

Jarosław Koźlak*, Sebastian Pisarski*, Małgorzata Żabińska*

Rozwiązywanie problemów transportowych wykorzystujące metody identyfikacji wzorców sytuacyjnych**

1. Wprowadzenie

Celem prac jest opracowanie zestawu algorytmów oferujących wysokiej jakości rozwiązania problemów transportowych przy możliwie ograniczonym czasie obliczeń. Skupiamy się przede wszystkim na problemie transportowym *Pickup and Delivery Problem with Time Windows* (PDPTW) [7], pochodzącym z rodziny problemów *Vehicle Routing Problem* (VRP). Problem polega na obsłudze zestawu zleceń transportowych przy użyciu floty dostępnych pojazdów, starając się ponieść możliwie najmniejsze koszty. Samochody mają stałą prędkość oraz taką samą ładowność, zadaną w konfiguracji zadania. Poszczególne zlecenia są opisywane przez lokalizacji załadunku i wyładunku, przedziały czasowe (zwane oknami czasowymi), w których te operacje mają zostać przeprowadzone, oraz pojemność niezbędną do przewiezienia ładunku. Jakość rozwiązywania jest zależna od liczby użytych pojazdów oraz sumarycznego przemierzanego dystansu. Jako kolejne elementy funkcji jakości mogą być też brane pod uwagę sumaryczny czas podróży i sumaryczny czas postojów po opuszczeniu bazy.

Ze względu na złożoność obliczeniową problemu – jest to rozszerzenie problemu TSP – konieczne jest stosowanie algorytmów heurystycznych. Do ewaluacji rozwiązań zostały przygotowane zbiory benchmarków, szczególnie popularne są benchmarki przygotowane przez Li & Lim [9]. Obserwacja klas problemów testowych wskazuje, że dla różnych benchmarków najlepsze rozwiązania zostały znalezione przez różne algorytmy, takie rozwiązania są zazwyczaj znajdowane przez złożone metaheurystyki wykorzystujące różne rodzaje operatorów lokalnych modyfikacji rozwiązań oraz rozmaite heurystyczne algorytmy optymalizujące, sterujące przeszukiwaniem przestrzeni rozwiązań. Dlatego naszym celem jest znalezienie reguł doboru algorytmów i ich konfiguracji najlepiej rozwiązujących

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Katedra Informatyki

** Prace finansowano z grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N516 366236

poszczególne klasy problemu. Aby określić specyfikę sytuacji, przygotowano zestaw miar, uwzględniających wzajemne położenie przestrzenne i czasowe zleceń oraz poziom trudności problemu. W oparciu o analizę tych miar podejmowana jest decyzja, jaka konfiguracja algorytmów powinna zostać wykorzystana.

2. Przegląd dziedziny

Można wyróżnić dwa rodzaje problemów transportowych – statyczne i dynamiczne. Dla problemów statycznych wszystkie zlecenia są znane przed przystąpieniem do procesu optymalizacyjnego. W problemach dynamicznych, zlecenia przybywają stopniowo, już w trakcie przemieszczania się pojazdów.

Ze względu na złożoność obliczeniową tak zdefiniowanego problemu używane są rozwiązania heurystyczne [6]. Heurystyki są oparte na stworzeniu tras przy użyciu prostych algorytmów konstrukcyjnych, a następnie na dokonywaniu kolejnych lokalnych modyfikacji mających na celu poprawę jakości rozwiązania. Podstawowe rodzaje lokalnych modyfikacji polegają na przesuwaniu zleceń z jednej trasy do drugiej, wymianie zleceń między trasami oraz na zmianie kolejności zleceń w ramach danych tras. Operacje te są sterowane przez heurystyki takie jak poszukiwanie z tabu lub algorytm ewolucyjny.

