

RISK-AWARE PROJECT SCHEDULING

PROUCT - GRASP

KAROL WAŁĘDZIK



DEFINICJA ZAGADNIENIA

RESOURCE-CONSTRAINED PROJECT SCHEDULING (RCPS)

Table 1
Symbols and definitions

J	:	Number of activities.
M_j	:	Number of modes activity j can be performed in.
d_{jm}	:	Duration of activity j being performed in mode m .
$R(N)$:	Set of renewable (nonrenewable) resources.
\bar{T}	:	Upper bound on the project's makespan.
$K_r^p \geq 0$:	Number of units of renewable resource r , $r \in R$, available in period t , $t = 1, \dots, \bar{T}$.
$K_r^v \geq 0$:	Total number of units available of nonrenewable resource r , $r \in N$.
$k_{jmr}^p \geq 0$:	Number of units of renewable resource r , $r \in R$, used by activity j being performed in mode m each period the activity is in process.
$k_{jmr}^v \geq 0$:	Number of units of nonrenewable resource r , $r \in N$, consumed by activity j being performed in mode m .
$\mathcal{P}_j(\mathcal{S}_j)$:	Set of immediate predecessors (successors) of activity j .
ES_j (EF_j)	:	Earliest start time (finish time) of activity j , calculated by using minimal activity durations and neglecting resource usage (consumption).
LS_j (LF_j)	:	Latest start time (finish time) of activity j , calculated by using minimal activity durations, neglecting resource usage (consumption) and taking into account the upper bound \bar{T} on the project's duration.

RISK-AWARE PROJECT SCHEDULING (RAPS)

- 1 tryb wykonywania zadań
- Czas trwania zadań jako zmienna probabilistyczna o znanym rozkładzie
- Funkcja celu: minimalizacja czasu trwania projektu
- Budżet: zamodelowany przez zasób nieodnawialny

RISK-AWARE PROJECT SCHEDULING (RAPS)

- Ryzyko:
 - rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia (w jednostce czasu)
 - definicja efektów wystąpienia ryzyka:
 - czasowa zmiana dostępnej ilości zasobu odnawialnego
 - drastyczna zmiana czasu trwania zadania
 - ...
 - ryzyko może zrealizować się tylko raz per projekt (ale może być wiele identycznych ryzyk)
 - efekt nie wpływa na zadania w trakcie realizacji w momencie realizacji ryzyka
 - warunki wystąpienia zadania:
 - moment rozpoczęcia danego zadania
 - (w przyszłości potencjalnie kolejne warunki: minimalny / maksymalny dotychczasowy czas trwania projektu, wykonanie / niewykonanie dotychczas danego zadania, ..)

RISK-AWARE PROJECT SCHEDULING (RAPS)

- Odpowiedź na ryzyko:
 - specjalny rodzaj zadania:
 - nie jest niezbędne dla realizacji projektu
 - może (ale nie musi) mieć zerowy czas trwania
 - wymaga zasobów, może mieć poprzedniki (zadania i/lub odpowiedzi na ryzyka)
 - lista efektów:
 - czasowa zmiana ilości zasobu (odnawialnego lub nie)
 - zmiana czasu trwania zadania
 - (w przyszłości potencjalnie: zmiana rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia ryzyka (liniowe przeskalowanie), zmiana wartości nasilenia już występującego ryzyka)
 - efekty nie wpływają na zadania właśnie wykonywane
 - (w przyszłości opcjonalnie: opóźnienie wystąpienia efektów)
 - warunki wykonalności:
 - nierozpoczęcie wykonywania danego zadania
 - (w przyszłości potencjalnie kolejne warunki: minimalne nasilenie występowania danego ryzyka, minimalny/maksymalny czas od początku projektu, wykonanie poprzedników)

RISK-AWARE PROJECT SCHEDULING (RAPS)

- Efekt:
 - rozkład prawdopodobieństwa intensywności
 - rozkład prawdopodobieństwa czasu trwania
 - typ efektu i specyficzne parametry

The image features a white background with decorative elements consisting of multiple parallel lines in a dark red or brown color. On the left side, these lines form a corner shape that extends from the top to the bottom. On the right side, they form a diagonal shape that extends from the bottom towards the top.

