeśli w kroku $a+e$ zajdzie mutacja, może uzyskać gramatykę np. $a+-$, która nie należy do języka, dlatego pierwsza gramatyka jest lepsza.

2.6. Metryki

[3]

2.6.1. Prostota

Najprostsza z metryk.

$$M_{pro} = 1 - \frac{\text{ilosc duplikatow w modelu} + \text{ilosc brakujacych wartosci w modelu}}{\text{ilosc unikalnych zdarzen w logu} + \text{ilosc zdarzen w modelu}}$$

2.6.2. Odwzorowanie

Pozostałe metryki obliczane są na podstawie tej metryki.

$$M_o = \left(1 - \sum_0^{\text{ilosc procesow w logu}} \frac{\text{blad odwzorowania logu w modelu}}{\text{minimalna dugosc sciezki w modelu} + \text{dugosc sciezki w logu}}\right)^4$$

Przykład liczenia odwzorowania:

2.6.3. Precyzja

$$M_{pre} = \left(1 - \sum_0^{ilosc\ zdarzen\ w\ modelu} \frac{ilosc\ osiagalnych\ zdarzen\ w\ modelu - ilosc\ osiagalnych\ zdarzen\ w\ logu}{ilosc\ osiagalnych\ zdarzen\ w\ modelu}\right)^{\frac{1}{3}}$$

2.6.4. Generalizacja

$$M_g = \frac{1 - \sum_0^{ilosc\ zdarzen\ w\ logu} \frac{1}{\sqrt{ilosc\ wystapien\ zdarzenia}}}{ilosc\ zdarzen\ w\ logu}$$

2.6.5. Złożoność

Promuje rozwiązywanie prostych problemów w prosty sposób

$$M_z = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - odwzorowanie} * \sqrt{zlozonosc\ modelu}}$$

3. Projekt i implementacja

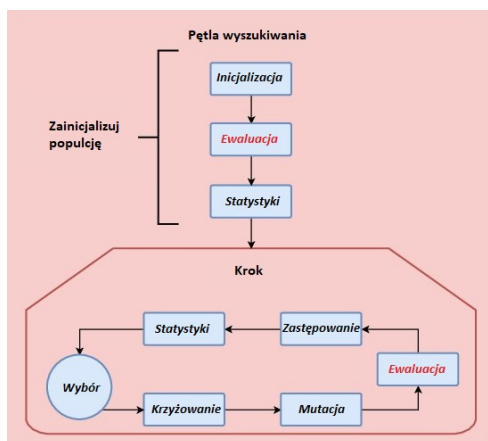
3.1. Wykorzystane technologie

3.1.1. Python 3.8.1

Do implementacji algorytmu został użyty Python. Jest to najpopularniejszy język programowania w dziedzinie uczenia maszynowego. Wymagana jest wersja 3.8+ ze względu na użycie w implementacji metod dostępnych od tej wersji.

3.1.2. PonyGE2

PonyGE2 [4] jest implementacją ewolucji genetycznej w języku Python. Pozwala na łatwą konfigurację parametrów ewolucji genetycznej oraz możliwość dodania własnych problemów oraz sposobów ewaluacji wyników.



Rys. 3.1. Pętla wyszukiwania

3.2. Tworzenie gramatyki procesu biznesowego

Przy tworzeniu gramatyki procesu biznesowego ważnym jest, żeby znaleźć balans, jeśli chodzi o poziom skomplikowania zaproponowanej gramatyki. W pracy [5] autorzy przeanalizowali składniki języka BPMN pod kątem częstotliwości ich stosowania. Z pracy wynika, że najczęściej stosowanymi elementami

modelów procesu biznesowego, jeśli chodzi o bramki są: xor, and oraz pętle lop. Do przedstawionej poniżej gramatyki dodano także bramkę opt, czyli or jako uogólnienie bramki xor w celu uniknięcia zagnieżdżonych bramek xor. Ponadto koniecznym jest posiadanie bramki seq, która oznacza normalny przepływ procesów.

Zapis `GE_RANGE:n` jest rozszerzenie do gramatyki zapewnianym przez PonyGE2, które umożliwia dodanie ilości zmiennych, czyli `GE_RANGE:2` oznacza 0|1|2. Wzorując się na Zapis `GE_RANGE:dataset_vars` jest rozszerzenie do gramatyki zapewnianym przez PonyGE2, które umożliwia dodanie ilości zmiennych odpowiadającej ich ilości w zbiorze danych.

```
<e> ::= <slot><slot><anygate><slot><slot>

<anygate> ::= <anygate><anygate> | <name>(<slots>) | {<event>}

<slot> ::= <anygate> | ' ' | ' ' | ' ' | ' ' | ' ' | ' ' | ' ' | ' ' | ' '

<slots> ::= <slot><slot><anygate><slot><slot>

<name> ::= and | xor | seq | opt | lo<0_n>

<event> ::= GE_RANGE:dataset_vars

<0_n> ::= GE_RANGE:5
```