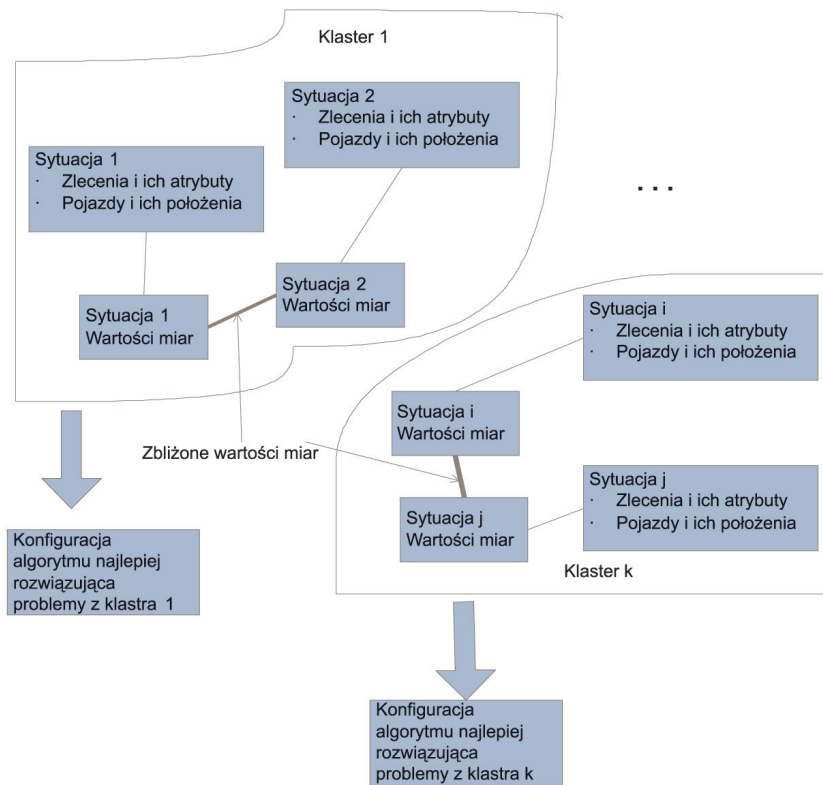
Inną stosowaną grupą rozwiązań są systemy agentowe. Można do nich zaliczyć np. system MARS [2]. Rozwiązania oparte są tu zazwyczaj na alokacji zleceń do pojazdów za pomocą protokołu *Contract Net* [8] oraz na używaniu algorytmu optymalizacyjnego *simulated trading* [1].

3. Koncepcja rozwiązania

System zawiera zestaw agentów – autonomicznych modułów decyzyjnych reprezentujących pojazdy oraz dyspozytora. Środowisko, w którym przemieszczają się pojazdy, to graf reprezentujący sieć połączeń drogowych lub przestrzeń euklidesowa. Ze względu na istotną możliwość porównania jakości rozwiązań z istniejącymi problemami testowymi, w przedstawionych testach skoncentrowano się na rozpatrywaniu ruchów pojazdów w przestrzeni euklidesowej.

Koncepcja rozwiązania jest przedstawiona na rysunku 1. Dla sytuacji wyliczane są wartości zestawy miar opisujące relacje przestrzenne i czasowe zleceń oraz pojazdów. Dla wszystkich sytuacji z rozpatrywanego uczącego zbioru sytuacji wyliczane są rozwiązania przy użyciu przygotowanych algorytmów. Tworzone są reguły, które przypisują zbliżonym wektorom miar algorytmy oferujące najlepszą jakość rozwiązań.

Tak dobrane do sytuacji reguły postępowania są następnie używane do analizy kolejnych sytuacji.



Rys. 1. Koncepcja sposobu doboru algorytmów

Obecnie do analizy sytuacji, w wersji dla problemu statycznego, są używane następujące miary:

- M1 – średnia ładowność wyliczona uwzględniając wszystkie zlecenia transportowe,
- M2 – odchylenie standardowe od ładowności związanych ze zgłoszonymi zleceniami,
- M3 – średnia z odległości między parami załadunku i wyładunku, oraz bazą,
- M4 – odchylenie standardowe z odległości między parami załadunku i wyładunku oraz bazą,
- M5 – średnia długość okien czasowych,
- M6 – średnia z najmniejszych odległości między poszczególnymi punktami załadunku/wyładunku (liczone dla każdego punktu),
- M7 – odchylenie standardowe z najmniejszych odległości między poszczególnymi punktami załadunku/wyładunku (liczone dla każdego punktu),
- M8 – odległość środka ciężkości zleceń od bazy,
- M9 – średnia liczba zleceń mieszczących się w oknie czasowym każdego zlecenia.
- M10 – odchylenie standardowe z dystansów zleceń od bazy.

Wersja dla problemu dynamicznego wymaga pewnych zmian, przede wszystkim zastępowania położenia bazy przez aktualne położenie pojazdu.

Każde rozwiązanie składa się z dwóch elementów – algorytmu pierwotnej alokacji zleceń oraz algorytmu optymalizacyjnego.