INSTANCJE PROBLEMU

BAZA INSTANCI RCPS

- PSPLib
- <http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/main.html>

KONWERSJA DO INSTANCJI RAPS

- Czas trwania zadań – rozkład Beta(3,5)
 - Moda == szacunek punktowy instancji RCPS
 - $P(t \leq 75\% \text{ mody}) \approx 3-5\%$
 - $P(t \geq 150\% \text{ mody}) \approx 3-5\%$

KONWERSJA DO INSTANCJI RAPS

- Ryzyka
 - czasowa niedostępność zasobu
 - jedno ryzyko per każdy zasób odnawialny
 - prawdopodobieństwo wystąpienia == 2% w każdej jednostce czasu
 - natężenie == -1 / -2 z równym prawdopodobieństwem
 - czas trwania == rozkład jednostajny z przedziału [10;30]

KONWERSJA DO INSTANCJI RAPS

- Odpowiedzi
 - czasowe wynajęcie dodatkowego zasobu odnawialnego
 - jedna odpowiedź per każdy rodzaj zasobu odnawialnego
 - dedykowany budżet w wysokości 34% liczby typów zasobów projekcie
 - koszt == 1 jednostka budżetu
 - czas trwania == 8
 - efekt:
 - czasowa zmiana dostępnej ilości zasobu odnawialnego
 - natężenie == 1
 - czas trwania == 40

KONWERSJA DO INSTANCJI RAPS

- Ryzyka

- czasowa niedostępność zasobu nieodnawialnego (spóźniona dostawa, awaria sprzętu)
 - dotyczy 10% najdłuższych zadań projektu transformowanych zgodnie z poniższymi regułami:
 - każde z wybranych zadań zaczyna wymagać dodatkowo 1 jednostki dedykowanego mu zasobu nieodnawialnego
 - do projektu dodawana jest dokładnie 1 jednostka tego zasobu
 - efekt ryzyka: zmniejszenie dostępnej ilości powyższego zasobu o 1
 - prawdopodobieństwo wystąpienia == 2% w każdej jednostce czasu
 - czas trwania == rozkład jednostajny z przedziału [10;30]

KONWERSJA DO INSTANCJI RAPS

- Odpowiedzi
 - czasowa wynajęcie dodatkowego zasobu nieodnawialnego
 - jedna odpowiedź per każdy rodzaj zasobu nieodnawialnego dodanego przy ryzyku
 - dedykowany budżet w wysokości 25% typów tych zasobów projekcie
 - koszt == 1 jednostka budżetu
 - czas trwania == 8
 - efekt:
 - czasowa zmiana dostępnej ilości zasobu nieodnawialnego
 - natężenie == 1
 - czas trwania == 40

KONWERSJA DO INSTANCJI RAPS

- Ryzyka
 - drastyczna zmiana czasu trwania zadania
 - jedno ryzyko dla każdego wybranych zadań (34% wszystkich zadań)
 - prawdopodobieństwo wystąpienia == 15% w momencie rozpoczynania zadania
 - natężenie (mnożnik czasu trwania zadania) == 2
 - czas trwania: nie dotyczy (nieograniczony)
 - realizowalność: tylko w momencie rozpoczynania zadania

KONWERSJA DO INSTANCJI RAPS

- Odpowiedzi
 - zwiększenie kapitału zaangażowanego w zadanie
 - jedna odpowiedź per każde zadanie zagrożone ryzykiem drastycznego wydłużenia czasu
 - dedykowany budżet w wysokości 15% sumarycznego oczekiwanego czasu realizacji ryzykownych zadań w projekcie
 - koszt == 1 per jednostka oczekiwanego skrócenia czasu zadania
 - czas trwania == 0
 - wykonalność: do momentu rozpoczęcia wykonywania zadania (wyłącznie)
 - efekt:
 - zmiana czasu trwania zadania
 - natężenie (mnożnik czasu realizacji zadania) == 0.66
 - czas trwania: nie dotyczy (nieograniczony)