Listing 3.1. Gramatyka procesu biznesowego

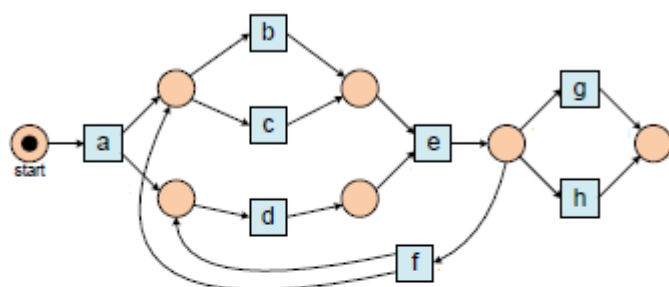
Przykład wygenerowanej gramatyki: `and({d}opt({f})and({a}{c})lop(seq(lop({a}){e})))`

Wszystkie bramki mają nazwy tej samej długości - 3 znaki, co pozwoli na łatwiejsze parsowanie gramatyki.

longate - oznacza pętle Poniższy przykład pokazuje gramatykę, którą ciężko opisać przy pomocy podstawowych bramek logicznych:

Jest to możliwe za pomocą notacji: `{a}and(xor({b}{c}){d}){e}lop({f}and(xor({b}{c}){d}){e})xor({g}{h})`

Użycie powyższej notacji rodzi jednak kilka problemów, Musimy mieć produkcje `{a}lo1({f}and(xor({b}{c}){d}){e})xor({g}{h})`

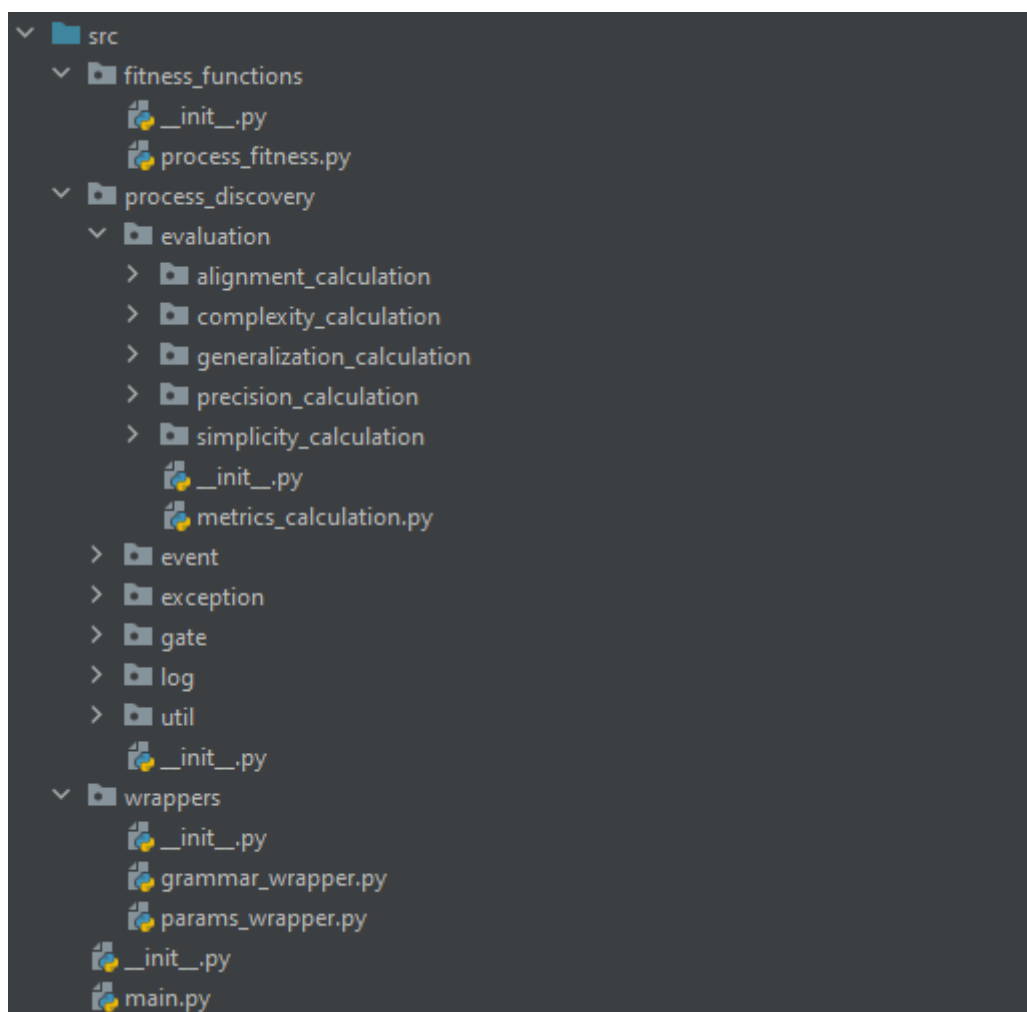
**Rys. 3.2.** Przykład problemu

3.3. Projekt systemu

3.3.0.1. Podział na moduły

Implementację podzielone na następujące moduły:

- wrappers - PonyGE2 nie jest przystosowane do zaimportowania jako biblioteka, dlatego żeby oddzielić kod PonyGE2 od naszego kodu należało rozszerzyć lub nadpisać część z modułów PonyGE2. Moduły, które nadpisano to params, który zawiera konfigurację aplikacji oraz grammar, gdzie dodano zmiany w jaki sposób parsowana jest podana gramatyka.
- fitness_functions - zawiera klasę bazowy moduł, gdzie znajduje się bazowa klasa dla obliczania metryk
- process_discovery - moduł zawiera całą logikę obliczenia metryk

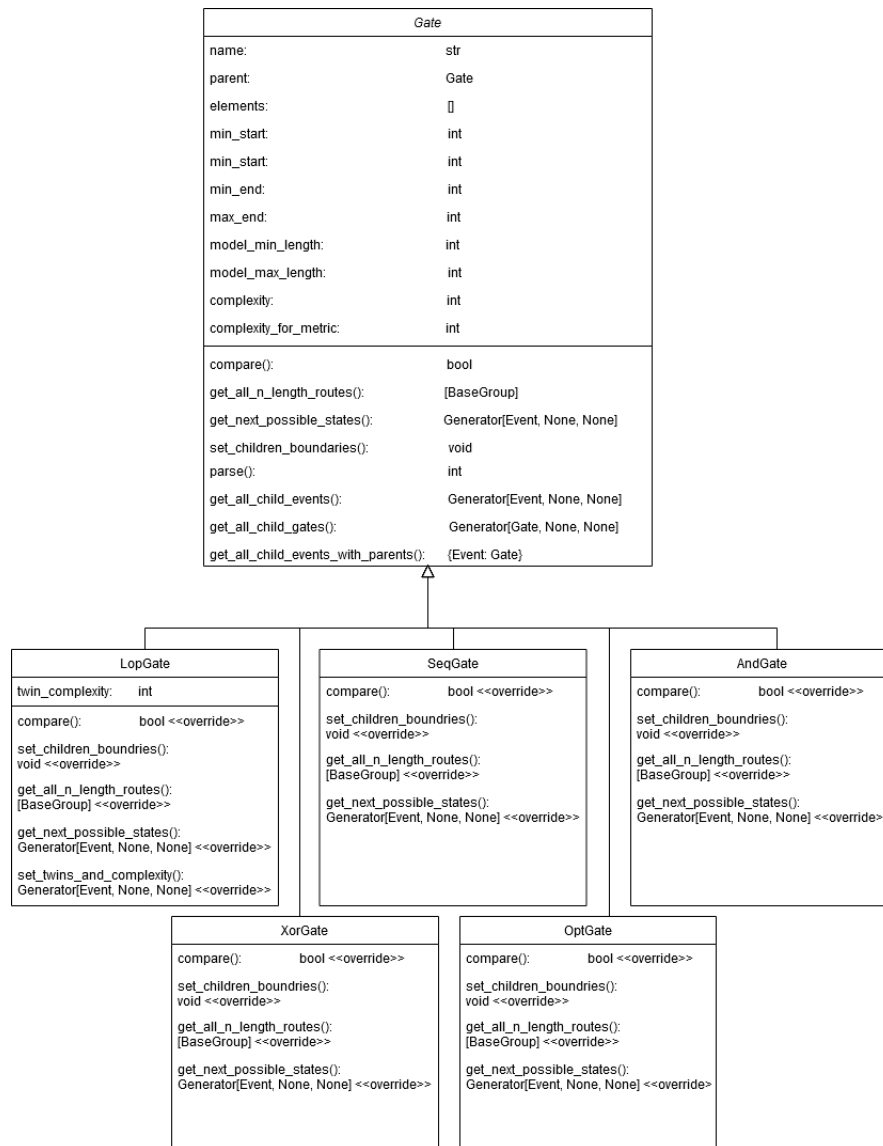


Rys. 3.3. Podział na moduły

3.3.0.2. Model

