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. Cele pracy 7

1.2. Przegląd prac 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 9

2.4.3. Ewolucja gramatyczna 9

2.5. Gramatyka 9

2.5.1. BNF 9

2.5.2. Tworzenie gramatyki pod kątem ewolucji 9

2.6. Metryki 9

2.6.1. Prostota 10

2.6.2. Odwzorowanie 10

2.6.3. Precyzja 10

2.6.4. Generalizacja 10

2.6.5. Złożoność 10

3. Projekt i implementacja 11

3.1. Wykorzystane technologie 11

3.1.1. Python 3.8.1 11

3.1.2. PonyGE2 11

3.2. Tworzenie gramatyki procesu biznesowego 11
3.3. Projekt systemu 14
3.4. Implementacja 15
3.5. Wybór parametrów algorytmu 27
4. Dyskusja rezultatów 29
4.1. Przykładowe wyniki 29
4.2. Porównanie z innymi algorytmami 29
4.3. Wyniki w zależności od przyjętych metryk 29
4.4. Wnioski 29
5. Podsumowanie 31

1. Wprowadzenie

1.1. Cele pracy

1.2. Przegląd prac

1.3. Zawartość pracy

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]

2.4.2. Ewolucja genetyczna a inne algorytmy uczenia maszynowego

2.4.3. Ewolucja gramatyczna

2.5. Gramatyka

2.5.1. BNF

2.5.2. Tworzenie gramatyki pod kątem ewolucji

2.6. Metryki

[2]

2.6.1. Prostota

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

2.6.2. Odwzorowanie

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

2.6.3. Precyzja

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

2.6.4. Generalizacja

$$M_g = (1 - \sum_0^{ilosc\ zdarzen\ w\ logu} \frac{1}{\sqrt{iloscwystapienzdarzenia}})/ilosc\ zdarzen\ w\ logu$$

2.6.5. Złożoność

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

3. Projekt i implementacja

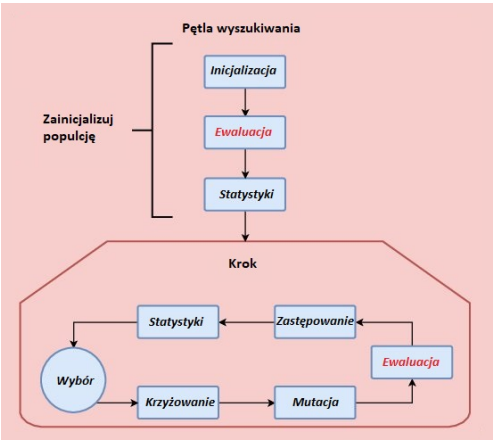
3.1. Wykorzystane technologie

3.1.1. Python 3.8.1

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

3.1.2. PonyGE2

PonyGE2 [3] jest implementacja ewolucji genetycznej w jezyku Python. Pozwala na latwa konfiguracje parametrow ewolucji genetycznej oraz latwa mozliwosc dodania wlasnych problemow oraz sposobow ewaluacji wynikow.



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 [4] autorzy przeanalizowali składniki języka BPMN pod kątem częstotliwości ich stosowania. z pracy wynika, że najczęściej stosowany 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, ktore umożliwia dodanie ilosci zmiennych, czyli GE_RANGE:2 oznacza 0|1|2. Wzorując się na Zapis GE_RANGE:dataset_vars jest rozszerzenie do gramatyki zapewnianym przez PonyGE2, ktore umożliwia dodanie ilosci zmiennych odpowiadajacej ich ilosci 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

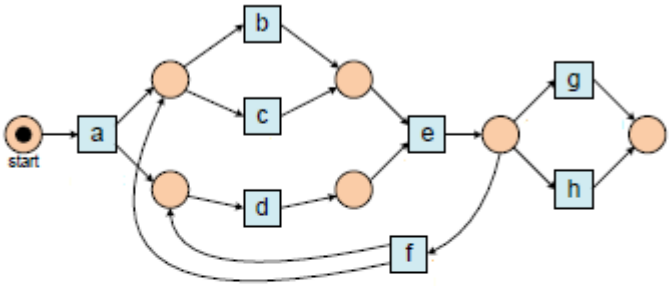
Przykład wygenerowanej gramatyki: and({d}opt({f})and({a}{c})lop(seq(lop({a}){e})))