HEURISTIC SOLVER

HEURYSTYCZNE ROZWIĄZYWANIE RAPS

HEURYSTYCZNE ROZWIĄZYWANIE RCPSP

- *Parallel Schedule Generation Scheme*
 - dla każdego kolejnego punktu czasowego:
 - określ zbiór D zadań, które mogą legalnie zostać rozpoczęte w tym momencie (uwzględniając zarówno wymagane poprzedniki, jak i zasoby)
 - powtarzaj dopóki zbiór D nie jest pusty:
 - wybierz spośród nich zadanie o najwyższym priorytecie
 - (korzystając z heurystyki priorytetyzującej)
 - zaplanuj rozpoczęcie wybranego zadania w analizowanym punkcie czasowym
 - uaktualnij ilość dostępnych zasobów, przelicz zawartość zbioru D

ANALIZA ŚCIEŻKI KRYTYCZNEJ

- Analiza na bazie zależności zadań, bez uwzględnienia zasobów:
 - w przód:
 - wyznaczenie dla każdego zadania ES (*early start*) i EF (*early finish*)
 - wstecz (na bazie poprzedniej):
 - wyznaczenie dla każdego zadania LS (*late start*) i LF (*late finish*)
- Zapas czasu dla zadania (*slack*): $S = LF - EF = ES - LS$
- Ścieżka krytyczna: zadania, dla których $S = 0$

HEURYSTYCZNE REGUŁY PRIORYTETYZUJĄCE

- Proste reguły:
 - najdłuższe zadanie
 - min. LF
 - min. LS
 - min. S
 - suma czasu realizacji zadania i bezpośrednich następników
 - liczba bezpośrednich i pośrednich następników zadania

RAPS HEURISTIC SOLVER (HS)

- w kolejnych punktach czasowych:
 - sprawdź, czy jest to punkt decyzyjny
 - jeśli tak: wygeneruj nowy plan realizacji projektu
 - wybierz zadania do realizacji na podstawie planu
 - przejdź do kolejnego punktu czasowego

RAPS HEURISTIC SOLVER (HS)

- W każdym punkcie decyzyjnym:
 - skonstruuj plan realizacji projektu:
 - wygeneruj do 32 potencjalnych planów:
 - plan składa się z odpowiedzi na ryzyka do wykonania natychmiast i harmonogramu zadań
 - w ramach generowania każdego z planów:
 - wybierz losowo realizowalny podzbiór legalnych odpowiedzi na ryzyka (uwzględniając wpływ odpowiedzi na wykonalność kolejnych) oraz heurystykę priorytetyzującą
 - (unikając powtórzeń wybranych kombinacji)
 - stwórz deterministyczny model projektu (RCP) na bazie wartości oczekiwanych rozkładów czasu trwania zadań i aktualnego stanu zasobów (uwzględnij aktualne efekty ryzyk i odpowiedzi na nie)
 - wygeneruj plan za pomocą PSGS z wybraną heurystyką
 - wybierz najkrótszy plan jako aktualny

RAPS HEURISTIC SOLVER (HS)

- Realizacja planu:
 1. jeśli to możliwe, rozpocznij pierwsze zadanie w planie
 2. znajdź w planie pierwsze realizowalne zadanie o zaplanowanym czasie startu nie późniejszym niż 2 jednostki od aktualnego punktu czasowego
 3. jeśli brak takiego zadania, zakończ obsługę aktualnego punktu czasowego
 4. rozpocznij wykonywanie zadania
 5. wróć do punktu 2

RAPS HEURISTIC SOLVER (HS)

- Warunki uznania punktu czasowego za punkt decyzyjny:
 - brak aktualnego planu
 - pierwsze zadanie w planie opóźnione o więcej niż 2 jednostki
 - pojawienie się nowego efektu ryzyka w poprzedniej jednostce czasowej
 - zakończenie się efektu w poprzedniej jednostce czasowej
 - opóźnienie startu pierwszego zadania w planie o więcej niż 2 jednostki czasu
 - pojawienie się nowej, nigdy wcześniej nie rozważanej, legalnej odpowiedzi na ryzyko