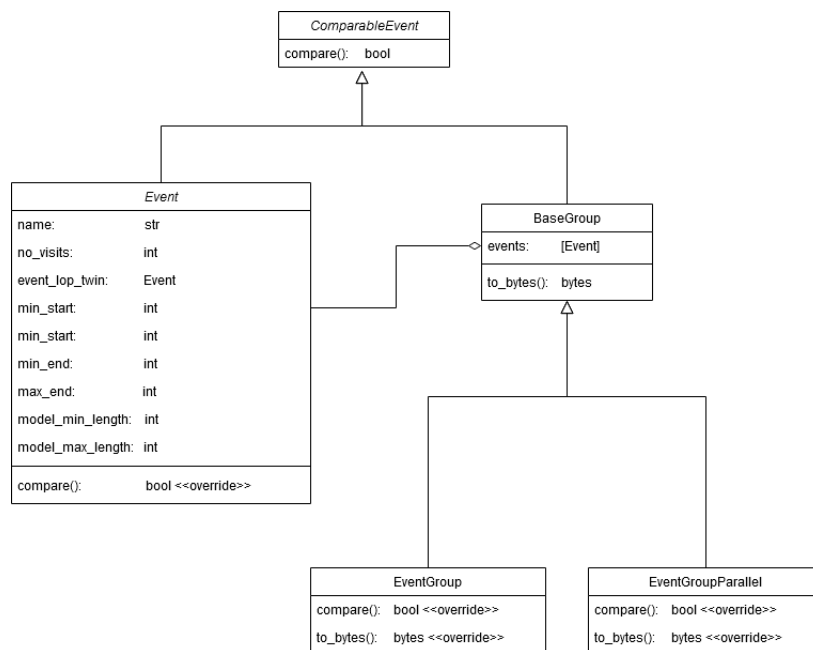
Podział na dwie klasy przydatne na różnym etapie procesowania:

Gate: Gramatyka zostaje sparsowana na to klasa. Pozwala to zastąpić proces w formie ciągu znaków na formę, na której łatwiej będzie nam operować w przyszłość.



Rys. 3.4. Gate UML

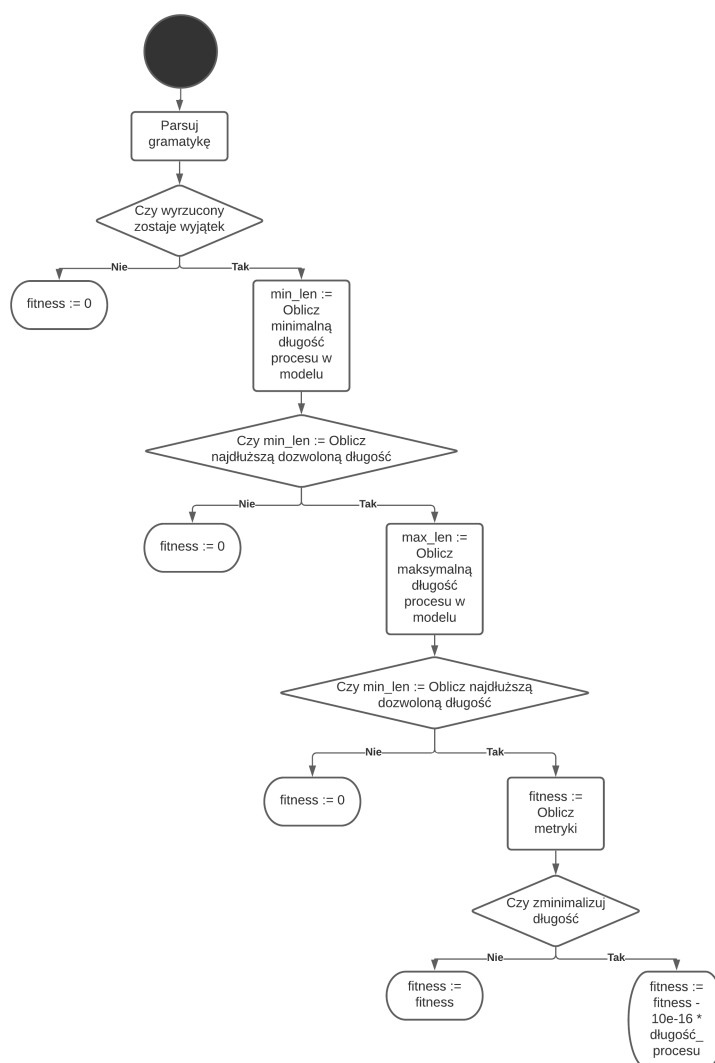
EventGroup: Obliczanie metryk dla klasy Gate byłoby utrudnione z uwagi na dużą ilość bramek logicznych. Takie modularne podejście pozwala na dodanie nowych bramek logicznych bez konieczności zmieniania metody obliczania dopasowania, która jest najbardziej złożonym algorytmem występującym w programie.