Algorytm pierwotnej alokacji zleceń polega na kolejnym wstawianiu nadchodzących zleceń do tras w ten sposób, by powodowały one najmniejszy możliwy przyrost kosztów rozwiązania. Koszt ten może być wyrażony przez całkowity czas podróży lub całkowity dystans, w rozpatrywanym przypadku uwzględniano całkowity dystans.

Wywoływany następnie *algorytm optymalizacyjny* jest implementacją algorytmu *simulated trading* [1]. Agenci starają się pozbyć tych zleceń, które znacząco pogarszają ich funkcje celu, w istotny sposób zwiększając czas podróży lub całkowity pokonany dystans. Agenci, którzy mogą zrealizować te zlecenia mniejszym kosztem, akceptują je, po czym są one wstawiane do ich planowanych tras podróży. Algorytm może być konfigurowany na różne sposoby, agenci mogą próbować pozbyć się kolejno każdego zlecenia, które w zadanym stopniu zwiększa ich koszty albo też zadanej liczby najbardziej niekorzystnych zleceń. Ponadto, agenci mogą deklarować warunkową chęć przyjęcia danego zlecenia, pod warunkiem, że inny agent przejmie jedno z już przydzielonych mu zleceń. Możliwe jest przeprowadzenie łańcucha takich wymian, którego długość jest określana na podczas konfiguracji algorytmu.

Badane zostały następujące cztery wersje rozwiązań, z których każde rozwiązanie składa się z algorytmu alokacji zleceń oraz algorytmu optymalizacyjnego. Na każdym etapie postępowania przyjmuje się, że rozwiązanie powinno być poprawne, czyli spełniać nałożone ograniczenia dotyczące ładowności oraz wykonania operacji w wymaganych przedziałach czasowych. Zarówno algorytm pierwotnej alokacji, jak i algorytm optymalizacyjny zostały zrealizowane w dwóch wersjach.

Wersje algorytmu pierwotnej alokacji były następujące:

- (*init1*) – kolejne zlecenia (czyli punkty załadunku i wyładunku) są wstawiane do tej trasy i w te miejsca, w których powodują najmniejsze przyrosty kosztów,
- (*init2*) – dokonuje się próby wstawiania od początku wszystkich nierealizowanych dotąd zleceń.

Wersje algorytmu optymalizacyjnego polegały na tym, że optymalizacja dokonywała się albo z punktu widzenia uzyskiwania minimalnych dystansów (*dist*) albo minimalnych czasów (*time*).

4. Realizacja systemu

Eksperymenty wykonywano przy użyciu holonicznego systemu do planowania transportu [4, 5], wykorzystywano w nich tylko część funkcji odpowiedzialnych za rozwiązywa-

nie klasycznego problemu transportowego. System został zrealizowany w oparciu o platformę agentową JADE¹, zgodną ze standardem agendowym FIPA².

System obejmuje kilka modułów: główną jego część stanowi moduł obliczeniowy obejmujący realizację opisanych negocjacji przy użyciu *Contract Net Protocol*, oraz optymalizacji poprzez realizację algorytmów typu *simulated trading*, pozostałe moduły odpowiadają za prowadzenie symulacji, wizualizację, generację sieci drogowej oraz testów. Istotnymi funkcjonalnościami systemu są możliwości parsowania i obsługi różnych rodzajów zestawów zleceń testowych, obok zestawu testów Li & Lim także przygotowanej jego wersji dla problemu dynamicznego oraz zestawów testów dla problemu dynamicznego, które przygotowali Mitovic-Minic i Pankratz³. System ma szerokie możliwości konfiguracyjne, można wybierać wersje algorytmów optymalizacyjnych, określać zakres logowanych zdarzeń i wartości miar opisujących sytuację oraz częstość uruchamiania optymalizacji rozkładu zleceń.

5. Wybrane eksperymenty

Przeprowadzono testy zrealizowanych algorytmów i porównano je z najlepszymi znanymi rozwiązaniami uzyskanymi dla zestawu problemów testowych Li & Lim [9]. Dla ważniejszego kryterium (liczba pojazdów) algorytmy dają wyniki zbliżone do najlepszych znanych – albo są równe albo gorsze o jeden pojazd.