GRASP

STOCHASTIC RCPSP

- Wersja RCPSP ze stochastycznym czasem trwania zadań
 - ale: brak uwzględnienia ryzyk
- Zaplanowanie z góry harmonogramu niemożliwe
- Zatem: alternatywna postać rozwiązania:
 - polityka planowania / realizacji kolejnych zadań

JOB-BASED POLICY

Stochastic Parallel Schedule Generation Scheme

- Uszeregowanie zadań
 - np. za pomocą funkcji priorytetyzującej
- W każdym punkcie decyzyjnym rozpoczynane są wszystkie legalne zadania w kolejności wynikającej z uszeregowania
 - Konsekwencja: każda permutacja zadań jest legalną polityką
 - punkt decyzyjny – zwykle $t=0$ oraz momenty zakończenia każdego z zadań

ACTIVITY-BASED POLICY

Stochastic Serial Schedule Generation Scheme

- Jak *job-based* z dodatkowym warunkiem:
 - zadanie nie może być rozpoczęte dopóki nie zostały rozpoczęte wszystkie zadania wcześniejsze w szeregu
 - konsekwencja: istnieją permutacje nie będące poprawną polityką
 - (przy braku zadań o zerowym czasie trwania dozwolone są tylko permutacje spełniające warunek topologicznego posortowania zadań)
- Odporna na anomalie Grahama
 - np. wydłużenie czasu trwania projektu w wyniku skrócenia czasu trwania zadania

GRASP

- Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
- Iteracyjny algorytm z trzema fazami każdej iteracji:
 - konstrukcją polityki (rozwiązania)
 - lokalną optymalizacją rozwiązania
 - weryfikacją jakości uzyskanego rozwiązania za pomocą symulacji

GRASP

```
EliteSet =  $\emptyset$ 
while TerminationCriterion not met do
   $L = \text{BuildActList}(\text{EliteSet})$ 
   $s^* = s(\mathbf{d}^*, \Pi(L))$ 
   $s^* = \text{LocalSearch}(s^*)$ 
   $L = \text{ScheduleToList}(s^*)$ 
  Evaluate the activity-based policy  $\Pi(L)$ 
  if  $L$  is better than the worst solution  $L'$  in EliteSet then
    EliteSet =  $(\text{EliteSet} \setminus L') \cup L$ 
  end if
end while
Return the best solution found
```

BUILDACTLIST

```
 $i = 0$ ; EligibleSet = {0}; nit = 0
while  $i < n$  do
  if nit = 0 then
    reference = SelectSolution
    if reference  $\neq$  "LFT", "random" then
      nit  $\in$  [nitmin ; nitmax]
    end if
  else
    nit = nit - 1
  end if
  Select an activity  $j$  from EligibleSet according to the reference
   $L(i) = j$ ;  $i = i + 1$ 
end while
Return the activity list  $L$ 
```

SELECTSOLUTION

```
Draw  $p \in [0; 1]$ 
if  $p < p_{LFT}$  then
    reference = "LFT"
else if  $p < p_{LFT} + p_{Random}$  then
    reference = "random"
else
    A reference solution is randomly drawn from EliteSet
    if  $p < p_{LFT} + p_{Random} + p_{Inverse}$  then
        reference = inv(reference)
    end if
end if
Return reference solution
```


LOCALSEARCH

- *Double justification*
 - (podwójna justyfikacja?)
 - Algorytm:
 - zaplanuj wszystkie zadania tak późno, jak to możliwe w nierosnącej kolejności ich czasów zakończenia
 - na podstawie tego nowego harmonogramu zaplanuj zadania najwcześniej jak to możliwe w niemalejącej kolejności ich czasów rozpoczęcia
- Dodatkowo: możliwe krzyżowanie polityk przed i po optymalizacji

WERYFIKACJA ROZWIĄZANIA

- Weryfikacja polityki *activity-based* w algorytmie stochastycznym za pomocą symulacji Monte-Carlo
 - Możliwe wykorzystanie *Descriptive Sampling*



