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 8

2. Wstęp teoretyczny 9

2.1. Procesy biznesowe 9

2.1.1. Procesy biznesowe 9

2.1.2. Zarządzanie procesami biznesowymi 11

2.2. Eksploracja procesów 12

2.2.1. Modelowanie procesów biznesowych 12

2.2.2. Eksploracja procesów 14

2.2.3. Dzienniki zdarzeń 15

2.2.4. Automatyczne odkrywanie procesów biznesowych 16

2.3. Ewolucja genetyczna 17

2.3.1. Algorytmy genetyczne 17

2.3.2. Ewolucja genetyczna a inne algorytmy uczenia maszynowego 18

2.3.3. Ewolucja gramatyczna 18

2.4. Gramatyka 19

2.4.1. BNF 19

2.4.2. Tworzenie gramatyki pod kątem ewolucji 19

2.5. Metryki 19

2.5.1. Metryki a funkcja dopasowania 19

2.5.2. Dodatkowa metryka - złożoność 19

2.5.3. Metryki - szczegóły 20

2.5.4. Obliczanie metryk 21

3. Projekt i implementacja 23

3.1. Wykorzystane technologie 23

3.1.1. Python 3.8.1 23
3.1.2. PonyGE2 23
3.2. Tworzenie gramatyki procesu biznesowego 23
3.3. Projekt systemu 26
3.4. Implementacja 29
3.5. Wybór parametrów algorytmu 40
4. Dyskusja rezultatów 43
4.1. Przykładowe wyniki 43
4.2. Porównanie z innymi algorytmami 43
4.3. Wyniki w zależności od przyjętych metryk 43
4.4. Wnioski 43
5. Podsumowanie 45

1. Wprowadzenie

1.1. Zarys tematyki pracy

Zdefiniowanie kroków potrzebnych do osiągnięcia danego efektu jest konieczne do zrozumienia podejmowanych działań i wprowadzenia ewentualnych udoskonaleń. Z czasem biznes zdał sobie z tego sprawę i kierując się zasadą: „Jeżeli nie jesteś w stanie opisać czegoś jako proces, nie masz pojęcia, co robisz", firmy zaczęły podejmować próby uporządkowania i zamknięcia swoich działań w ramy, co doprowadziło do wzrostu popularności procesów biznesowych.

Identyfikacja i opis procesów biznesowy sprawia, że wszystkie operacje w firmie stają się przejrzyste i łatwiejsze do zrozumienia. Analiza procesów biznesowych może pozwolić na zwiększenie produktywności oraz redukcję kosztów. Procesy biznesowe mogą pozwolić na przewidywanie przyszłych zdarzeń na podstawie danych, znajdowanie wąskich gardeł, a także zmniejszają zależność firm od poszczególnych ludzi.

W związku z możliwością gromadzenia coraz większej ilości danych, a także chęcią ich wykorzystania oraz rosnącą popularnością analizy danych (*eng. data science*), biznes zdał sobie sprawę z możliwości wykorzystanie technologii informatycznych w kontekście procesów biznesowych. Zapoczątkowało to powstanie na pograniczu zarządzania procesami biznesowymi i metod informatycznych używanych do analizy danych, wśród wielu innych, dziedziny zwanej eksploracją procesów (*eng. process mining*).

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 działanie 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

W każdym dużym przedsiębiorstwie, każdego dnia, wykonywana jest ogromna ilość czynności koniecznych do funkcjonowania tej organizacji. Ludzie oraz systemy podejmują najróżniejsze działania związane z różnymi, często nie mającymi wiele wspólnego zadaniami jak chociażby procesowanie płatności, składnie zamówień, wytwarzanie produktów czy ich transport. Przykłady te można mnożyć w zależności od sektora w jakim obraca się dana firma. Im jest ona większa, tym trudniej jest osobom zarządzającym zrozumieć i opisać poszczególne czynności. W pewnym momencie, kiedy ilość rożnych zadań rośnie do setek czy tysięcy staje się to niemożliwe i potrzebny jest sposób na zebranie wiedzy o pojedynczych operacjach i zamknięcie ich w uporządkowaną strukturę. Stąd narodził się pomysł na wykorzystanie wykorzystanie procesów biznesowych.

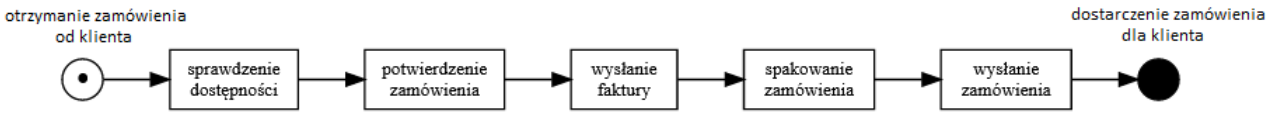
Procesy biznesowe opisują zbiór aktywność, które podejmuje grupa podmiotów w celu osiągnięcia celu biznesowego. W literaturze brakuje jednej ogólnie przyjętej definicji procesu biznesowego. W latach 90. XX wieku proponenci BPR, czyli Przeprojektowania procesów biznesowych (*eng. Business process re-engineering*) starali się sprecyzować pojęcie procesu biznesowego. W książce „Process Innovation: Reengineering Work through Information Technology"[1] określono termin ten jako „Ustrukturyzowany, mierzalny zbiór działań, których celem jest wytworzenie określonego produktu dla określonego klienta lub rynku". Autor położył nacisk na zbiór kroków prowadzących do celu, raczej niż na końcowy efekt. W dalszej części autor pisze „Proces jest zatem określonym uporządkowaniem czynności roboczych w czasie i przestrzeni, z początkiem i końcem oraz jasno określonymi wejściami i wyjściami: strukturą działania.". Inni pionierzy BPR Michael Hammer i James Champy zaproponowali podejście „Proces biznesowy to zbiór działań, który pobiera jeden lub więcej rodzajów danych wejściowych i tworzy wynik, który ma wartość dla klienta"[2]. Autorzy dają większą dowolność, co do definicji procesu, nie wspominając o konieczności jego logicznej organizacji czy mierzalności. Z kolei Jacobson zupełnie pomija konieczność zamknięcia procesu w jakiekolwiek ramy: „Zestaw czynności wewnętrznych wykonywanych w celu obsługi klienta"[3]. Nacisk na konieczność odniesienia procesów do wymiernych środków firmy widzimy w definicji: „Procesy biznesowe są aktywną częścią biznesu. Opisują funkcje

firmy i obejmują zasoby, które są używane, przekształcane lub wytwarzane. Proces biznesowy to abstrakcja, która pokazuje współpracę między zasobami i transformację zasobów w biznesie. Podkreśla, w jaki sposób wykonywana jest praca, zamiast opisywać produkty lub usługi wynikające z tego procesu."[4]. Szczególnie ważny jest tutaj fragment o transformacji zasobów, gdyż każe on rozumieć poszczególne aktywności w procesie jako powiązane ze sobą i kończące się namacalnymi rezultatami. Definicja „Proces biznesowy to seria kroków mających na celu wytworzenie produktu lub usługi. W wyniku niektórych procesów produkt lub usługa jest odbierana przez zewnętrznego klienta organizacji. Nazywamy te podstawowe procesy. Inne procesy wytwarzają produkty, które są niewidoczne dla klienta zewnętrznego, ale są niezbędne do efektywnego zarządzania firmą. Nazywamy te procesy wsparcia"[5] wprowadza rozgraniczenie na podtypy procesów. Ważnym jest jednak że nie jest koniecznością, aby rezultaty procesu były widoczne na zewnątrz organizacji. Warto też zaznaczyć, że procesy biznesowe nie dotyczą jednej osoby czy nawet działu, a raczej udział w nich bierze wiele ludzi, maszyn czy systemów z różnych działów połączonych celem dostarczenia wspólnej wartości biznesowej.