Rys. 3.5. Event UML

3.4. Implementacja

3.4.0.1. Ogólny schemat blokowy



Rys. 3.6. Ogólny schemat blokowy

3.4.0.2. Parsowanie gramatyki

Parser pozwala na przetworzenie wyników uzyskanych na drodze ewolucji gramatycznej na postać, na której łatwiej będzie operować. Rezultaty uzyskane na drodze rewolucji gramatycznej w PonyGE2 są w formie tekstowej, z którą praca byłaby niewygodna, dlatego używamy parsera, żeby otrzymać wynik w postaci drzewa obiektów Gate, którego liśćmi będą obiekty Event. Parsując korzystamy z faktu, że przy projektowaniu gramatyki wszystkie bramki logiczne zostały oznaczone 3 literowymi symbolami, a wszystkie zdarzenia otoczone nawiasami klamrowymi. Tworząc każdy obiekt Event dodajemy informację o liczbie dzieci tego obiektu, co przyda nam się przy obliczaniu metryki precyzja.

```

def parsuj(wyrazenie: str) -> int:

    for i w zakresie długość_wyrazenia:
        if wyrażenie[i] == "{":
            zdarzenie := Event(wyrazenia[i + 1])
            dodaj zdarzenie do aktualnie parsowanej bramki
            i += 2
        elif wyrażenie[i] == ")":
            return i+1
        elif i+4 < długość_wyrazenia:
            if wyrażenie[i:i + 3] == "seq" and (self.name == "seq" or self.name == "lop"):
                usuń_niepotrzebe_bramki
            else:
                if wyrażenie[i:i+2] == 'lo' and wyrażenie[i:i+3] != 'lop':
                    bramka := stwórz nową bramkę Gate typu zgodnego z wyrażeniem
                    i += 3
                    przeparsowane_znaki = bramka.parsuj(wyrazenie[i+4:])
                    if self.name == "seq" or self.name == "lop":
                        if int(wyrazenie[i+2]) <= długość(gate.elementy):
                            for x in gate.elementy[int(wyrazenie[i+2]):]:
                                self.dodaj_element(x)
                    dodaj zdarzenie do aktualnie parsowanej bramki
                    i += ilość_przeparsowanych_znaków
                else:
                    bramka := stwórz nową bramkę Gate typu zgodnego z wyrażeniem
                    i += 3
                    przeparsowane_znaki = bramka.parsuj(wyrazenie[i+4:])
                    dodaj zdarzenie do aktualnie parsowanej bramki
                    i += ilość_przeparsowanych_znaków
        else:
            wyrzucić wyjątek

```

Listing 3.2. Parser gramatyki

3.4.0.3. Obliczanie metryk

Mając już sparsowany model musimy obliczyć metryki. Najbardziej problematyczną metryką do obliczenia jest dopasowanie. Obliczanie dopasowania można rozbić na następujące kroki:

- Znalezienie ścieżek o długości n w modelu.
- Przerobienie ścieżek na postać zawierającą BaseGroup.
- Obliczenie dopasowania.

Metryką, która nie wymaga obliczenia dopasowania jest prostota, dlatego możemy ją obliczyć wcześniej co przy niskim wyniku pozwala na wstępne odrzucenie części rezultatów bez konieczności kosztownego obliczania dopasowania. Pozostałe metryki wymagają obliczenia dopasowania i są obliczane dla najlepiej dopasowanej gramatyki. Łatwo można zauważyć, że jeżeli zdarzenie znajduje się w logu, a nie znajduje się w modelu dopasowanie nie będzie dobre. Pozwala to odrzucić rezultaty, które nie przekraczają progu.

```
def oblicz_metryki(log_info, model, najkrótsza_dozwolona_długość,
                  najdłuższa_dozwolona_długość, cache) -> int:

    metryki['PROSTOTA'] := oblicz_metrykę_prostota(lista_zdarzeń_w_procesie),
        unikalne_zdarzenia_w_logu)
    if metryki['PROSTOTA'] < 2/3:
        return 0

    stosunek_wspólnych_zdarzeń_w_logu_i_modelu :=
        oblicz_stosunek_wspólnych_zdarzeń_w_logu_i_modelu()
    if stosunek_wspólnych_zdarzeń_w_logu_i_modelu <
        MINIMALNY_STOSUNUK_WSPÓLNYCH_ZDARZEŃ_W_LOGU_I_MODELU:
        return stosunek_wspólnych_zdarzeń_w_logu_i_modelu/10

    idealnie_dopasowane_logi := pusty_słownik
    skumulowany_błąd := 0

    for proces w log:
        najlepszy_błąd_lokalny, najlepiej_dopasowana_ścieżka, najlepszy_process :=
            oblicz_metryki_dla_jednego_procesu(proces, model, minimalna_długość,
            maksymalna_długość, cache)
        if jakikolwiek proces w najlepiej_dopasowanej_ścieżce nie znajduje się w modelu:
            value, best_aligned_process = oblicz_dopasowanie_bez_cache(best_event_group,
                list(process), dict())
            best_local_error = calculate_alignment_metric(value, oblicz_długość(proces),
                oblicz_długość(best_event_group))
            if najlepszy_błąd_lokalny == 0:
                idealnie_dopasowane_logi.dodaj() [tuple(best_aligned_process)] =
                    log_info.log[process]
            add_executions(model_events_list, best_aligned_process, log_info.log[process])

    metryki := oblicz_metryki
    najlepszy_wynik := oblicz_średnia_ważona_metryk
    return najlepszy_wynik
```