GRASP w RAPSP

GRASP w RAPSP

- Zastosowanie analogiczne jak PSGS w Heuristic Solverze
- W kolejnych punktach czasowych:
 - sprawdź, czy jest to punkt decyzyjny
 - jeśli tak: wygeneruj nową politykę realizacji projektu
 - wybierz zadania do realizacji na podstawie planu
 - przejdź do kolejnego punktu czasowego

GRASP W RAPSP

- W każdym punkcie decyzyjnym:
 - skonstruuuj politykę realizacji projektu:
 - wygeneruj do 16 potencjalnych planów:
 - polityka składa się z odpowiedzi na ryzyka do wykonania natychmiast i uszeregowania zadań
 - w ramach generowania każdej z polityk:
 - wybierz losowo realizowalny podzbiór legalnych odpowiedzi na ryzyka (uwzględniając wpływ odpowiedzi na wykonalność kolejnych)
 - wygeneruj politykę za pomocą GRASP
 - wybierz najkrótszy plan jako aktualny

GRASP W RAPSP

- Warunki uznania punktu czasowego za punkt decyzyjny:
 - brak aktualnej polityki
 - pojawienie się nowego efektu ryzyka w poprzedniej jednostce czasowej
 - zakończenie się efektu w poprzedniej jednostce czasowej
 - pojawienie się nowej, nigdy wcześniej nie rozważanej, legalnej odpowiedzi na ryzyko

GRASP w RAPSP

- Dodatkowe możliwości



- reużywanie w kolejnych punktach decyzyjnych rozwiązań wzorcowych (*EliteSet*)

- wymagana, oczywiście, korekta:

- usunięcie zadań już zrealizowanych
- prewencyjne zwiększenie oszacowanych długości, żeby uniknąć zdominowania przez nie projektu



- wykorzystanie dodatkowych heurystyk oprócz LFT

The image features decorative lines in the corners. In the top-left, there are three parallel lines forming a right-angled shape. In the bottom-right, there are three parallel lines forming a diagonal shape.

PROUCT

PROACTIVE SCHEDULING WITH UCT

PROUCT

- Planowanie:
 - na początku działania algorytmu
 - po wystąpieniu *wyzwalacza planowania*
- Dostępny jest *solver* rozwiązujący problem RCPS bez odpowiedzi na ryzyka
 - z ryzykami lub bez
 - z deterministycznym lub stochastycznym czasem trwania zadań

PROUCT

- Algorytm planowania:
 - UCT w zastosowaniu do niedeterministycznej gry jednoosobowej
 - możliwe ruchy:
 - wykonanie odpowiedzi na ryzyko
 - *noop*
 - *Noop* powoduje uruchomienie solvera dla problemu uwzględniającego efekty odpowiedzi na ryzyka i realizację projektu do momentu wystąpienia *wyzwalacza planowania*
 - Reprezentacja stanu jak w BasicUCT

PROUCT

- Algorytm planowania:
 - efekt działania UCT:
 - lista odpowiedzi na ryzyko do podjęcia w danej chwili
 - uaktualnione przy okazji symulacji statystyki czasów zadań
 - potencjalnie w przyszłości także kosztów
 - faktyczny harmonogram tworzony przez *solver* na bazie danych z UCT
 - projekt realizowany do czasu kolejnej rundy planowania
- Wyzwalacze etapu planowania:
 - jak w HS
 - upływanie zadanej liczby jednostek od ostatniego etapu planowania