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

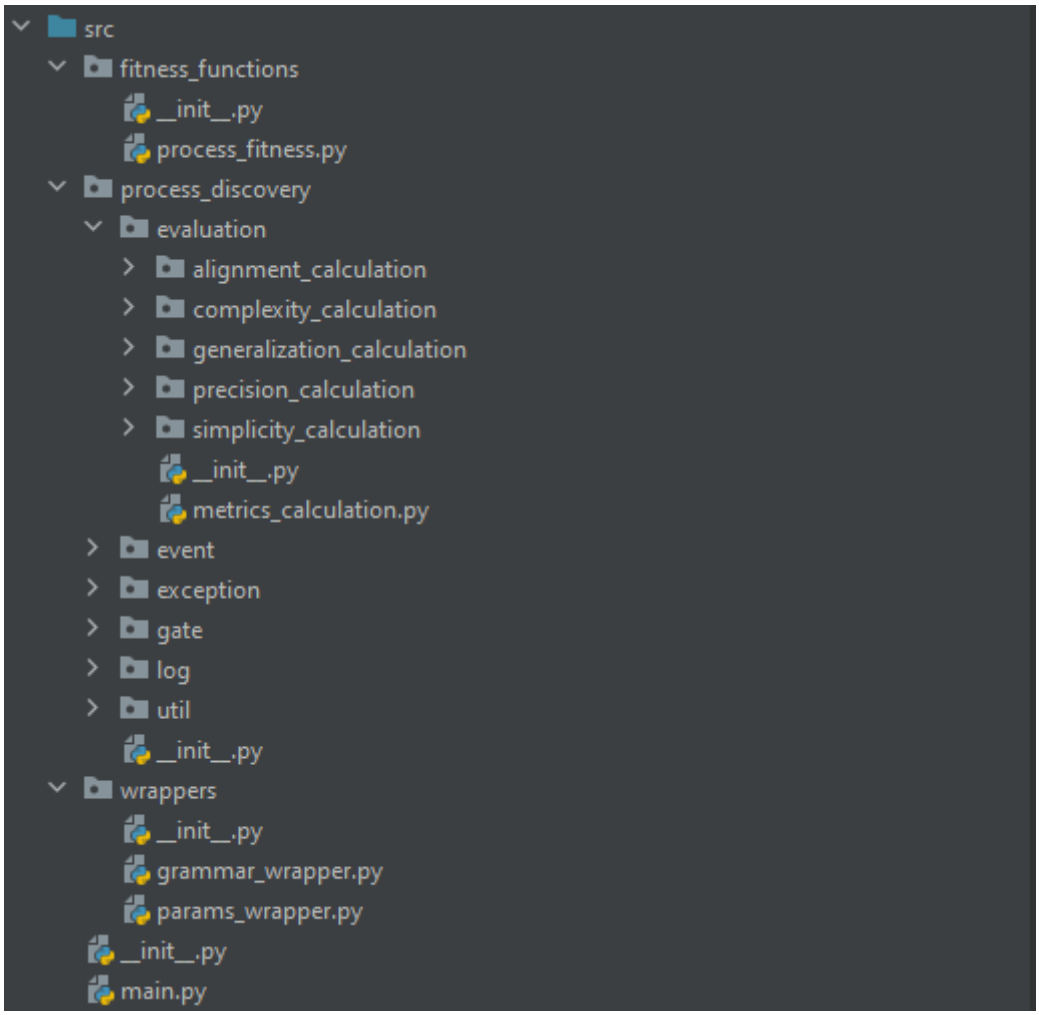
3.3.0.1. Podział na moduły

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 cześć 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