Zaimplementowano algorytm regułowy identyfikujący wzorce sytuacyjne – przygotowany został w oparciu o część dostępnych problemów testowych benchmarków (pierwsze pięć testów z poszczególnych grup). Zbiór benchmarków obejmuje testy o różnych właściwościach, różniące się liczbą punktów załadunków i wyładunków. W pracy zaprezentowano wyniki dla części testów z grupy mającej około 100 punktów załadunków i wyładunków. Zastosowana metoda doboru konfiguracji algorytmu dokonuje najpierw kwalifikacji danej sytuacji do grup, według których zorganizowane są zbiory testowe. Dla testów o poszczególnych liczbach zleceń jest 6 grup – LC1, LR1, LRC1, LC2, LR2, LRC2. Grupy LC1 oraz LC2 zawierają zlecenia zgrupowane przestrzenie w klastry, LR1 i LR2 – zlecenia rozproszone a LRC1 i LRC2 mieszane zestawy zleceń, częściowo ulokowanych w klastrach i częściowo rozproszonych. Drugi sposób różnicowania testów polega na rozmiarze okien czasowych, w których są dozwolone wykonania operacji – testy LC1, LR1 oraz LRC1 zawierają zlecenia o wąskich oknach czasowych, natomiast LC2, LR2 i LRC2 – o szerokich. Dla testów o rozmiarze 100 punktów załadunku lub wyładunku do poszczególnych grup

¹ <http://jade.tilab.com/>

² <http://www.fipa.org/>

³ http://www.uni-hagen.de/WINF/inhalte/benchmark_data.htm

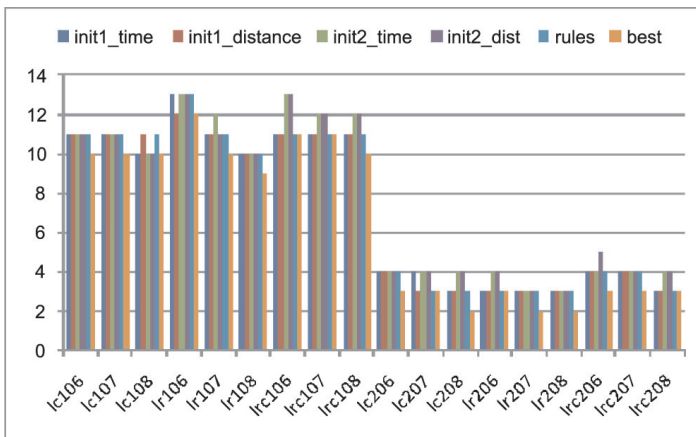
zaliczają się testy o następujących nazwach: lc1xx (dla LC1), lr1xx (dla LR1), lrc1xx (dla LRC1), lc2xx (dla LC2), lr2xx (dla LR2), lrc2xx (dla LRC2), gdzie x – jest liczbą naturalną, w tym także zerem.

Aby automatycznie zidentyfikować, czy problem należy do grup z wąskimi czy z szerokimi oknami czasowymi, w oparciu o zdefiniowany w nim zestaw zleceń transportowych do realizacji, wykorzystywano głównie iloczyn miar M6 i M7 oraz miarę M10, które umożliwiły dobre zróżnicowanie sytuacji z tego punktu widzenia. Różnicowanie na grupy LR, LC i LRC zostało dokonane w oparciu o miarę M6.

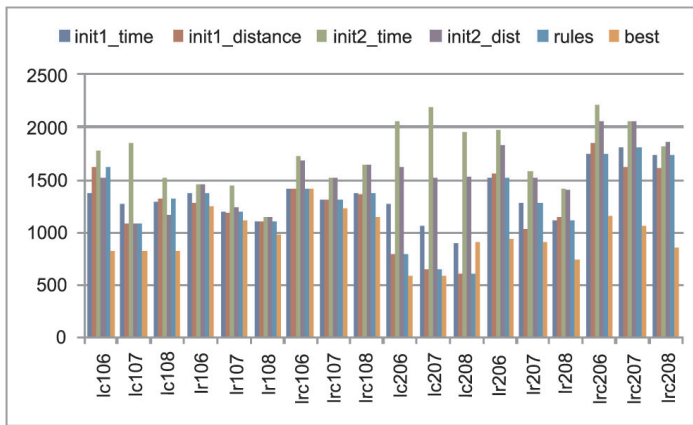
Przyporządkowano poszczególnym zestawom problemów testowych konfiguracje algorytmu, jedną z najkorzystniejszych alokacji był prosty następujący przydział – konfiguracja *init1_dist* dla problemów z grupy LC1 i LC2, oraz konfiguracja *init_time* dla problemów z grup LR1, LR2, LRC1 i LRC2, do tej klasyfikacji wykorzystano po 5 pierwszych testów z każdej grupy, wykorzystując pozostałe testy do weryfikacji stworzonych reguł klasyfikacyjnych.