SOLVERY

1. Heuristic Solver

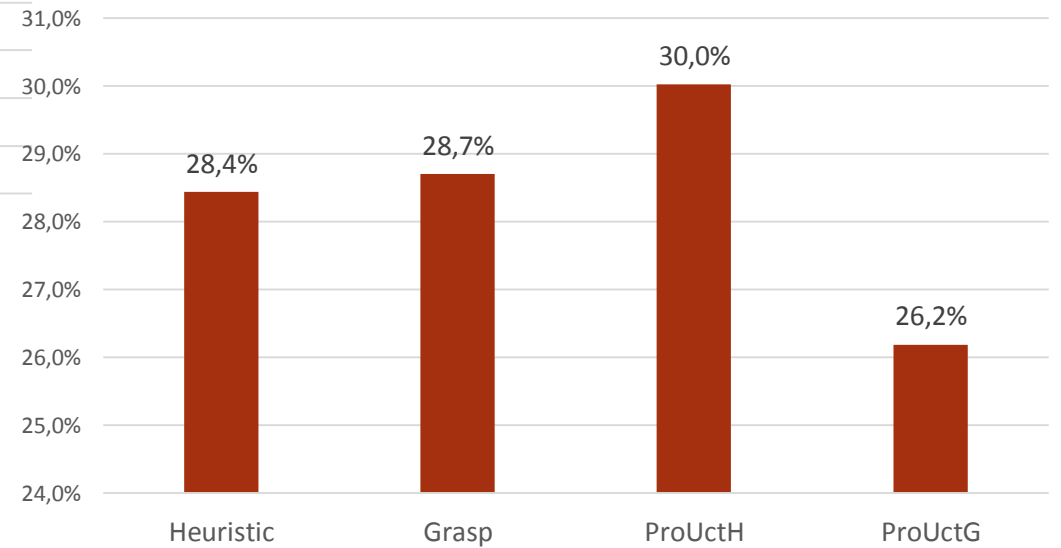
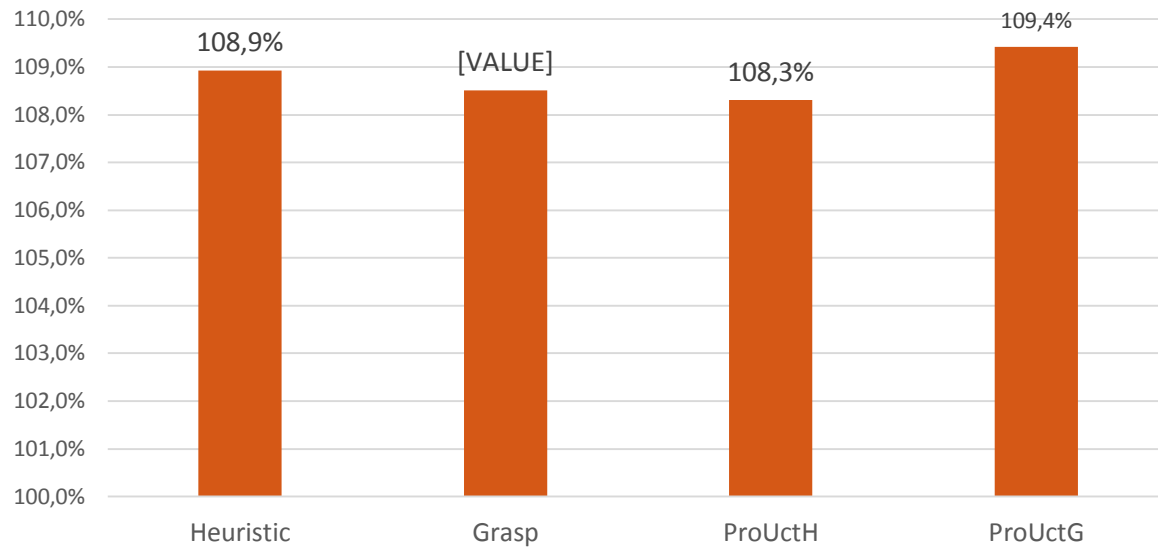
- z wyłączoną obsługą odpowiedzi na ryzyka