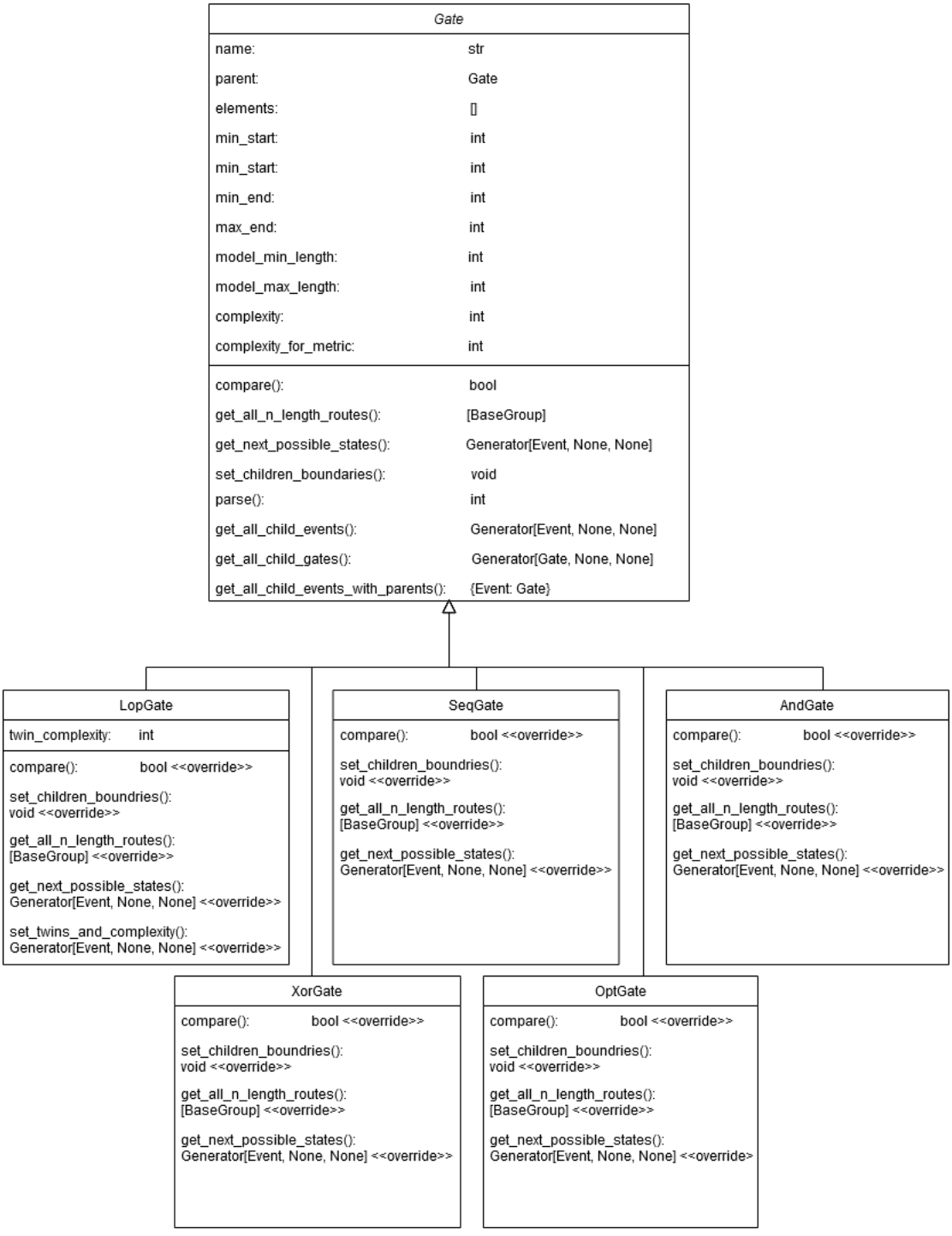
Podział na dwie klasy przydatne na różnym etapie procesowania:

Gate:

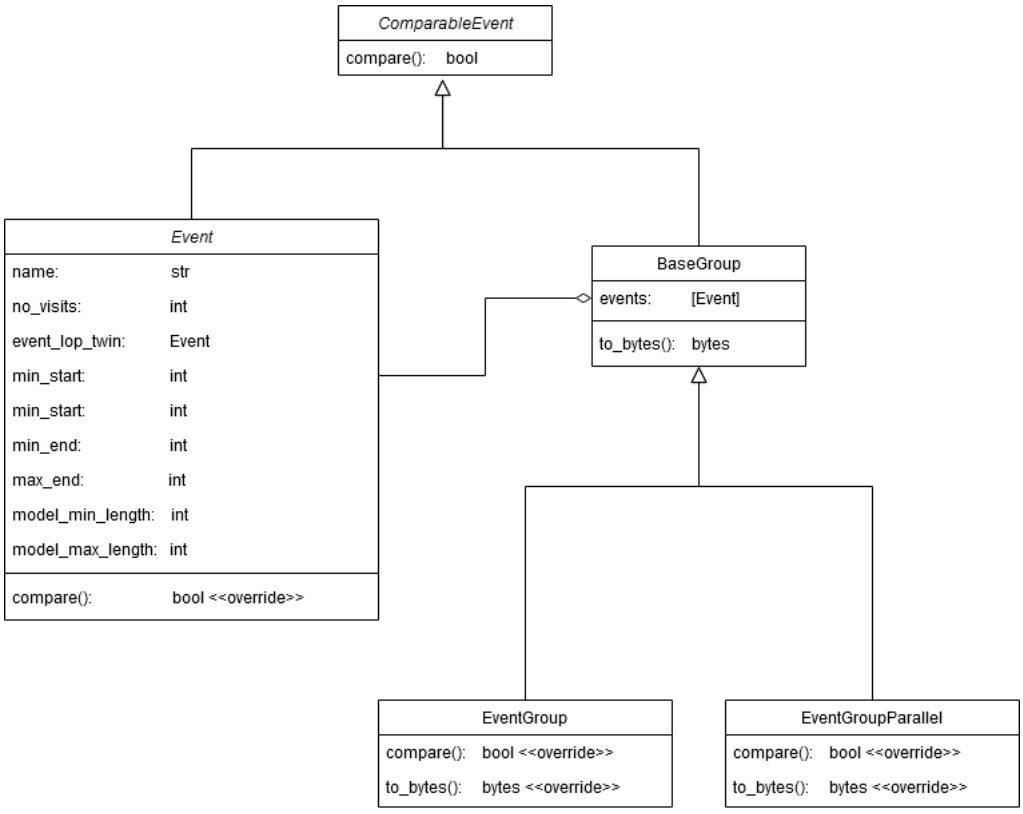
Event group:

3.4. Implementacja

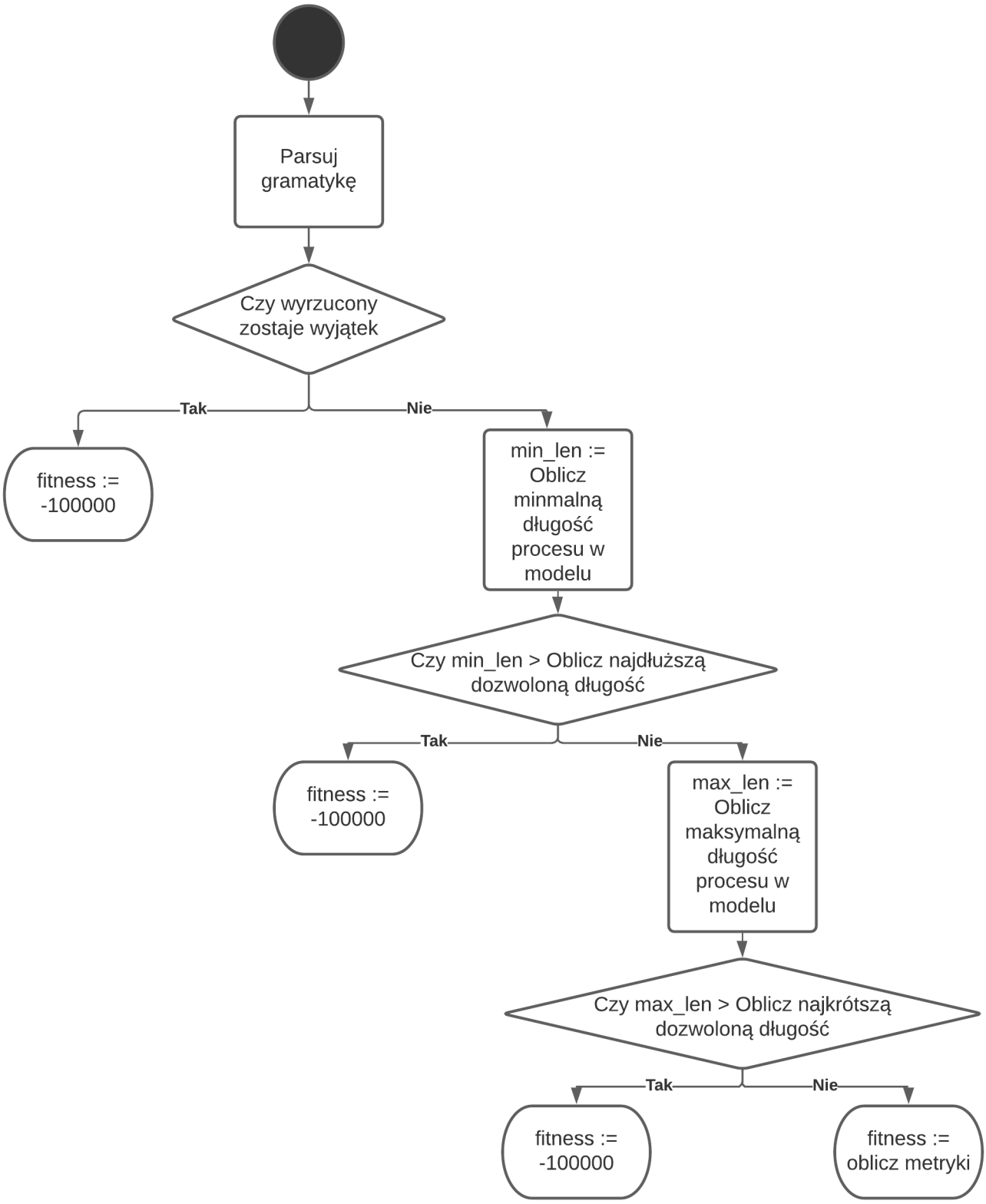
3.4.0.1. Ogólny schemat blokowy



Rys. 3.4. Gate UML



Rys. 3.5. Event UML



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(wyrażenie: str) -> int:

        for i w zakresie długość_wyrażenia:
            if wyrażenie[i] == "{":
                zdarzenie := Event(wyrażenia[i + 1])
                dodaj zdarzenie do aktualnie parsowanej bramki
                i += 2
            elif wyrażenie[i] == ")":
                return i+1
            elif i+4 < długość_wyrażenia:
                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(wyrażenie[i+4:])
                            dodaj zdarzenie do aktualnie parsowanej bramki
                            i += ilość_przeparsowanych_znaków
            else:
                wyrzuć 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 dopasowanie można opisać następującymi krokami:

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

Metryką, która wymaga W pierwszej kolejności obliczamy metrykę dla dopasowania. Wszystkie inne metryki są obliczane dla najlepiej dopasowanej gramatyki.

```
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
    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 = obilcz_dopasowanie_bez_cache(best_event_group,
                list(process), dict())
            best_local_error = calculate_alignment_metric(value, len(process),
             len(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_średnią_ważoną_metryk
    return najlepszy_wynik
```

Listing 3.3. Obliczanie metryk

3.4.0.4. Obliczanie metryk dla jednego procesu

```
def oblicz_metryki_dla_jednego_procesu(proces, model, najkrótsza_dozwolona_długość,
                                       najdłuższa_dozwolona_długość, cache):
    dłogość_procesu := len(proces)
    n := dłogość_procesu; i := 1
    minimalny_błąd_dopasowania := -(dłogość_procesu + model.model_min_length)
        while not (dolny_limit_osiągnięty and górny_limit_osiągnięty):
        if n >= min(oblicz_maksymalną_dozwoloną_długość(dłogość_procesu),
                    dłogość_procesu - minimalny_błąd_dopasowania):
            górny_limit_osiągnięty := True
            n += (-i if i % 2 == 1 else i); i += 1
            continue
        if n <= max(oblicz_minimalną_dozwoloną_długość(dłogość_procesu),
                    dłogość_procesu + minimalny_błąd_dopasowania):
            dolny_limit_osiągnięty := True
            n += (-i if i % 2 == 1 else i); i += 1
            continue
        if najkrótsza_dozwolona_długość <= n <= najdłuższa_dozwolona_długość:
            set_model_children_boundaries(model, n)
            ścieżki = model.get_all_n_length_routes(n, proces)
            if ścieżki istnieją:
                for event_group in routes:
                    ratio = check_route_with_log_process(event_group, proces)
                    if ratio >= 1 - 10 * params['RESULT_TOLERANCE_PERCENT']/100:
                        route_and_process_events_ratios.append((event_group, ratio))
                sorted_routes_and_ratios = sorted(route_and_process_events_ratios, key=lambda x: -x[
                for event_group_and_ratios in sorted_routes_and_ratios:
                    if event_group_and_ratios[1] <= 1 + minimalny_błąd_dopasowania/dłogość_procesu:
                        break
                    błąd_dopasowania, najlepsze_dopasowane_zdarzenia, jest_z_cache = \
                        oblicz_najlepsze_dopasowanie_z_cache(ścieżka, proces,
                                                                                    cac
                    if błąd_dopasowania > minimalny_błąd_dopasowania:
                        minimalny_błąd_dopasowania = błąd_dopasowania
                        najlepsze_dopasowane_zdarzenia = dopasowane_zdarzenia
                        najlepsza_ścieżka = scieżka
                        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_najle
```

Listing 3.4. Obliczanie metryk dla jednego procesu

3.4.0.5. Wyszukiwanie w modelu procesów o określonej długości

Algorytm rekurencyjny. Implementacja różni się w zależności od przeszukiwanej bramki logicznej.