Następnie zostały rozwiązane pozostałe testy z grupy mającej około 100 zleceń załadunków i wyładunków. Wybrano dla nich właściwy algorytm w oparciu o reguły analizy miar stosowane w poprzednim przypadku. Okazało się, że reguły w znacznej większości przypadków były trafnie dobrane.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawione są odpowiednio wyniki dotyczące liczby pojazdów oraz całkowitego czasu podróży. Na każdym wykresie znajdują się wyniki dla wszystkich możliwych kombinacji uzyskanych z dwóch rozpatrywanych wersji algorytmu pierwotnej alokacji zleceń i algorytmu optymalizacyjnego (*init1_time*, *init1_distance*, *init2_time*, *init2_dist*), rozwiązania wybranego spośród nich w oparciu o zdefiniowane reguły (rules) oraz najlepszego znanego rozwiązania (*best*).



Rys. 2. Wybrane testy z zestawu problemów testowych Li & Lim. Liczba użytych pojazdów



Rys. 3. Wybrane testy z zestawu problemów testowych Li & Lim. Całkowity dystans

6. Podsumowanie

Zaimplementowano zestaw algorytmów rozwiązujących problem transportowy PDPTW, zaproponowano zbiór miar oceniających aktualną sytuację, dokonano klasyfikacji sytuacji z punktu widzenia wartości poszczególnych miar i na tej podstawie zbudowano reguły wybierające najbardziej korzystny algorytm dla danej sytuacji.

Dalsze planowane prace będą obejmować:

- Wykorzystanie większej liczby wersji algorytmów rozwiązujących problem transportowy – zarówno algorytmów przeprowadzających wstępną alokację, jak i algorytmów optymalizacyjnych.
- Opracowanie algorytmów automatycznie identyfikujących sytuacje, np. wykorzystując techniki automatycznego klastrowania.
- Przeprowadzenie analogicznych eksperymentów dla problemów dynamicznych z uwzględnieniem obserwacji zmienności metryk opisujących sytuację.
- Zdefiniowanie zmodyfikowanych miar dla rozbudowanego problemu holonicznego, gdzie przeprowadzane jest także dodatkowo zestawianie zespołu transportowego złożonego z dostępnych ciągników, naczep i kierowców, każdy o odpowiednim zbiorze atrybutów przeprowadzenie analogicznych eksperymentów identyfikacji sytuacji oraz doboru optymalnej konfiguracji algorytmów dla rozbudowanego problemu.

Literatura

- [1] Bachem A., Hochstättler W., Malich M., *The simulated trading heuristic for solving vehicle routing problems*. Discrete Appl. Math., 65, March 1996, 47–72.
- [2] Fischer K., Muller J., Pischel M., *Cooperative Transportation Scheduling: an Application Domain for DAI*. Applied Artificial Intelligence, 1996, 1–33.

- [3] Gendreau A., Guertin F., Potvin J.Y., Séguin R., *Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries*. Rapport technique CRT-98-10, Université de Montréal, 1998.
- [4] Gołacki M., Koźlak J., Żabińska M., *Holonic-based environment for solving transportation problems*. Holonic and multi-agent systems for manufacturing: 4th international conference on Industrial applications of holonic and multi-agent systems, holoMAS 2009: Linz, Austria, August 31-September 2, 2009: proceeding; Springer-Verlag, LNAI 5696. 2009, LNAI 5696), 193–202.
- [5] Koźlak J., Pisarski S., Żabińska M., *Application of holonic approach for transportation modelling and optimising*. Advances on practical applications of agents and multiagent systems : 9th international conference on Practical applications of agents and multiagent systems, Springer-Verlag, 2011, Advances in Intelligent and Soft Computing, 189–194.
- [6] Li H., Lim A., *A Metaheuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows*. Proceedings of 13th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'01), USA, 2001.
- [7] Mitrowic-Minic S., *Pickup and Delivery Problem with Time Windows: A Survey*. Tech. Rep. 1998–12, SFU CMPT TR, 1998.
- [8] Smith R.G., *The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver*. IEEE Transactions on Computer, December 1980.
- [9] Transportation optimization portal – TOP, <http://www.sintef.no/projectweb/top/>.