2. GRASP

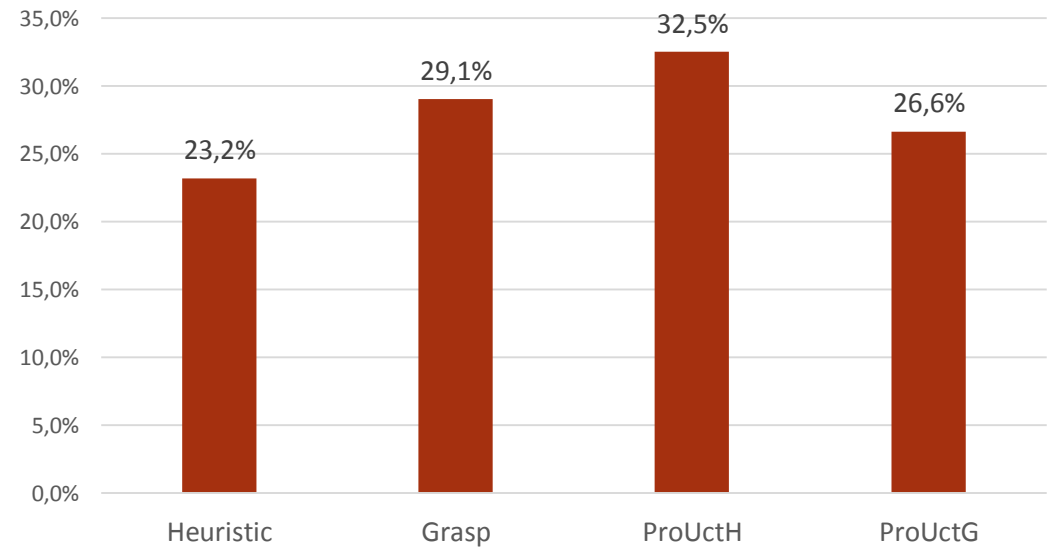
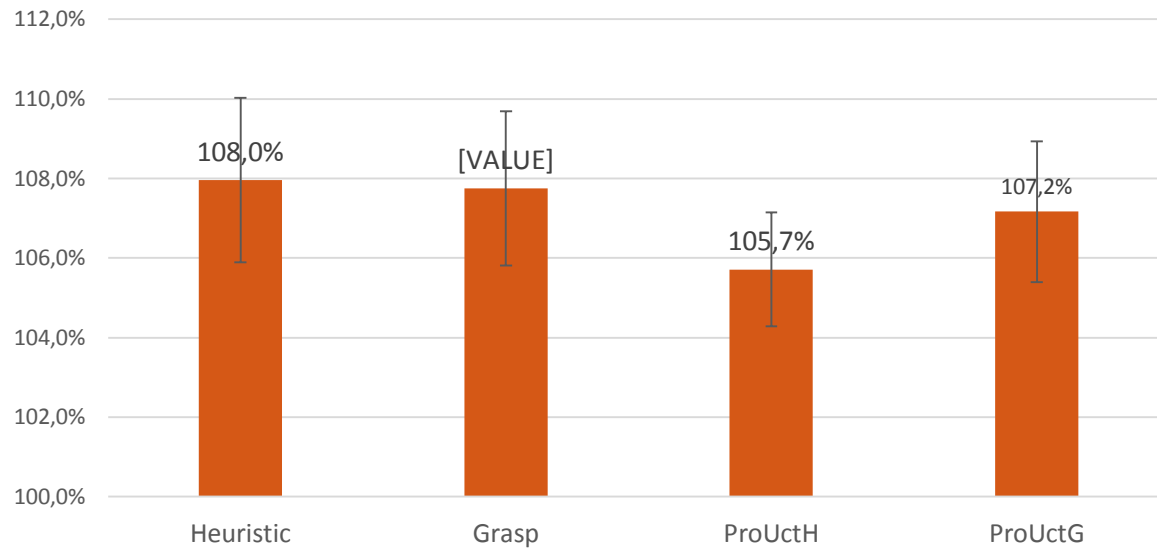
- z wyłączoną obsługą odpowiedzi na ryzyka
- z dodatkowym zapamiętywaniem rozwiązań wzorcowych (*EliteSet*) w węzłach drzewa UCT