Powyższe definicji skupiają się na delikatnie odmiennych aspektach procesów biznesowych, nie zawsze szczegółowo wspominając o innych. Starając się usystematyzować powyższe sformułowania, chcąc zbudować bazę do dalszej analizy tematu, można przyjąć, że procesy biznesowe charakteryzują:

- Określony cel, którym jest wytworzenie wartości dla klienta zewnętrznego lub pośrednio firmy - klienta wewnętrznego. Jednak warto jeszcze raz zaznaczyć ze proces biznesowy skupia się na sposobie osiągnięcia celu, a nie opisie celu samego w sobie.
- Dyskretny, jasno zdefiniowany i identyfikowalny zbiór aktywności.
- Jasno określony początek - wejście i koniec - wyjście.
- Zależność przyczynowo-skutkowa pomiędzy kolejnymi procesami.

Żeby lepiej zilustrować czym jest proces biznesowy, poniżej znajduje się prosty przykład często spotykanego procesu. Oczywiście, prawdziwy proces będzie składał się z o wiele większej liczby aktywności.



Rys. 2.1. Przykład prostego procesu

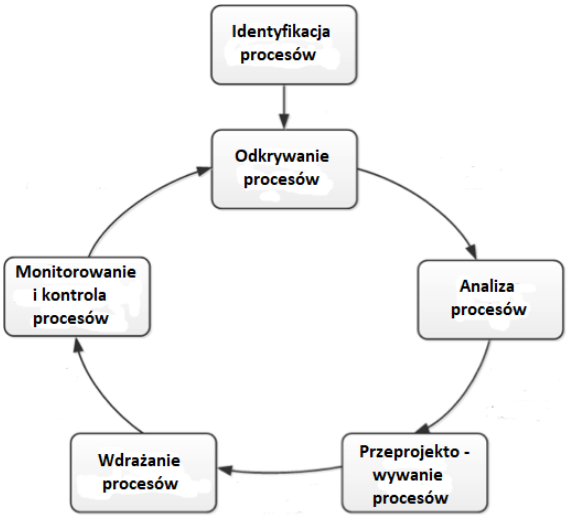
Zauważmy, że mamy jasno zdefiniowany wejście - otrzymanie zamówienia od klienta oraz wyjście, kiedy dostarczamy oczekiwaną wartość dla klienta, a całość składa się z serii tworzących logiczną całość aktywności. Aktywności są konkretnie zdefiniowane. Standardem jest definiowanie aktywności w formie równoważników zdań.

2.1.2. Zarządzanie procesami biznesowymi

Zdefiniowanie proces biznesowego otwiera wiele możliwości analizy działań przedsiębiorstwa i w skutek tego wprowadzanie usprawnień. Dziedziną, która się tym zajmuje jest zarządzanie procesami biznesowymi (*eng. Business process modeling*) zwane w skrócie BPM. Sercem jest proces, a samo BPM jest dyscypliną używającą różne metody, technik i sposobów w celu projektowania, wprowadzania w życie, zarządzania i analizy procesów biznesowych [6].

Celem stosowania metod zarządzanie procesami biznesowym jest udoskonalanie procesów w danej organizacji biznesowej. Udoskonalanie może być rozumiane jako w różnoraki sposób w zależności od kierunku rozwoju firmy. Może to być na przykład redukcja czasu, kosztów, czy dostarczanie lepszego produktu końcowy. Ważnym jest aby było to podejście całościowe i odnosiło się do całego zbioru aktywności w ramach danego procesu. Usprawnianie pojedynczej aktywności to nie BPM. Patrząc na przykład powyżej, jeśli wprowadzilibyśmy usprawnienia w ramach wysyłania faktury, robiąc to elektronicznie zamiast tradycyjną poczta, mimo że taka zmiana przyniosłaby poprawę wydajności, nie mielibyśmy do czynienia z zarządzaniem procesami biznesowymi. O BPM moglibyśmy mówić, gdybyśmy znaleźli sposób, żeby przeprojektować cały proces tak, żeby wysyłanie faktury nie było potrzebne lub odwrotnie, jeśli dodalibyśmy nowe aktywność, która usprawniłaby proces jako całość czy nawet zmieli kolejności zdań w procesie, gdyż zmiany w ramach poszczególnych, jednostkowych aktywności nie są konieczne, żeby ulepszyć proces jako całość [7].

Zarządzanie procesami biznesowymi jest zbiorem praktyk, działań mających na celu udoskonalanie procesów. Trzeba więc rozumieć BPM jako pojęcie abstrakcyjne, jednak szczególnie w dzisiejszym świecie, zarządzanie procesów biznesowych nie może się obyć bez wsparcia ze oprogramowania czy technik znanych z różnych dziedzin informatyki [8]. Na lepsze zrozumienie czym zajmuje się zarządzanie procesami biznesowymi oraz w jaki sposób możemy zastosować informatykę, a w szczególności eksplorację procesów w tej dziedzinie, może pozwolić definicja cyklu życia procesu biznesowego.



Rys. 2.2. Cykl życia procesu biznesowego

Cykl życia procesu biznesowego (*eng. Business process lifecycle*) przedstawiono na rys. 2.3 [9]. Jest to zbiór kroków niezbędnych do skutecznego zarządzania procesami biznesowymi. W celu dostosowania do zmieniającej się rzeczywistości, poszczególne kroki powinny być co pewien czas powtarzane.

Konieczność powtarzania elementów cyklu życia procesu biznesowego sygnalizuje przewagę komputerów i algorytmów nad wykonywaniem tych operacji przez człowieka. Metody informatyczne są stosowane, na każdym z wymienionych etapów. W szczególności dane zebrane w wyniku monitorowania procesów dają nam możliwość zastosowania metod z zakresu eksploracji procesów (sekcja 2.2). Praca skupia się w głównej mierze na odkrywaniu procesów, czyli znajdowaniu istniejących już procesów na podstawie realny danych. Należy zaznaczyć, że identyfikacja polega na ogólnym rozpoznaniu i nazwaniu zachodzących procesów, podczas gdy odkrywanie jest bardziej szczegółowe, a w jego wyniku otrzymujemy dokładny model.

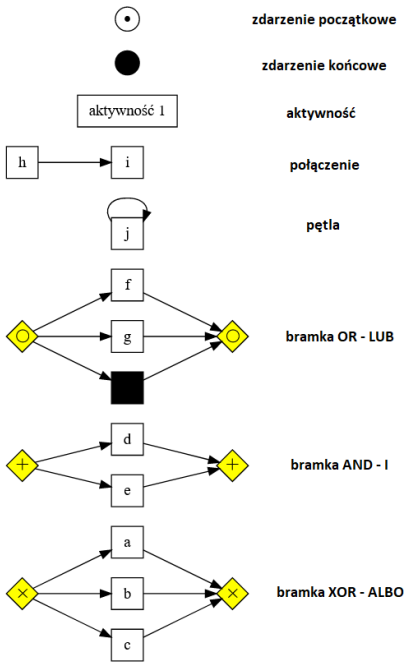
2.2. Eksploracja procesów

2.2.1. Modelowanie procesów biznesowych

Na rys. 2.1 przedstawiono przykład uproszczonego procesu biznesowego. Łatwo sobie wyobrazić, że proces ten w rzeczywistości może być znacznie bardziej skomplikowany. Część aktywności może być wykonywana równolegle, niektóre zdarzenia w ogóle nie zaistnieją lub będą występować kilkukrotnie w ramach jednego procesu.

