**Sztuczna inteligencja i inżynieria wiedzy**

**Sprawozdanie z zadania drugiego laboratorium**

**„Problemy spełniania ograniczeń”**

Prowadzący laboratorium:   
**dr. inż. Paweł Myszkowski**

Przygotował:   
**Aleksander Poławski**

**1. Wstęp**Celem zadania drugiego była implementacja algorytmów przeszukiwania wstecz i w przód do rozwiązywania problemów CSP.  
  
Algorytmy należało zaimplementować w taki sposób, aby były w stanie rozwiązać problemy łamigłówkowe „Sudoku” oraz „Jolka”.  
  
Dodatkowo należało zbadać wpływ różnych heurystyk doboru zmiennej i wartości w następnym kroku algorytmów.

Program zawierający wszystkie wymienione składowe napisano w języku C++, aby uzyskać jak najlepszą wydajność.

**2. Opracowane algorytmy i wstępne badania:**W celu zrealizowania zadaniazaimplementowano algorytm:  
- przeszukiwania z nawrotami (dalej nazywany „backtracking”)  
- sprawdzania w przód (dalej nazywany „forwardChecking”)  
  
Dodatkowo zaimplementowano dwie heurystyki wyboru następnej zmiennej:  
- w kolejności deklaracji (dalej nazywanej „as declared”)  
- wybór zmiennej najbardziej ograniczonej (dalej nazywanej „most constrained”)  
  
oraz dwie heurystyki wyboru następnej wartości z dziedziny:  
- w kolejności deklaracji (dalej nazywanej „as declared”)  
- losowo (dalej nazywanej „random”)  
  
  
  
  
  
**Przeprowadzono badania dla przykładowego zadania Sudoku o trudności = 5.0 i id = 27:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Próba** | **Ustawienia** |  | **Nawroty** | **Nawroty do pierwszego rozwiązania** | **Odwiedzone węzły** | **Odwiedzone węzły do pierwszego rozwiązania** | **Czas wykonania** | **Liczba rozwiązań** |
| **#1** | **Algorytm** | backtracking | 68 113 | 14 288 | 613 017 | 128 868 | 3.34 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#2** | **Algorytm** | backtracking | 68 113 | 52 111 | 613 017 | 469 301 | 3.39 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | random |
| **#3** | **Algorytm** | backtracking | 35 265 | 12 586 | 317 385 | 113 550 | 8.70 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#4** | **Algorytm** | backtracking | 35 265 | 29 410 | 317 385 | 264 978 | 9.25 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |
| **#5** | **Algorytm** | forwardChecking | 67 721 | 14 265 | 229 441 | 50 738 | 6.72 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#6** | **Algorytm** | forwardChecking | 67 721 | 56 191 | 229 441 | 187 874 | 7.02 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | random |
| **#7** | **Algorytm** | forwardChecking | 34 631 | 12 409 | 124 032 | 46 060 | 10.48 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#8** | **Algorytm** | forwardChecking | 34 631 | 22 462 | 124 032 | 79 014 | 10.34 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |

Wnioski - Sudoku:  
  
- zmiana heurystyki wyboru wartości z kolejności deklaracji na losową nie wpływa na całkowitą liczbę wykonanych nawrotów i odwiedzonych węzłów. Zmienia się natomiast losowo liczba węzłów i nawrotów do znalezienia pierwszego rozwiązania.  
  
- zmiana heurystyki wyboru zmiennej z kolejności deklaracji na dobór węzła najbardziej ograniczonego znacznie zmniejsza całkowitą liczbę nawrotów i odwiedzonych węzłów. Wpływa jednak negatywnie na czas wykonania programu.  
  
- algorytm „backtracking” jest pod względem liczby wykonanych nawrotów i odwiedzonych węzłów nieznacznie gorszy od algorytmu „forwardChecking”. Jest on jednak szybszy pod względem czasu wykonania programu.  
  