WYNIKI

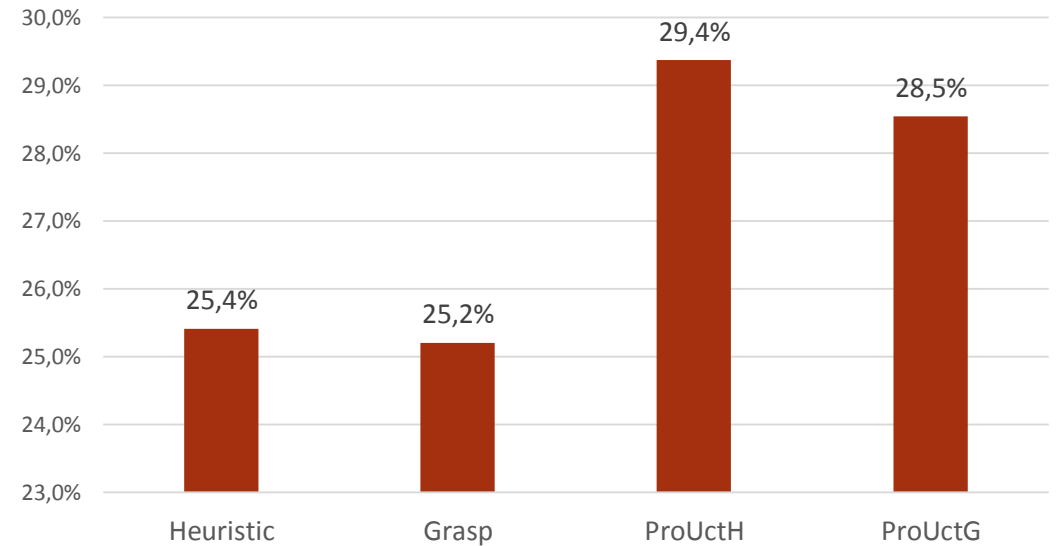
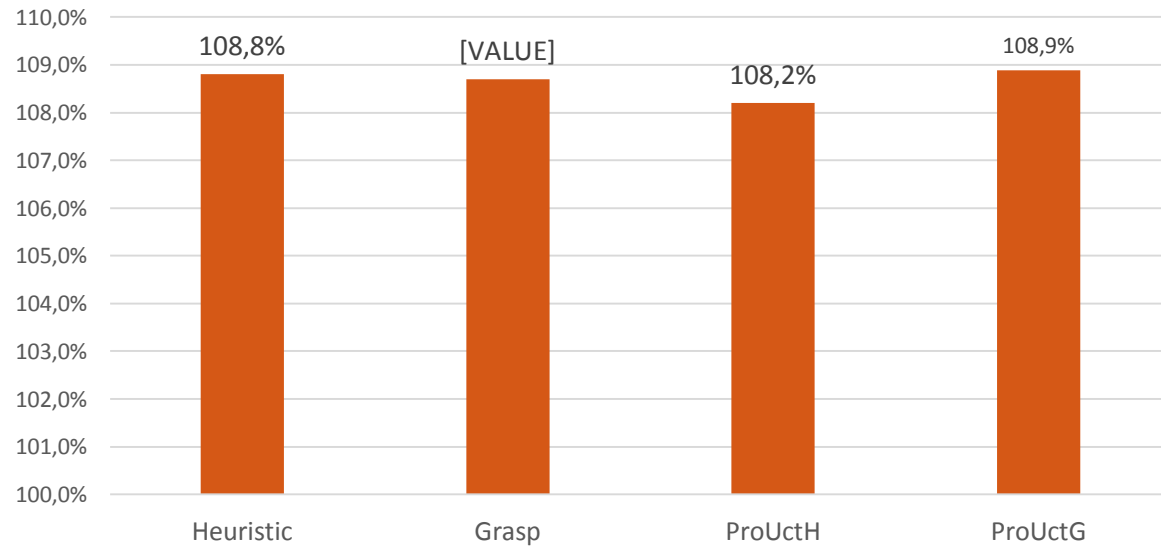
PODEJŚCIE 1, 30 ZADAŃ, 756 PRZYPADKÓW



PODEJŚCIE 1, 60 ZADAŃ, 289 PRZYPADKÓW



PODEJŚCIE N+1, 30 ZADAŃ, 480 PRZYPADKÓW



PODEJŚCIE N+1, 60 ZADAŃ, 51 PRZYPADKÓW