Listing 3.3. Obliczanie metryk

3.4.0.4. Obliczanie metryk dla jednego procesu

Ważnym jest, żeby jak najbardziej ograniczyć zbędne obliczenia.

```

def oblicz_metryki_dla_jednego_procesu(proces, model, najkrótsza_dozwolona_długość,
                                       najdłuższa_dozwolona_długość, cache):
    długość_procesu := oblicz_długość(proces)
    n := długość_procesu
    i := 1
    minimalny_błąd_dopasowania := -(długość_procesu + model.model_min_length)
    while not (dolny_limit_osiagnięty and górny_limit_osiagnięty):
        if n >= min(oblicz_maksymalna_dozwolona_długość(długość_procesu),
                   długość_procesu - minimalny_błąd_dopasowania):
            górny_limit_osiagnięty := True
            n += (-i if i % 2 == 1 else i); i += 1
            continue
        if n <= max(oblicz_minimalna_dozwolona_długość(długość_procesu),
                   długość_procesu + minimalny_błąd_dopasowania):
            dolny_limit_osiagnięty := True
            n += (-i if i % 2 == 1 else i); i += 1
            continue
    if najkrótsza_dozwolona_długość <= n <= najdłuższa_dozwolona_długość:
        ustaw_najwcześniejsze_i_najpóźniejsze_wystąpienie_zdarzenia(model, n)
        ścieżki = model.znajdź_wszystkie_ścieżki_długości_n(n, proces)
        if ścieżki istnieją:
            for ścieżka in ścieżki:
                procent_wspólnych_zdarzeń := oblicz_procent_wspólnych_zdarzeń_
                                              w_modelu_i_logu(ścieżka, proces)
                if procent_wspólnych_zdarzeń >= 1 - TOLERANCJA:
                    dodaj_ścieżkę_do_listy_ścieżek_do_obliczenia
            posortowane_ścieżki := posortuj_listę_ścieżek_do_obliczenia
            for ścieżka in posortowane_ścieżki:
                if procent_wspólnych_zdarzeń <= 1 + minimalny_błąd_dopasowania /
                   długość_procesu:
                    break
            błąd_dopasowania, najlepsze_dopasowane_zdarzenia, jest_z_cache :=
                oblicz_najlepsze_dopasowanie_z_cache(ścieżka, proces, cache)
            if błąd_dopasowania > minimalny_błąd_dopasowania:
                minimalny_błąd_dopasowania := błąd_dopasowania
                najlepsze_dopasowane_zdarzenia := dopasowane_zdarzenia
                najlepsza_ścieżka := ścieżka
                jest_najlepszy_z_cache := jest_z_cache
            if błąd_dopasowania == 0:
                return minimalny_błąd_dopasowania, najlepsze_dopasowane_
                       zdarzenia, najlepsza_ścieżka, jest_najlepszy_z_cache
    n += (-i if i % 2 == 1 else i); i += 1
    return minimalny_błąd_dopasowania, najlepsze_dopasowane_zdarzenia,
        najlepsza_ścieżka, jest_najlepszy_z_cache

```

Listing 3.4. Obliczanie metryk dla jednego procesu

3.4.0.5. Wyszukiwanie w modelu procesów o określonej długości

Łatwiejszym jest znalezienie wszystkich ścieżek o określonej długości. Algorytm rekurencyjny. Implementacja różni się w zależności od przeszukiwanej bramki logicznej. Poniżej zaprezentowano przykład dla bramki.

```

def znajdź_wszystkie_ścieżki_długości_n(n, proces) -> []:
    if n == 0:
        return []
    if self.model_max_length < n or n < self.model_min_length:
        return None

    min_lengths = self.get_children_min_length()
    max_lengths = self.get_children_max_length()
    global_list = []

    for elem in self.elements:
        local_list = []
        if isinstance(elem, Event):
            local_list.append(elem)
            min_lengths.pop(0)
            max_lengths.pop(0)
        else:
            lower_limit, upper_limit = self.get_goal_length_range(n, global_list, min_lengths, max_l
            for i in range(lower_limit, upper_limit + 1):
                try:
                    child_all_n_length_routes = elem.get_all_n_length_routes(i, process)
                except ValueError:
                    return None
                if child_all_n_length_routes is not None:
                    local_list.append(child_all_n_length_routes)

            if local_list:
                global_list.append(local_list)

    result = []
    if global_list:
        for elem in flatten_values(global_list):
            if self.check_length(n, elem):
                if n == 1:
                    # because always 1 elem list
                    result.append(elem[0])
                else:
                    self.check_valid_for_get_n_length(elem)
                    result.append(EventGroupParallel(elem))
    if result:
        return result
    else:
        return None