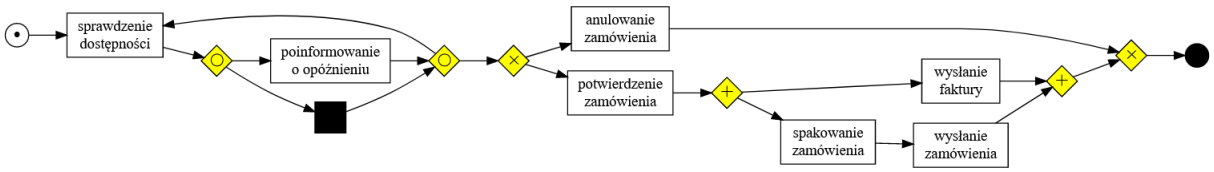
W sytuacji, w której zamówiony przez klienta towar będzie niedostępny, logiczne wydaje się poinformowanie go o opóźnieniu oraz danie mu możliwości anulowanie zamówienia lub jego kontynuacja i ponowne sprawdzenie dostępności. Ponadto, czynności takie jak wysłanie faktury oraz spakowanie i wysłanie zamówienia mogą być wykonane w dowolnej kolejności czy nawet jednocześnie przez dwie różne osoby. Proces staje się bardziej skomplikowany i konieczna do stworzenia jego modelu jest bardziej złożona notacja niż użyta do przedstawienia prostego procesu. Istnieje wiele notacji do modelowania procesów biznesowych, wśród nich można wymienić schematy blokowe, diagramy aktywności UML, łańcuchy procesu sterowanego zdarzeniami (*eng. Event-driven Process Chains*), sieci Petriego [10]. Obecnie najpopularniejszą notacją używaną do opisu procesów biznesowych jest Business Process Model and Notation, w skrócie BPMN [11]. Daje ona możliwość opisania w jednoznaczny sposób skomplikowanych procesów czy stworzenia diagramów współdziałania procesów, jednocześnie pozostając łatwą do zrozumienia.

Na grafice poniżej przedstawiono notację opartą o elementy BPMN, używaną w dalszej części pracy. Składają się na nią zdarzenia początkowe i końcowe, połączenia, bramki logiczne oraz aktywności, gdzie czarnym kwadratem oznaczono sytuację, w której żadna aktywność nie jest wykonywana, możliwe tylko w bramce LUB.



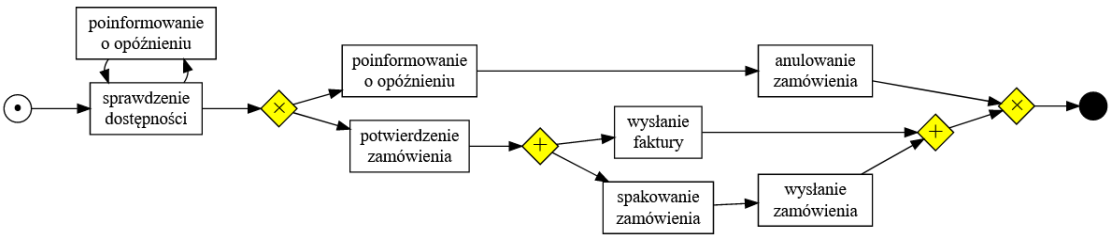
Rys. 2.3. Elementy BPMN

Korzystając z tej notacji, można przedstawić opisany wcześniej proces. Na rys. 2.4 widać model po modyfikacjach.



Rys. 2.4. Rozbudowany model procesu - przykład 1

Możliwe jest teraz poinformowanie klienta o opóźnieniu, a następnie anulowanie zamówienia lub powtórne sprawdzenie dostępności. Model ten jednak nie jest wystarczająco precyzyjny i pozwala na potwierdzenie zamówienia po informacji o jego opóźnieniu, a bez uprzedniego ponownego sprawdzenia dostępności. Można zaproponować inny model (rys. 2.9), który rozwiązuje powyższe problemy, jednak aktywność - poinformowanie o opóźnieniu - występuje na nim dwukrotnie, co jest niepożądane i pogarsza jego czytelność.



Rys. 2.5. Rozbudowany model procesu - przykład 2

Ponadto, w pewnych przypadkach klient może mieć możliwość rezygnacji z zamówienia bez ówczesnego informowania go o opóźnieniu, a z czego nie zdawano sobie sprawy, wtedy konieczne może być stworzenie zupełnie innego modelu. Aby radzić sobie z tymi problemami powstał szereg zestawów wytycznych, którymi warto się kierować modelując procesy biznesowe. Wśród takich zasad można wymienić: zminimalizuj liczbę elementów w modelu, zminimalizuj liczbę ścieżek w modelu, używaj jednego zdarzenia początkowego i jednego końcowego, unikaj bramek LUB - OR , zdekomponuj model zawierający więcej niż 50 elementów [12].

Modelowania procesów biznesowych jest próbą stworzenia uproszonej wersji rzeczywistości na podstawie przewidywań i założeń. Modele dają abstrakcję, użyteczne przybliżenie rzeczywistości, jednak należy pamiętać, że „Wszystkie modele są błędne" i rzeczywisty proces najprawdopodobniej będzie różnił się od nawet najlepszego modelu.

2.2.2. Eksploracja procesów

W dzisiejszych czasach standardem jest, że organizacje biznesowe korzystają z systemów informatycznych, takich jak chociażby systemy ERP czy CRM, wspierających ich działalność. Systemy te rejestrują dane o procesach, które wspierają. Dane te mogą być później analizowane i wykorzystane do wprowadzenie usprawnień w działaniu firmy.

Tradycyjne metody są wolne, kosztowne i narażone na błędy ludzkie a konieczność ich ciągłego powtarzania, połączone z wszechobecnym trendem automatyzacji obecnym w biznesie sprawiają, że eksploracja procesów zyskuje na znaczeniu [13]. Ważna jest możliwość szybkiej adaptacji do zmian, automatyzacja pozwala na wykonywanie powtarzalny zmian i ograniczenia błędów.

Jest to szeroko pojęta dziadzina, która zawiera różne aplikacje metoda informatyki do procesów. Jest wartościowym dodatkiem do innych metod eksploracji danych, gdyż daje pełniejszy obraz zamiast skupiać się pojedynczym rezultacie końcowym i tworzyć predykcje, celem jest zrozumienie całej procesu i akcji, które prowadzą do końcowego rezultatu. Jest ot trudniejsze, ale jakże cenne z punktu widzenia biznesowego, gdyż jakakolwiek zmiana w trakcie procesu może sprawić, że przewidywania będą kompletnie trafione, a zrozumienie całego procesu pozwala na pełniejszy obraz i łatwiejsze dostosowanie do zmian.

Ponadto, procesy biznesowe są często rozumiane przez analityków i metoda na łatwe odniesienie się do oczekiwań biznesowych i stworzenie ścisłych, powtarzalnych i sprawdzalnych ram na dziedzinie, która w większości opierała się na czarnej magii, bullshicie i coachingowy bredniach jest nad wyraz cenne. Eksploracja procesów biznesowych oparta jest na danych i nie ma w niej dużo miejsca na przypuszczenia i domysły.