3.4.0.6. Obliczanie dopasowania

Pomysł zaczerpnięty z algorytmu Needlessmann-Wunsch [5], 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.

3.4.0.7. Znajdowanie ścieżki w modelu

Potrzebne do obliczenia precyzji oraz generalizacji.

```
def get_all_n_length_routes(self, n: int, process) -> []:
    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

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

    for i in range(1, m):
        if should_go_recurrent(model[i-1]):
            al_mat[i], model_results_local[i] :=
            dopasowanie_rekurencyjne(macierz_rozwiazań[i - 1], model[i - 1],
                                     [x for x in substrings_of_string_reversed(log)], i)
        elif len(model[i-1]) > 1:
            al_mat[i], model_results_local[i] :=
            dopasowanie_równoległe(macierz_rozwiazan[i - 1], model[i - 1],
                                   [x for x in substrings_of_string_reversed(log)], kara, i)
        else:
            macierz_rozwiazań[i][0] := macierz_rozwiązań[i-1][0] + kara['PRZERWA']
            dopasowanie(macierz_rozwiazań, model[i - 1], log, kara, i, n)

    ścieżka := znajdź_ściezkę(al_mat, kara['PRZERWA'], model,
    log, model_results_local)

    return macierz_rozwiązań[m-1], model_results
```

Listing 3.6. Obliczanie dopasowania

```
def znajdź_sciezkę(macierz_rozwiązań, model, log, rozwiązania_podmodeli):
    sciezka = []
    while i != 0:
        event_group_full_length = len(model[i - 1])
        if model_results_local[i] is not None:
            matched_flag = False
            if array[i][j] == array[i - 1][j] + event_group_full_length * penalty_gap:
                [model_result.append(None) for _ in range(event_group_full_length)]
                array[i][j] = 0
                i -= 1
            else:
                for k in range(j):
                    processes = get_not_none(model_results_local[i][k]
                    [len(model_results_local[i][k]) - (j-k)], log)
                    if array[i][j] == array[i - 1][k] +
                        (event_group_full_length + (j-k) - 2 * len(processes)) * penalty_gap:
                        [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(event_group_full_length - len(processes))]
                        array[i][j] = 0
                        i -= 1
                        j = k
                        matched_flag = True
                        break

                if not matched_flag:
                    if array[i][j] == array[i][j - 1] + penalty_gap:
                        array[i][j] = 0
                        j -= 1
        else:
            if array[i][j] == array[i - 1][j] + kara:
                model_result.append(None)
                array[i][j] = 0
                i -= 1
            elif array[i][j] == array[i][j - 1] + kara:
                array[i][j] = 0
                j -= 1
            elif array[i][j] == array[i - 1][j - 1]:
                model_result.append(model[i-1])
                log = log.replace(model[i-1].name, "", 1)
                array[i][j] = 0
                i -= 1
                j -= 1
    return sciezka
```

Listing 3.7. Znajdowanie ścieżki w modelu

3.4.0.8. Cache

Wiele obliczeń się powtarza, dlatego żeby przyspieszyć działanie rezultaty są cachowane w dwóch miejscach: Cache genotypów, dostarczane przez Cache obliczeń dopasowanie, które jest najbardziej kosztownym obliczeniem. Wybrane metodę cachowania LRU.

3.5. Wybór parametrów algorytmu

4. Dyskusja rezultatów

4.1. Przykładowe wyniki

4.2. Porównanie z innymi algorytmami

4.3. Wyniki w zależności od przyjętych metryk

4.4. Wnioski

5. Podsumowanie

Bibliografia

[1] John R. Koza. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992. ISBN: 0262111705.

[2] 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*. eprint: *https://doi.org/10.1142/S0218843014400012*.

[3] Michael Fenton i in. „PonyGE2". W: *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion* (2017). DOI: *10.1145/3067695.3082469*.

[4] 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 Bellahsène i Michel Léonard. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, s. 465–479. ISBN: 978-3-540-69534-9.

[5] 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*.