```

Listing 3.5. Wyszukiwanie procesów o długości n

3.4.0.6. Obliczanie dopasowania

Pomysł zaczerpnięty z algorytmu Needleman-Wunsch [6], który jest uogólnieniem odległości Levenshteina. Tworzymy macierz o wymiarach długość modelu i długość logu, w której obliczać będziemy rozwiązania. Rozwinięty o możliwość przeszukiwania modelu rekurencyjnie oraz o możliwość podawania listy równoległych zdarzeń.

```
def oblicz_dopasowanie(model, log):
    bład := {'DOPASOWANIE': 0, 'BRAK_DOPASOWANIA': -2, 'PRZERWA': -1}
    m = długość(model) + 1 # Macierz rozwiązań ilość wierszy.
    n = długość(log) + 1 # Macierz rozwiązań ilość kolumn.
    najlepiej_dopasowana_ścieżka := [None] * m
    macierz_rozwiazań := Zainicjalizuj macierz zerami
    # Wypełnij osie macierzy właściwymi wartościami
    for j in range(n):
        macierz_rozwiazań[0][j] := bład['PRZERWA'] * j

    for i in range(1, m):
        if should_go_recurrent(model[i-1]):
            macierz_rozwiazań[i], najlepiej_dopasowana_ścieżka_podmodelu[i] :=
                dopasowanie_rekurencyjne(macierz_rozwiazań[i - 1], model[i - 1],
                                         [x for x in odwrócone_substringi(log)], i)
        elif długość(model[i-1]) > 1:
            macierz_rozwiazań[i], najlepiej_dopasowana_ścieżka_podmodelu[i] :=
                dopasowanie_równoległe(macierz_rozwiazań[i - 1], model[i - 1],
                                       [x for x in odwrócone_substringi(log)], kara, i)
        else:
            macierz_rozwiazań[i][0] := macierz_rozwiazań[i-1][0] + kara['PRZERWA']
            dopasowanie(macierz_rozwiazań, model[i - 1], log, kara, i, n)

    ścieżka := znajdź_ścieżkę(macierz_rozwiazań, bład['PRZERWA'], model,
                             log, najlepiej_dopasowana_ścieżka_podmodelu)

    return macierz_rozwiazań[m-1], najlepiej_dopasowana_ścieżka
```

Listing 3.6. Obliczanie dopasowania

3.4.0.7. Znajdowanie ścieżki w modelu

Potrzebne do obliczenia precyzji oraz generalizacji.

```

def znajdź_sciezkę(macierz_rozwiązań, model, log, rozwiązania_podmodeli):
    sciezka = []
    while i != 0:
        długość_grupy_zdarzeń = długość(model[i - 1])
        if model_results_local[i] is not None:
            znaleziono_dopasowanie := False
            if macierz_rozwiązań[i][j] == macierz_rozwiązań[i - 1][j] + długość_grupy_zdarzeń *
                [model_result.append(None) for _ in range(długość_grupy_zdarzeń)]
            macierz_rozwiązań[i][j] := 0
            i -= 1
        else:
            for k in range(j):
                zdarzenia := get_not_none(model_results_local[i][k]
                    [długość(model_results_local[i][k]) - (j-k)], log)
                if macierz_rozwiązań[i][j] == macierz_rozwiązań[i - 1][k] +
                    (długość_grupy_zdarzeń + (j-k) - 2 * długość(processes)) * błąd['PRZERWA']
                    [model_result.append(x) for x in processes]
                for x in processes:
                    log = log.replace(x.name, "", 1)
                [model_result.append(None)
                    for _ in range(długość_grupy_zdarzeń - len(processes))]
                macierz_rozwiązań[i][j] = 0
                i -= 1; j = k
                znaleziono_dopasowanie = True
                break
            if not znaleziono_dopasowanie:
                if macierz_rozwiązań[i][j] == macierz_rozwiązań[i][j - 1] + błąd['PRZERWA']
                    macierz_rozwiązań[i][j] = 0
                    j -= 1
        else:
            if macierz_rozwiązań[i][j] == macierz_rozwiązań[i - 1][j] + kara:
                model_result.append(None)
                macierz_rozwiązań[i][j] := 0
                i -= 1
            elif macierz_rozwiązań[i][j] == macierz_rozwiązań[i][j - 1] + kara:
                macierz_rozwiązań[i][j] := 0
                j -= 1
            elif macierz_rozwiązań[i][j] == macierz_rozwiązań[i - 1][j - 1]:
                model_result.append(model[i-1])
                log = log.replace(model[i-1].name, "", 1)
                macierz_rozwiązań[i][j] := 0
                i -= 1; j -= 1
    return sciezka

```

Listing 3.7. Znajdowanie ścieżki w modelu

3.4.0.8. Cache

W sytuacji kiedy wiele obliczeń się powtarza można znacząco przyspieszyć czas działania aplikacji poprzez zastosowanie cachowania. W przypadku naszego algorytmu można zauważyć dwa miejsca, w których często dochodzi to powtórzeń: Poprzednio obliczone rozwiązanie może się powtórzyć. W tym wypadku możemy skorzystać z cache genotypów, dostarczane przez bibliotekę PonyGE2. Podczas obliczania dopasowania, które jest najbardziej kosztownym obliczeniem. Ponadto z uwagi na dużą ilość obliczeń, żeby ograniczyć rozmiar cache zaimplementowano cachowanie LRU.