Podsumowując, eksploracja procesów to techniki, narzędzia i metody odkrywania, monitorowania i usprawniania rzeczywistych procesów poprzez wiedzę wyodrębnioną z dzienników zdarzeń powszechnie dostępnych w systemach informacyjnych [14][15]. Wyróżnia się 3 podkategorie:

- automatyczne odkrywanie procesów

- sprawdzanie zgodności (*eng. conformance checking*)

- udoskonalanie procesu (*eng. performance mining*)

2.2.3. Dzienniki zdarzeń

Danymi wejściowymi dla algorytmów z dziedziny eksploracji procesów są dzienniki zdarzeń, inaczej zwane logami.

nr przypadku	aktywność	data	osoba wykonująca	zakładany czas wykonania
1	zgłoszenie problemu - a	2021.02.03 20:29:38	tester	6.5 dnia
1	programowanie (development) - b	2021.02.04 12:31:25	programista 1	6.5 dnia
2	zgłoszenie problemu - a	2021.02.05 19:13:32	klient	5.5 dnia
2	analiza - c	2021.02.06 02:43:09	analityk	5.5 dnia
2	programowanie (development) - b	2021.02.07 01:37:13	programista 2	5.5 dnia
2	testowanie - d	2021.02.08 12:43:45	tester	5.5 dnia
3	zgłoszenie problemu - a	2021.02.09 15:39:42	tester	4.5 dnia
3	development - b	2021.02.10 15:36:21	programista 1	4.5 dnia
1	analiza - c	2021.02.11 12:31:43	analityk	6.5 dnia
1	programowanie (development) - b	2021.02.12 00:01:54	programista 2	6.5 dnia
1	testowanie - d	2021.02.13 21:35:39	tester	6.5 dnia
4	zgłoszenie problemu - a	2021.02.14 09:23:59	tester	3.5 dnia
5	zgłoszenie problemu - a	2021.02.15 16:37:13	analityk	2.5 dnia
3	analiza - c	2021.02.16 02:29:56	analityk	4.5 dnia
3	programowanie (development) - b	2021.02.17 09:48:51	programista 1	4.5 dnia
3	testowanie - d	2021.02.18 20:50:28	tester	4.5 dnia
4	analiza - c	2021.02.19 15:48:37	analityk	3.5 dnia
4	programowanie (development) - b	2021.02.20 21:29:16	programista 1	3.5 dnia
4	sprawdzenie kodu (review) - e	2021.02.21 04:22:30	programista 2	3.5 dnia
5	uznanie problemu za rozwiązany - f	2021.02.22 06:28:29	programista 2	2.5 dnia
5	testowanie - d	2021.02.23 08:36:07	tester	2.5 dnia
4	testowanie - d	2021.02.24 21:17:54	tester	3.5 dnia

Rys. 2.6. Przykład dziennika zdarzeń

W kontekście odkrywania procesów biznesowych ważne są dla nas tylko zdarzenia i kolejność ich wykonywania. Przyjmuje się, że aby mówić o dzienniku zdarzeń powinien on zawierać 3 informacje: numer przypadku, czyli unikalny identyfikator zbioru aktywności, nazwę poszczególnych aktywności oraz datę jej wykonania - ważną tylko w kontekście kolejności wykonywania pojedynczych aktywności. Ponadto może on zawiera inne zbędne w kontekście odkrywania procesów biznesowych dodatkowa informacje, takie jak: podmiot wykonującym daną aktywność, miejsce, koszt czy aktualny postęp wykonania. Oczywiście te pozostałe dane mogą być wykorzystywane w kolejnych etapach analizy i usprawniania procesu.

Mając do dyspozycji te 3 informacje - poszczególne przypadki, aktywności na nie się składające oraz ich kolejność, zliczamy jak często poszczególne aktywności występują w danej kolejności. Każdy tak przypadek zwany jest wariantem. Ponadto musimy wiedzieć jak często dany wariant wystąpił.

Dla poprawy czytelności aktywności często reprezentowane są jako symbole, np. kolejne litery alfabetu, zamiast pełnej nazwy.

nr wariantu	ilość wystąpień	kolejność aktywności
1	2	a,b,c,b,d
2	1	a,c,b,d
3	1	a,c,b,e,d
4	1	a,f,d

Rys. 2.7. Przykład wariantów procesu

2.2.4. Automatyczne odkrywanie procesów biznesowych

Automatyczne odkrywanie procesów biznesowych jest podgrupą i obejmuję techniki przekształcania danych w procesy. Ważne, że proces już istnieje, a my tylko go odkrywamy. Wejściem jest dziennik zdarzeń, a wyjściem jest mapa procesu lub model procesu.

Procesy zaprojektowane nie zawsze są realizowane w praktyce. Ważne jest, żeby proces był oparte tam analizie prawdziwych danych, a nie spekulacjach i założeniach. Pozwala na znajdowanie procesu takim jaki jest, a nie takim jakim chciano by, żeby był.

Rys. 2.8. Proces rzeczywisty i pierwotnie zakładany

Celem automatycznego odkrywania procesów biznesowych jest zaprojektowanie funkcji - algorytmu, która przekształci dane z dziennika zdarzeń w model procesu [16]. Istnieje wiele algorytmów do odkrywania procesów biznesowych. Wśród najpopularniejszych można wymienić:

- Alpha algorithm [17]
- The ILP Miner [18]
- Heuristic Miner [19]
- Multi-phase Miner [20]
- Inductive Miner [21]

Istnieją 4 powszechnie używane kryteria do określanie jak dobry jest otrzymany model. Są to:

- odwzorowanie (*eng. fitness*) - zgodność modelu z dziennikiem zdarzeń

- prostota (*eng. simplicity*) - złożoność i łatwość zrozumienia modelu.
- precyzja (*eng. precision*) - brak zachowań niezwiązanych z logiem, a możliwych w modelu
- generalizacja (*eng. genralization*) - odzwierciedlenie w modelu prawdopodobnych aktywności, mimo że nie znajdują się one w logu.

Koniecznym jest znalezienie balansu między nimi, gdyż często starając się poprawiać model pod kontem jednego kryterium, pogorszy się on pod względem innych. Powstało wiele metryk przedstawiających te kryteria za pomocą wzorów matematycznych [22] [23]. Bardziej szczegółowo wybór metryk omówiono w sekcji 2.5

Wśród istniejących algorytmów mogą pojawić się problemy ze współbieżnością, możliwością pomijania aktywności, czy reprezentowania duplikatów, nie radzeniem sobie z zakłócenia w logu, tworzeniem zbyt skomplikowanych modeli, czy z odwzorowaniem niektórych zachowań. Modele stworzone mogą mieć zła strukturę Oparte na directly follows graphs przez co problemem może być kiedy log jest niekompletny. Wciąż nie istnieje algorytm idealny, a te wymienione wyżej posiadają wady. Tworzą modele, które nie są spójne strukturalnie, czyli Algorytmy genetyczne do automatycznego odkrywania procesów biznesowych mogą być odpowiedzią na te problemy. Takie podejście pozwala na wyeliminowanie część problemów często dotyczących innych metod. Ponadto każdy algorytm ma swoje ograniczenia a algorytmy genetyczne pozwalają na pełną dowolność Pozwala na duża zdolność manipulacji, dobierania parametrów do tego co chcemy, wymyślania nowych. Można dodać tyle i takich metryk jakie chcemy, ustawić sobie różne wartości. Algorytmy klasyczne mają problem z uzyskanie dobrych rezultatów dla wszystkich metryk i nie posiadają możliwości zmiany parametrów startowych.

2.3. Ewolucja genetyczna

2.3.1. Algorytmy genetyczne

[24] Algorytmy genetyczne są inspirowaną selekcją naturalną heurystyką, która używa znanych z ewolucji biologicznej operacji jak mutacja, selekcja czy krzyżowanie do rozwiązywania problemów wyszukiwania i optymizacji. Ich ideą jest zaproponowanie metody przeszukiwania przestrzeni losowy rozwiązań w celu wyszukania najlepszych z nich. Pierwszy raz zostały zaproponowane w [25].

Sposób działania algorytmów genetyczny polega na stworzeniu populacji losowych rozwiązań zwanych genotypami lub chromosomami, które kodowane są za pomocą licz całkowitych i zapisywane ww tablicy jednowymiarowej. Następnie dla każdego elementu populacji obliczana jest funkcja dopasowania (*eng. fitness function*) pozwalająca ocenić jak dobre jest wygenerowane rozwiązanie. Po sklasyfikowaniu rozwiązań generujemy nową populację mutując lub krzyżując głownie choć nie tylko najlepsze chromosomy. Proces ten jest powtarzany do momentu otrzymania satysfakcjonującego rozwiązania.