- najlepszym rozwiązaniem jest wybór heurystyki zmiennej „most constrained”, heurystyki wartości „as declared” i algorytmu „forwardChecking”  
**Przeprowadzono badania dla przykładowego zadania „Jolka” o id = 1:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Próba** | **Ustawienia** |  | **Nawroty** | **Nawroty do pierwszego rozwiązania** | **Odwiedzone węzły** | **Odwiedzone węzły do pierwszego rozwiązania** | **Czas wykonania** | **Liczba rozwiązań** |
| **#1** | **Algorytm** | backtracking | 2 880 217 | 78 506 | 12 534 640 | 342 647 | 104.63s | 2 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#2** | **Algorytm** | backtracking | 2 880 217 | 135 790 | 12 534 640 | 593 162 | 121.47s | 2 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | random |
| **#3** | **Algorytm** | backtracking | 56 | 0 | 250 | 59 | 0.00s | 2 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#4** | **Algorytm** | backtracking | 45 | 3 | 250 | 88 | 0.00s | 2 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |
| **#5** | **Algorytm** | forwardChecking | 114 | 22 | 114 | 40 | 0.01s | 2 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#6** | **Algorytm** | forwardChecking | 114 | 23 | 114 | 41 | 0.01s | 2 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | random |
| **#7** | **Algorytm** | forwardChecking | 45 | 0 | 45 | 18 | 0.01s | 2 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#8** | **Algorytm** | forwardChecking | 45 | 1 | 45 | 19 | 0.01s | 2 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |

Wnioski - Jolka:  
  
- podobnie jak w przypadku zadań typu „Sudoku” algorytm „backtracking” jest pod względem liczby wykonanych nawrotów i odwiedzonych węzłów nieznacznie gorszy od algorytmu „forwardChecking”.  
  
- podobnie jak w przypadku zadań typu „Sudoku” zmiana heurystyki wyboru wartości z kolejności deklaracji na losową nie wpływa na całkowitą liczbę wykonanych nawrotów i odwiedzonych węzłów. Zmienia się natomiast losowo liczba węzłów i nawrotów do znalezienia pierwszego rozwiązania.  
  
- heurystyka doboru zmiennej na podstawie kolejności deklaracji jest w przypadku algorytmu „backtracking” zupełnie nieefektywna. W przypadku użycia jej w kombinacji z algorytmem „forwardChecking” staje się użyteczna. Heurystyka wyboru zmiennej na podstawie ilości ograniczeń jest jednak lepsza w każdym przypadku.  
  
- podobnie jak w przypadku zadań typu „Sudoku” najlepszym rozwiązaniem jest wybór heurystyki zmiennej „most constrained”, heurystyki wartości „as declared” i algorytmu „forwardChecking” .  
  
  
  
**3. Badania dla pozostałych instancji łamigłówek „Jolka”**Postanowiono pominąć badania z heurystyką wyboru zmiennej na podstawie kolejności deklaracji z powodu jej skrajnej nieefektywności.  
  
  
**Przeprowadzono badania dla zadania „Jolka” o id = 0:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Próba** | **Ustawienia** |  | **Nawroty** | **Nawroty do pierwszego rozwiązania** | **Odwiedzone węzły** | **Odwiedzone węzły do pierwszego rozwiązania** | **Czas wykonania** | **Liczba rozwiązań** |
| **#1** | **Algorytm** | backtracking | 8 | 0 | 28 | 13 | 0.00s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#2** | **Algorytm** | backtracking | 8 | 0 | 28 | 13 | 0.00s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |
| **#3** | **Algorytm** | forwardChecking | 8 | 0 | 8 | 6 | 0.00s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#4** | **Algorytm** | forwardChecking | 8 | 1 | 8 | 7 | 0.00s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |

**Przeprowadzono badania dla zadania „Jolka” o id = 2:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Próba** | **Ustawienia** |  | **Nawroty** | **Nawroty do pierwszego rozwiązania** | **Odwiedzone węzły** | **Odwiedzone węzły do pierwszego rozwiązania** | **Czas wykonania** | **Liczba rozwiązań** |
| **#1** | **Algorytm** | backtracking | 89 | 37 | 577 | 348 | 0.01s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#2** | **Algorytm** | backtracking | 89 | 25 | 577 | 284 | 0.01s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |
| **#3** | **Algorytm** | forwardChecking | 56 | 15 | 56 | 47 | 0.01s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#4** | **Algorytm** | forwardChecking | 56 | 9 | 56 | 41 | 0.01s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |

**Przeprowadzono badania dla zadania „Jolka” o id = 3:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Próba** | **Ustawienia** |  | **Nawroty** | **Nawroty do pierwszego rozwiązania** | **Odwiedzone węzły** | **Odwiedzone węzły do pierwszego rozwiązania** | **Czas wykonania** | **Liczba rozwiązań** |
| **#1** | **Algorytm** | backtracking | 353 | 162 | 9 944 | 5 996 | 0.11s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#2** | **Algorytm** | backtracking | 353 | 188 | 9 944 | 6 697 | 0.11s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |
| **#3** | **Algorytm** | forwardChecking | 201 | 53 | 201 | 137 | 0.22s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#4** | **Algorytm** | forwardChecking | 201 | 52 | 201 | 136 | 0.23s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |

**Przeprowadzono badania dla zadania „Jolka” o id = 4:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Próba** | **Ustawienia** |  | **Nawroty** | **Nawroty do pierwszego rozwiązania** | **Odwiedzone węzły** | **Odwiedzone węzły do pierwszego rozwiązania** | **Czas wykonania** | **Liczba rozwiązań** |
| **#1** | **Algorytm** | backtracking | 130 | 2 | 985 | 545 | 0.04s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#2** | **Algorytm** | backtracking | 130 | 5 | 985 | 567 | 0.04s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |
| **#3** | **Algorytm** | forwardChecking | 128 | 2 | 128 | 125 | 0.06s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#4** | **Algorytm** | forwardChecking | 128 | 4 | 128 | 127 | 0.07s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |

Wnioski:

- badania pozostałych plików łamigłówek „Jolka” potwierdzają wnioski wysunięte we wstępnych badaniach

**4. Badania dla pozostałych instancji łamigłówek „Sudoku”  
  
Przeprowadzono badania dla przykładowego zadania Sudoku o trudności = 2.0 i id = 12:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Próba** | **Ustawienia** |  | **Nawroty** | **Nawroty do pierwszego rozwiązania** | **Odwiedzone węzły** | **Odwiedzone węzły do pierwszego rozwiązania** | **Czas wykonania** | **Liczba rozwiązań** |
| **#1** | **Algorytm** | backtracking | 41 826 | 16 770 | 376 434 | 151 203 | 2.09 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#2** | **Algorytm** | backtracking | 41 826 | 27 116 | 376 434 | 244 341 | 2.12 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | random |
| **#3** | **Algorytm** | backtracking | 9 845 | 7 209 | 88 605 | 65 154 | 2.14 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#4** | **Algorytm** | backtracking | 9 845 | 3 211 | 88 605 | 29 145 | 2.04 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |
| **#5** | **Algorytm** | forwardChecking | 41 713 | 16 752 | 143 397 | 57 664 | 4.36 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#6** | **Algorytm** | forwardChecking | 41 713 | 3 177 | 143 397 | 10 613 | 4.59 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | random |
| **#7** | **Algorytm** | forwardChecking | 9 825 | 7 200 | 33 052 | 24 548 | 2.37 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#8** | **Algorytm** | forwardChecking | 9 825 | 8 818 | 33 052 | 29 334 | 2.41 s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |

**Przeprowadzono badania dla przykładowego zadania Sudoku o trudności = 6.0 i id = 33:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Próba** | **Ustawienia** |  | **Nawroty** | **Nawroty do pierwszego rozwiązania** | **Odwiedzone węzły** | **Odwiedzone węzły do pierwszego rozwiązania** | **Czas wykonania** | **Liczba rozwiązań** |
| **#1** | **Algorytm** | backtracking | 804 738 | 219 059 | 7 242 642 | 1 971 809 | 36.69s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#2** | **Algorytm** | backtracking | 804 738 | 626 012 | 7 242 642 | 5 634 417 | 40.86s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | random |
| **#3** | **Algorytm** | backtracking | 136 392 | 96 651 | 1 227 528 | 870 137 | 28.78s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#4** | **Algorytm** | backtracking | 136 392 | 99 851 | 1 227 528 | 898 978 | 29.39s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |
| **#5** | **Algorytm** | forwardChecking | 787 846 | 214 454 | 2 229 737 | 604 531 | 67.11s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#6** | **Algorytm** | forwardChecking | 787 846 | 136 259 | 2 229 737 | 395 123 | 69.62s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | random |
| **#7** | **Algorytm** | forwardChecking | 130 443 | 92 464 | 401 072 | 285 450 | 33.90s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#8** | **Algorytm** | forwardChecking | 130 443 | 33 873 | 401 072 | 104 407 | 34.38s | 1 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |

**Przeprowadzono badania dla przykładowego zadania Sudoku o trudności = 8.0 i id = 42:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Próba** | **Ustawienia** |  | **Nawroty** | **Nawroty do pierwszego rozwiązania** | **Odwiedzone węzły** | **Odwiedzone węzły do pierwszego rozwiązania** | **Czas wykonania** | **Liczba rozwiązań** |
| **#1** | **Algorytm** | backtracking | 97 274 | 5 482 | 875 115 | 49 629 | 4.63s | 40 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#2** | **Algorytm** | backtracking | 97 274 | 4 678 | 875 115 | 42 386 | 5.06s | 40 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | random |
| **#3** | **Algorytm** | backtracking | 197 882 | 5 151 | 1 780 587 | 46 650 | 35.73s | 40 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#4** | **Algorytm** | backtracking | 197 882 | 19 585 | 1 780 587 | 176 550 | 36.82s | 40 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |
| **#5** | **Algorytm** | forwardChecking | 96 804 | 5 440 | 247 177 | 13 993 | 7.99s | 40 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#6** | **Algorytm** | forwardChecking | 96 804 | 6 083 | 247 177 | 17 809 | 8.80s | 40 |
| **Wybór zmiennej** | as declared |
| **Wybór wartości** | random |
| **#7** | **Algorytm** | forwardChecking | 196 149 | 5 151 | 474 348 | 12 650 | 41.67s | 40 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | as declared |
| **#8** | **Algorytm** | forwardChecking | 196 149 | 4 849 | 474 348 | 14 836 | 41.38s | 40 |
| **Wybór zmiennej** | most constrained |
| **Wybór wartości** | random |

Wnioski:

- badania pozostałych plików łamigłówek „Sudoku” potwierdzają wnioski wysunięte we wstępnych badaniach. Wyjątkiem był problem o id=42, gdzie rozwiązaniem jest aż 40 układów. W tym wypadku heurystyka dobierająca zmienną na podstawie najbardziej ograniczonej stała się mało wydajna.

**5. Podsumowanie**Algorytmy przeszukiwania wstecz i w przód pozwalają znaleźć rozwiązania problemów CSP takich jak łamigłówki „Sudoku” i „Jolka”. Aby działały prawidłowo wymagają one jednak doprecyzowania, na przykład za pomocą heurystyk wyboru kolejnych zmiennych/wartości.  
  
Pomyślnie zrealizowano wszystkie wytyczne zadania oraz dokonano odpowiednich badań.