3.5. Wybór parametrów algorytmu

Wybór parametrów algorytmu ma ogromny wpływ na jakość i szybkość znalezienia rozwiązania. Jest kilka zasad, którymi należy się kierować przy tym wyborze właśnie.

Włącza cache:

CACHE: True

CODON_SIZE: 100000

Ilość wątków procesora: **CORES: 4**

CROSSOVER: subtree

CROSSOVER_PROBABILITY: 0.75

DEBUG: False

ELITE_SIZE: 30

GENERATIONS: 100000

MAX_GENOME_LENGTH: 500

GRAMMAR_FILE: process-subtree.bnf

INITIALISATION: PI_grow

INVALID_SELECTION: False

LOOKUP_FITNESS: True

MAX_INIT_TREE_DEPTH: 13

MAX_TREE_DEPTH: 21

MULTICORE: True

MULTI_OBJECTIVE: False

MUTATION: subtree

MUTATION_EVENTS: 1

POPULATION_SIZE: 500

FITNESS_FUNCTION: process_fitness

REPLACEMENT: generational

SAVE_STATE_STEP: 10

SELECTION: tournament

TOURNAMENT_SIZE: 16

VERBOSE: True
MAX_WRAPS: 3
ALIGNMENT_CACHE_SIZE: 32*1024
DATASET: discovered-processes.csv
MAX_ALLOWED_COMPLEXITY_FACTOR: 300
MINIMIZE_SOLUTION_LENGTH: True
RESULT_TOLERANCE_PERCENT: 5
TIMEOUT: 5

Rekomendowane wagi poszczególnych metryk: **WEIGHT_ALIGNMENT: 8**
WEIGHT_COMPLEXITY: 2
WEIGHT_GENERALIZATION: 2
WEIGHT_PRECISION: 2
WEIGHT_SIMPLICITY: 2

4. Dyskusja rezultatów

4.1. Przykładowe wyniki

Metoda została przetestowana dla dziennika zdarzeń:

455	acdeh
191	abdeg
177	acdeh
144	abdeh
111	acdeg
82	acdeg
56	acdeh
47	acdefbdeh
38	acdeg
33	acdefbdeh
14	acdefbdeg
11	acdefbdeg
9	acdefbdeh
8	acdefbdeh
5	acdefbdeg
3	acdefbdehdeg
2	acdefbdeg
2	acdefbdehdeg
1	acdefbdehdeh
1	acdefbdehdeg
1	acdefbdehdehdeg
1381	

Rys. 4.1. Dziennik zdarzeń

4.2. Porównanie z innymi algorytmami

4.3. Wyniki w zależności od przyjętych metryk

4.4. Wnioski

5. Podsumowanie

Bibliografia

- [1] Conor Ryan, Jj Collins i Michael O Neill. „Grammatical evolution: Evolving programs for an arbitrary language”. W: *Lecture Notes in Computer Science Genetic Programming* (1998), 83–96. DOI: [10.1007/bfb0055930](https://doi.org/10.1007/bfb0055930).
- [2] John R. Koza. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992. ISBN: 0262111705.
- [3] J. C. A. M. Buijs, B. F. van Dongen i W. M. P. van der Aalst. „Quality Dimensions in Process Discovery: The Importance of Fitness, Precision, Generalization and Simplicity”. W: *International Journal of Cooperative Information Systems* 23.01 (2014), s. 1440001. DOI: [10.1142/S0218843014400012](https://doi.org/10.1142/S0218843014400012). eprint: <https://doi.org/10.1142/S0218843014400012>.
- [4] Michael Fenton i in. „PonyGE2”. W: *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion* (2017). DOI: [10.1145/3067695.3082469](https://doi.org/10.1145/3067695.3082469).
- [5] Michael zur Muehlen i Jan Recker. „How Much Language Is Enough? Theoretical and Practical Use of the Business Process Modeling Notation”. W: *Advanced Information Systems Engineering*. Red. Zohra Bellahsene i Michel Léonard. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, s. 465–479. ISBN: 978-3-540-69534-9.
- [6] Saul B. Needleman i Christian D. Wunsch. „A general method applicable to the search for similarities in the amino acid sequence of two proteins”. English (US). W: *Journal of Molecular Biology* 48.3 (mar. 1970), s. 443–453. ISSN: 0022-2836. DOI: [10.1016/0022-2836\(70\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0022-2836(70)90057-4).