Utrzymywanie populacji rozwiązań fajna sprawa i pozwala na szerze zbiór rozwiązań. 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 umożliwiająca 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 łatwe 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 punkowa - dowolna wartość w tablicy zostaje zmieniona na inną losową wartość. Pozostałe produkcje pozostają niezmienione.

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.

Algorytmy genetyczne w praktyce

2.3.2. Ewolucja genetyczna a inne algorytmy uczenia maszynowego

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

Obejrzeć filmik na mlst.

2.3.3. Ewolucja gramatyczna

Ewoluuje gramatykę za pomocą metod ewolucji genetycznej w celu znalezienia programu, który najlepiej rozwiązuje problem. Podejście to zostało zaproponowane w [24].

2.4. Gramatyka

2.4.1. BNF

Backus-Naur from jest notacją używaną do kodowaniu gramatyk bezkontekstowych.

Gramatyka bezkontekstowa -

Gramtyka G=(N,Σ,P,S) -

2.4.2. 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 rozwiązaniami. 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 <e> = aSe | b <S> = + | -

<e> = aee | b | + | -

Produkcja 1:

<e> -> aSe -> a+e -> a+b Produkcja 2: <e> -> aee -> a+e -> a+b

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

2.5. Metryki

2.5.1. Metryki a funkcja dopasowania

Dobra funkcja dopasowania powinna spełniać kilka założeń, których nie wzięto pod uwagę tworząc metryki.

Ostatecznie funkcja dopasowania w naszym algorytmie jest średnią ważoną metryk, gdzie użytkownik może określić z jakimi waga wziąć pod uwagę poszczególnych przystosowanych metryk. Oprócz tego dodano kolejną metrykę złożoność.

Ponadto wszystkie metryki powinny być przeskalowane jeśli to konieczne do przedziału od 0 do 1, co jest standardem i sprawia, że łatwiej je porównywać i na nich operować.

2.5.2. Dodatkowa metryka - złożoność

Dodatkowa metryka nie jest potrzebna, zawiera redundantne informacje, jednak istnieją teoretyczne przesłanki, że powinna wpłynąć pozytywnie na rozwiązania znajdowane przez algorytm. Ideą jest promowanie rozwiązywania prostych problemów w prosty sposób. Chcemy unikać lokalnych maksimów

np. sytuacji, w której znajdziemy model, który

2.5.3. Metryki - szczegóły

2.5.3.1. Prostota

Najprostsza z metryk. Celem jest zmniejszenie skomplikowania. Głównym czynnikiem wpływającym na skomplikowanie jest ilość aktywności w modelu. Idealna jest sytuacja, w której model ma tyle samo aktywności ile unikalnych aktywności jest w dzienniku zdarzeń. To nie zawsze jest możliwe, jednak chcąc otrzymać maksymalnie czytelny model powinniśmy do tego dążyć. Stąd też metryk wybrana skupia się na dwóch czynnikach, czyli ilości duplikatów w modelu i ilości brakujących wartości w modelu. Oczywiście znaczenie ma wielkość modelu, dlatego wartości tego musimy odnieść do ilości wszystkich zdarzeń w logu i modelu. Ostatecznie metrykę wyrażono wzorem:
$M_{pro} = 1 - \frac{ilosc\ duplikatow\ w\ modelu + ilosc\ brakujacych\ zdarzen\ w\ modelu}{ilosc\ unikalnych\ zdarzen\ w\ logu + ilosc\ zdarzen\ w\ modelu}$

2.5.3.2. Odwzorowanie

Jest to najbardziej kosztowna obliczeniowo metryka. Pozostałe metryki obliczane są na podstawie tej metryki. Ważnym jest, żeby liczyć to częściowa, a sama metryka, żeby była maksymalnie wrażliwa na zmiany. Można by zastosować prostą metrykę zero-jedynkową, sprawdzającą czy model zgadza się z wariantem logu czy nie, jednak szczególnie w przypadku algorytmu genetycznego nie sprawdzalibyśmy jak bardzo zbliżamy się do celu i praktycznie opieralibyśmy się na losowaniu dopóki nie trafimy. Przy procesie z wieloma aktywnością niezgadzających się kilka kreatywności nie stworzyć dużego błędu, gdzie model zero-jedynkowy zrobiłby to, dlatego podniesiono do potęgi 4 , żeby zrobić metrykę bardziej wrażliwą na zmiany. Ostatecznie metrykę wyrażono wzorem:
$M_o = (1 - \sum_{procesy\ w\ logu} \frac{blad\ odwzorowania\ logu\ w\ modelu}{minimalna\ dugosc\ sciezki\ w\ modelu + dugosc\ sciezki\ w\ logu})^4$

2.5.3.3. Precyzja

Unikanie niewystarczającego dopasowania (*eng. underfitting*). Chcemy uniknąć tworzenia modeli, w której możliwe są dowolne zachowania. Można by osiągnąć maksymalne wartości pozostałych metryk tworząc jednak bramkę or zawierającą wszystkie aktywności, jednak oczywistym jest, że nie jest to model, które oddaje rzeczywistość. We wzorze skupiono się na ilości osiągalnych zdarzeń następujących po danej aktywności, możliwych w modelu. Chcemy żeby poszczególne aktywności mogły być tylko następowane przez te które naprawdę są po nich. Do potęgi 1/3, bo oryginalna metryka zienia się zbyt łatwo przez co jest nieproporcjonalna do zmian innych metryk i łatwo wpaść w lokalne maksimum, gdzie każda mała zmiana będzie wpływać na ogromną zmianę w metryce. Ostatecznie metrykę wyrażono wzorem:
$M_{pre} = (1 - \sum_{zdarzenia\ w\ modelu} \frac{ilosc\ osiagalnych\ zdarzen\ w\ modelu - ilosc\ osiagalnych\ zdarzen\ w\ logu}{ilosc\ osiagalnych\ zdarzen\ w\ modelu})^{\frac{1}{3}}$

2.5.3.4. Generalizacja

Unikanie nadmiernego dopasowania (*eng. overfitting*) W pierwszej chwili może wydawać się przeciwieństwem precyzji, dobrym przykładem żeby to zwizualizować jest plama albo to z przetwarzania obrazów, chcemy wypełnić zagłębienia jednocześnie nie pozwalając na rozszerzenie. Można to osiągnąć poprzez wzięcie średniej ważonej liczby przejścia w logu przez dane zdarzenie, co sprawia, że wciąż zachowujemy ścieżki, które są często odwiedzane przez inne warianty, mimo że pozwalają na zachowanie niewidoczne w dzienniku zdarzeń, nie pozwalając na na tworzenie ścieżek, które nie pokrywają się z żadnymi ścieżkami. Wzięto także pierwiastek, gdyż od pewnego wykonywanie ścieżki wielokrotnie nie jest tak cenne jak wykonywanie jej, bo już wiemy, że jest ona ok. Metrykę zapożyczono z [26]. Ostatecznie metrykę wyrażono wzorem:

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

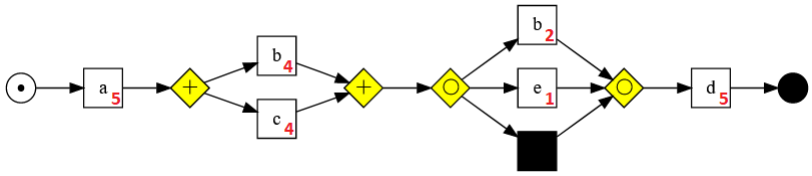
2.5.3.5. Złożoność

Postanowiono powiązać złożoność z odwzorowaniem, czyli kiedy odwzorowanie rośnie pozwalamy na tworzenie bardziej skomplikowanego modelu. Złożoność jest wyrażana jako ilość możliwych ścieżek w modelu. Jako, że np. dla bramki I jest to n! zauważamy, że złożoność rośnie niewspółmiernie szybciej do odwzorowania, dlatego pierwiastek ze złożoności. Ostatecznie metrykę wyrażono wzorem:

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

2.5.4. Obliczanie metryk

W sekcji 2.2.3 przedstawiono przykład dziennika zdarzeń i warianty procesu obliczone dla niego. Weźmy pod uwagę model - na czerwono zaznaczono ilość wykonań danej aktywności:



Rys. 2.9. Model, dla którego obliczane są metryki

i obliczmy dla niego metryki.

$$M_{pro} = 1 - \frac{1+1}{6+6} = 0.8333$$

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

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

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

$$M_g = 1 - \frac{(\frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{1}{\sqrt{4}} + \frac{1}{\sqrt{4}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{1}} + \frac{1}{\sqrt{5}})}{6} = 0.3997$$

Pewną słabością tej metryki jest to, że wpływa na nią rozmiar dziennika zdarzeń. Jeśli ilość rekordów jest mała, jak w powyższym przykładzie, to generalizacja będzie słaba. Starając się znaleźć najlepszy

model używamy zawsze tego samo logu, więc nie wpływa to na prawidłowość rozwiązania.

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

3. Projekt i implementacja

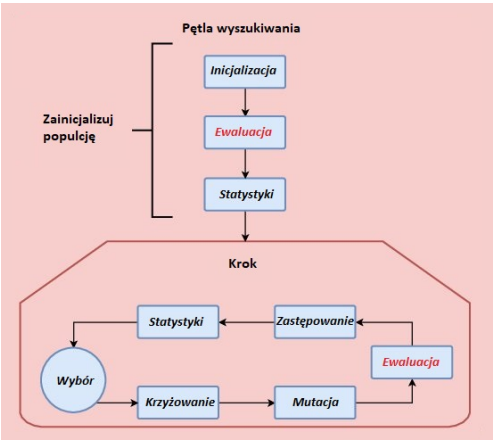
3.1. Wykorzystane technologie

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 [27] jest implementacja ewolucji genetycznej w języku Python. Pozwala na łatwa konfiguracje parametrów ewolucji genetycznej oraz możliwość dodania własnych problemów oraz sposobów ewaluacji wyników.



Rys. 3.1. Pętla wyszukiwania

3.2. Tworzenie gramatyki procesu biznesowego

Zgodnie z zaprezntowanymi wcześniej zasadmi odnośnie jak poiwnien wygladac midel zdecowydowano sie na W wykorzystanie gramryec postawioneo się zdecydować na soundness, czyli bramki zamknięte, jeden event ckończowyco pozwala na tworzenie, brak bramek ktore nie sa domkniete./ Pozwala

to zredukowac przestrzen roziwazan jednoczesniej tworzac rzowiazania, ktore na pewno nie generuja bledow. Łatwe mapowanie na BPMN. Przy tworzeniu gramatyki procesu biznesowego ważnym jest, żeby znaleźć balans, jeśli chodzi o poziom skomplikowania zaproponowanej gramatyki. W pracy [28] 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, 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

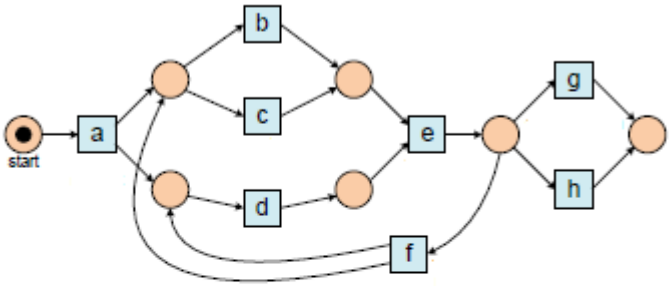
Przykład wygenerowanej gramatyki: and({d}opt({f})and({a}{c})lop(seq(lop({a}){e})))

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

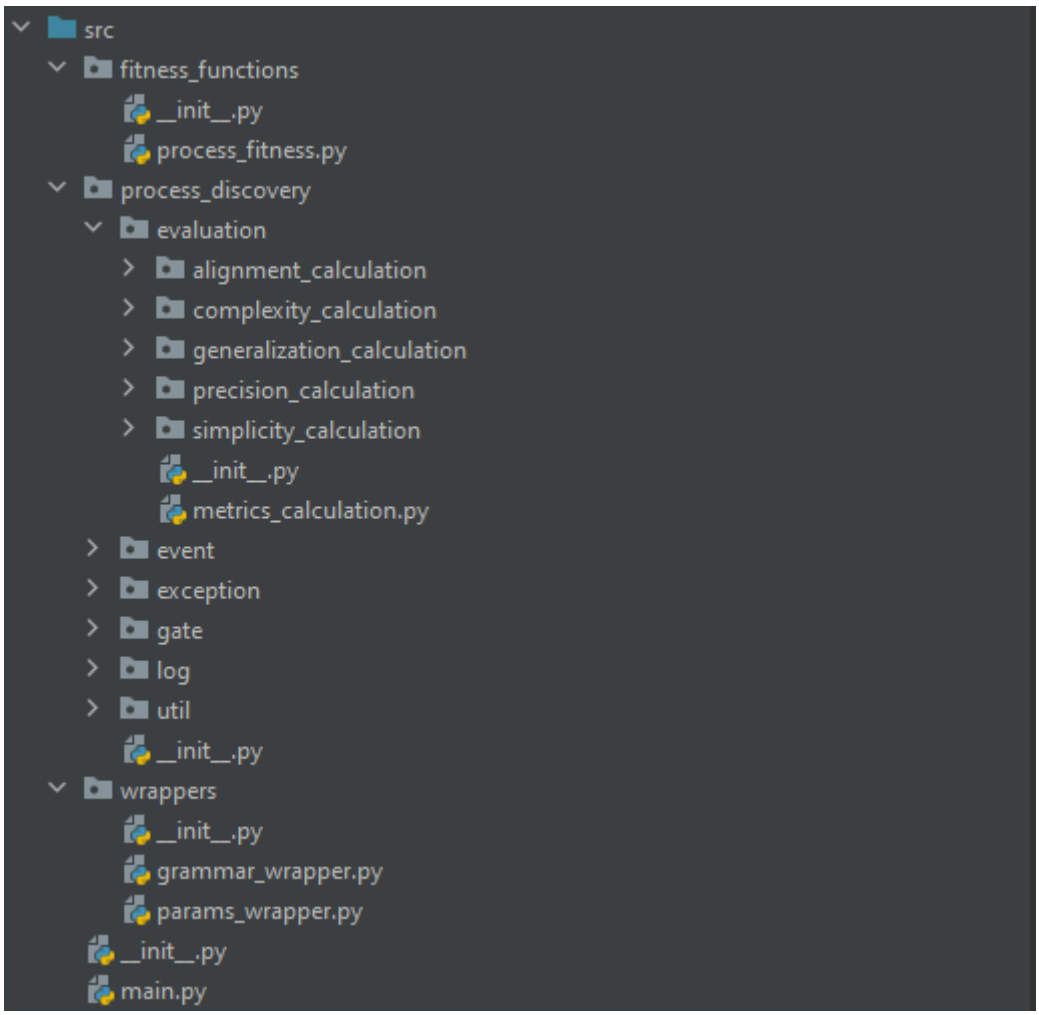
3.3.0.1. Podział na moduły

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 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. dorzucic nazwe jakiegos design patternsa

– fitness_functions - zawiera klasę bazowy moduł, gdzie znajduje się bazowa klasa dla obliczania metryk

– process_discovery - moduł zawiera całą logikę obliczenia metryk

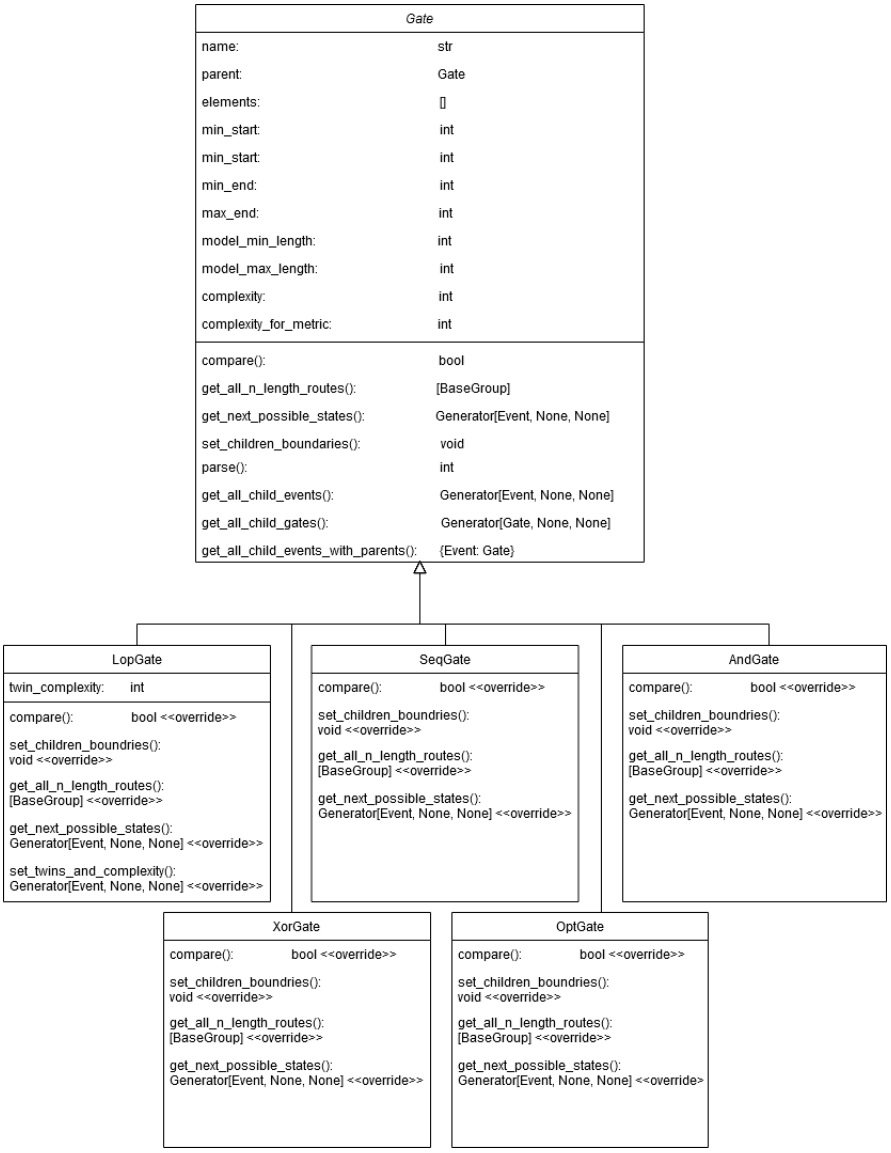


Rys. 3.3. Podział na moduły

3.3.0.2. Model

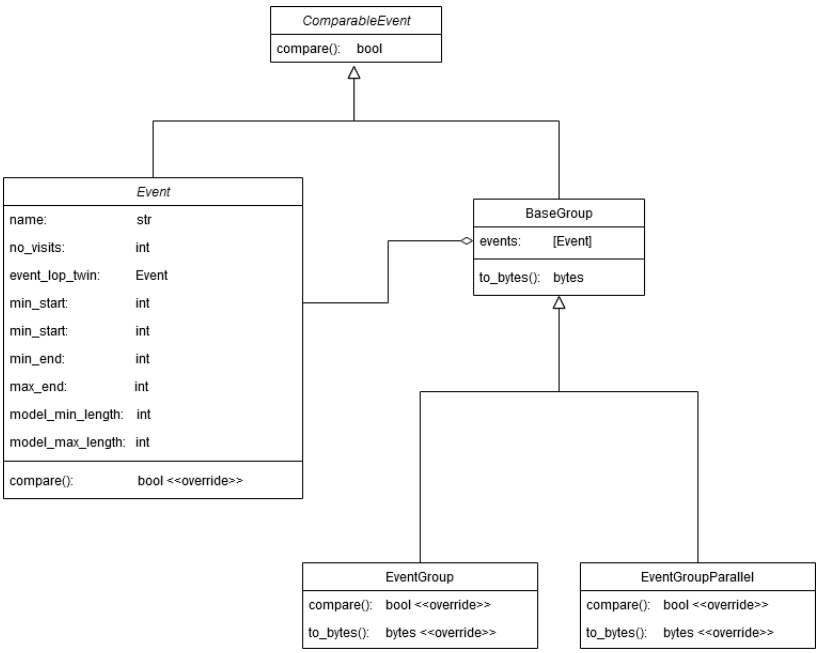
Podział na dwie klasy przydatne na różnym etapie procesowania:

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

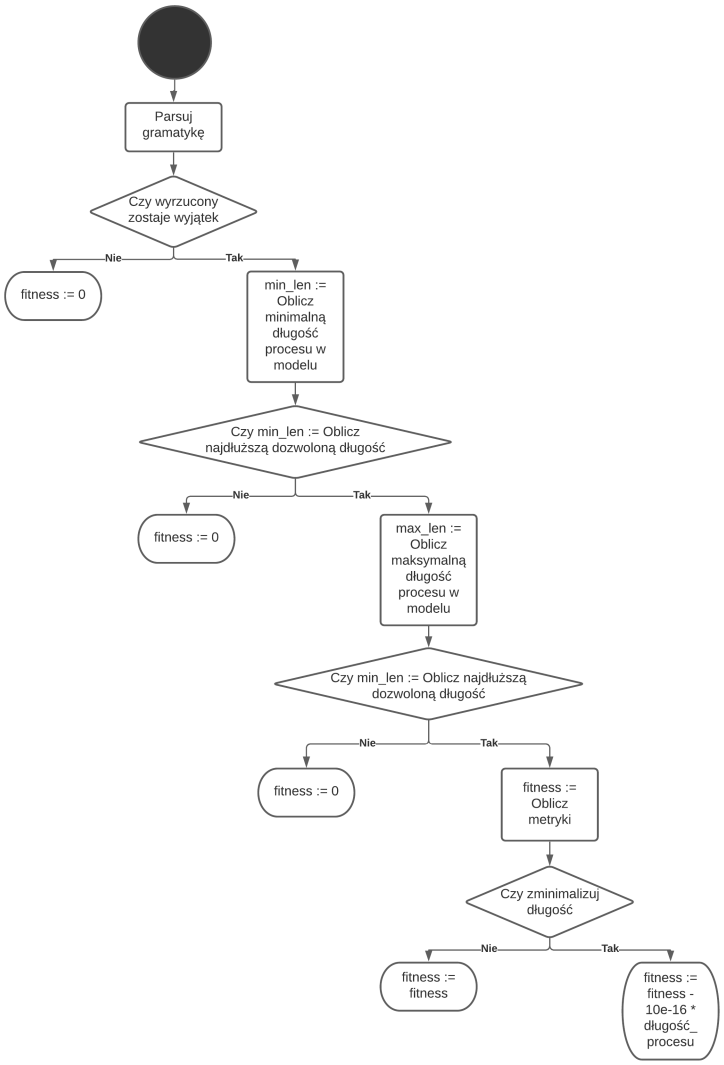
EventGroup: Obliczanie metryk dla klasy Gate byłoby utrudnione z uwagi na duża ilość bramek logicznych Takie modularne podejście pozwala na dodanie nowych bramek logiczny bez konieczności zmieniana metody obliczanie dopasowania, która jest najbardziej złożonym algorytmem występującym w programie.



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. To na tym etapie

odrzucamy też procesy, które mimo, że gramatyka pozwala na ich stworzenie inie moją sensu z punktu biznesowego, co pozwala na ograniczenie zasobów i nie przeliczanie dalszych rzeczy dla procesow, ktore sa bezwartosciowe. Odrzucamy procesy, ktore

```
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:])
                if self.name == "seq" or self.name == "lop":
                   if int(wyrażenie[i+2]) <= długpść(gate.elementy):
                      for x in gate.elementy[int(wyrażenie[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(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 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 znajduję 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 = obilcz_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_średnią_ważoną_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. W tym celu, co pozwolilo usprawnic caly proces

```
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_osiągnięty and górny_limit_osiągnięty):
      if n >= min(oblicz_maksymalną_dozwoloną_długość(długość_procesu),
                  długość_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(długość_procesu),
                  długość_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:
         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 lista_ścieżek_do_obliczenia
            posortowane_ścieżki := posortuj lista_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. Najprawdopodobn iejsze jest, ze najlepiej dopasowana sciezka bedzie miala dlugosc jak wejscie w logu dlatego zaczyna od tej dlugosci. 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 Needlessmann-Wunsch [29], 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):
    błąd := {'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
    # Wypelnij osie macierzy właściwymi wartościami
    for j in range(n):
        macierz_rozwiązań[0][j] := błąd['PRZERWA'] * j

    for i in range(1, m):
        if should_go_recurrent(model[i-1]):
            macierz_rozwiązań[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_rozwiązań[i], najlepiej_dopasowana_ścieżka_podmodelu[i] :=
            dopasowanie_równoległe(macierz_rozwiazan[i - 1], model[i - 1],
                                   [x for x in odwrócone_substringi(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(macierz_rozwiązań, błąd['PRZERWA'], model,
    log, najlepiej_dopasowana_ścieżka_podmodelu)

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

Listing 3.6. Obliczanie dopasowania

3.4.0.7. Znajdowanie ścieżki w modelu

Potrzebne do obliczenia precyzji oraz generalizacji. Z wzgledu na zmiany

```
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['PRZERW
                        [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 znacząca 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 duża 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. Ilość parametrów wymagana przez ponyGE2 jest duża, dodatkowo tworząc mimo, że starano się ograniczyć możliwość konfiguracji, która nie daje dużo korzyści do minimum tworząc aplikacje dodano kilka innych niezbędnych parametrów. Z tego powodu, poniżej przedstawiono i krótko omówiono niezbędne do działania aplikacji parametry.

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	adceh
144	abdeh
111	acdeg
82	adceg
56	adbeh
47	acdefdbeh
38	adbeg
33	acdefbdeh
14	acdefbdeg
11	acdefdbeg
9	adcefcdeh
8	adcefdbeh
5	adcefbdeg
3	acdefbdefdbeg
2	adcefdbeg
2	adcefbdefbdeg
1	adcefdbefbdeh
1	adbefbdefdbeg
1	adcefdbefcdefdbeg
1391	

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] Thomas H Davenport. *Process innovation: reengineering work through information technology*. Harvard Business Press, 1993.

[2] Michael Hammer i James Champy. „Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution". W: *Business Horizons* 36.5 (1993), s. 90–91. ISSN: 0007-6813. DOI: *https://doi.org/10.1016/S0007-6813(05)80064-3*.

[3] Ivar Jacobson, Maria Ericsson i Agneta Jacobson. *The Object Advantage: Business Process Reengineering with Object Technology*. USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1994. ISBN: 0201422891.

[4] Hans-Erik Eriksson i Magnus Penker. *Business Modeling With UML: Business Patterns at Work*. 1st. USA: John Wiley i Sons, Inc., 1998. ISBN: 0471295515.

[5] Geary A. Rummler i Alan P. Brache. *Improving performance: how to manage the white space on the organization chart*. Jossey-Bass, 1995.

[6] Wil Aalst. „Business Process Management Demystified: A Tutorial on Models, Systems and Standards for Workflow Management". W: t. 3098. Sty. 2003, s. 1–65. ISBN: 978-3-540-22261-3. DOI: *10.1007/978-3-540-27755-2_1*.

[7] Nathaniel Palmer. *What is BPM?*

[8] Wil Aalst. „Aalst, W.M.P.: Business process management: a comprehensive survey. ISRN Softw. Eng. 1-37". W: *ISRN Software Engineering* (sty. 2012), ??–?? DOI: *10.1155/2013/507984*.

[9] M. Dumas i in. *Fundamentals of Business Process Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783642331435.

[10] Jan Recker i in. „Business Process Modeling- A Comparative Analysis". W: *Journal of the Association of Information Systems* 10 (kw. 2009). DOI: *10.17705/1jais.00193*.

[11] OMG. *Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0*. Object Management Group, 2011.

[12] Jan Mendling, H.A. Reijers i Wil Aalst. „Seven Process Modeling Guidelines (7PMG)". W: *Information and Software Technology* 52 (lut. 2010), s. 127–136. DOI: *10.1016/j.infsof.2009.08.004*.

[13] Marc Kerremans. „Market Guide for Process Mining". W: *Gartner* (kw. 2018).

[14] Wil Aalst i in. „Process Mining Manifesto". W: t. 99. Sierp. 2011, s. 169–194. ISBN: 978-3-642-28107-5. DOI: *10.1007/978-3-642-28108-2_19*.

[15] Wil Aalst. „Process Mining: Overview and Opportunities". W: *ACM Transactions on Management Information Systems* 3 (lip. 2012), s. 7.1–7.17. DOI: *10.1145/2229156.2229157*.

[16] Wil M. P. van der Aalst. *Process Mining - Data Science in Action, Second Edition*. Springer, 2016, s. 163–240. ISBN: 978-3-662-49850-7. DOI: *10.1007/978-3-662-49851-4*.

[17] Jan Martijn Van der Werf i in. „Process Discovery Using Integer Linear Programming". W: t. 94. Czer. 2008, s. 368–387. ISBN: 978-3-540-68745-0. DOI: *10.1007/978-3-540-68746-7_24*.

[18] Jan Martijn Van der Werf i in. „Process Discovery Using Integer Linear Programming". W: t. 94. Czer. 2008, s. 368–387. ISBN: 978-3-540-68745-0. DOI: *10.1007/978-3-540-68746-7_24*.

[19] A. Weijters, Wil Aalst i Alves Medeiros. *Process Mining with the Heuristics Miner-algorithm*. T. 166. Sty. 2006.

[20] B Dongen i Wil Aalst. „Multi-phase process mining: Aggregating instance graphs into EPCs and Petri nets". W: *Proceedings of the Second International Workshop on Applications of Petri Nets to Coordination, Workflow and Business Process Management* (sty. 2005).

[21] Raji Ghawi. *Process Discovery using Inductive Miner and Decomposition*. Paź. 2016.

[22] Wil M. P. van der Aalst. „Relating Process Models and Event Logs - 21 Conformance Propositions". W: *Proceedings of the International Workshop on Algorithms & Theories for the Analysis of Event Data 2018 Satellite event of the conferences: 39th International Conference on Application and Theory of Petri Nets and Concurrency Petri Nets 2018 and 18th International Conference on Application of Concurrency to System Design ACSD 2018, Bratislava, Slovakia, June 25, 2018*. Red. Wil M. P. van der Aalst, Robin Bergenthum i Josep Carmona. T. 2115. CEUR Workshop Proceedings. CEUR-WS.org, 2018, s. 56–74.

[23] F. Blum. „Metrics in process discovery". W: 2015.

[24] 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*.

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

[26] 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*.

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

[28] 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.

[29] 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*.