

Алгоритмічне дослідження та програмна реалізація оптимізації маршрутів доставки з обмеженням вантажопідйомності

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено евристичні підходи до розв'язання задачі оптимізації маршрутів доставки з обмеженням вантажопідйомності транспортних засобів. Проведено порівняльний аналіз алгоритмів *K-means*, *Sweep* та *Clarke–Wright* на імітаційних наборах даних із різною просторовою структурою. Оцінювання здійснювалося за критеріями сумарної довжини маршрутів та кількості транспортних засобів. Встановлено залежність ефективності алгоритмів від характеру розподілу пунктів доставки. Розроблено WEB-застосунок, що реалізує досліджені методи та забезпечує інтерактивну візуалізацію результатів. Проведене тестування підтверджує практичну придатність запропонованого підходу для задач логістичної оптимізації.

Ключові слова: задача комівояжера, багатокритеріальна оптимізація, алгоритми кластеризації, програмування.

Abstracts.

The paper investigates heuristic approaches to solving the capacitated vehicle routing problem (CVRP) for delivery route optimization under vehicle capacity constraints. A comparative analysis of the *K-means*, *Sweep*, and *Clarke–Wright* algorithms was conducted using simulated datasets with different spatial distributions. The evaluation was performed based on the total route length and the number of vehicles required. The results demonstrate that the efficiency of the algorithms depends on the spatial structure of customer locations. A web-based application implementing the studied methods and providing interactive visualization of the results was developed. Experimental testing confirms the practical applicability of the proposed approach to logistics optimization tasks.

Keywords: traveling salesman problem, multi-criteria optimization, clustering algorithms, programming.

Вступ

Задача комівояжера (Traveling Salesman Problem, TSP) є однією з ключових прикладних задач комбінаторної оптимізації, що активно використовується в логістиці, транспортних системах і сервісах електронної комерції. При цьому особливої актуальності набуває задача маршрутизації транспортних засобів з обмеженням вантажопідйомності (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP), яка передбачає мінімізацію загальної довжини маршрутів за умови дотримання обмежень на місткість транспортних засобів [1-3].

У практичних застосуваннях, при значній кількості пунктів доставки ($n > 17$), точні алгоритми розв'язання є обчислювально складними, а тому в даному випадку широко використовуються евристичні та кластеризаційні підходи, що дозволяють отримати наближені розв'язки за прийнятний час [4-6]. Водночас важливим є не лише алгоритмічний аналіз, а й програмна реалізація таких методів у вигляді прикладного інструментарію для багатокритеріальної оптимізації.

Таким чином метою роботи є порівняльне дослідження ефективності евристичних алгоритмів розв'язання задачі CVRP на імітаційних наборах даних різної структури з відповідною розробкою програмного забезпечення для практичної оптимізації маршрутів доставки.

Результати дослідження

У роботі реалізовано та досліджено три підходи до оптимізації маршрутів доставки: кластеризація методом *K-means* з подальшим розв'язанням задачі комівояжера в межах кожного кластера; *Sweep*-алгоритм, що формує маршрути на основі полярного впорядкування точок; алгоритм *Clarke–Wright*, заснований на ідеї об'єднання маршрутів за критерієм економії відстані.

Для оцінювання ефективності алгоритмів було сформовано три типи імітаційних сценарних датасетів з 40 точками доставки: *Uniform* – рівномірний розподіл точок на площині; *Clustered* – скупчення точок у кількох локальних зонах (імітація спальних районів міста); *Mixture* – комбінований

розподіл із наявністю як щільних груп, так і поодиноких пунктів доставки.

Для кожної точки задавався попит, а для транспортних засобів – обмеження вантажопідйомності. Критеріями оцінювання виступали: сумарна довжина маршрутів, кількість сформованих маршрутів та стабільність результатів для різних просторових структур даних.

Результати експериментів показали, що ефективність алгоритмів суттєво залежить від типу просторового розподілу точок (рис. 1). Метод K-means та Sweep-алгоритм демонструють прийнятні результати лише у випадку рівномірного розподілу пунктів доставки. Натомість алгоритм Clarke–Wright показав стабільні результати в більшості сценаріїв завдяки механізму об’єднання маршрутів за критерієм економії.

	clust_method	dataset	total_points	total_demand, kg	L_global, km	L_clustered, km	diff_km	$\Delta L, \%$	N_trucks	Q_max, kg	min_cluster size	max_cluster size	t, s
0	Clarke–W...	Uniform	40	12335	115.10	144.70	29.60	25.72	4	3959	6	13	0.62
1	Clarke–W...	Clustered	40	12865	62.80	80.13	17.33	27.61	4	3964	4	14	0.94
2	Clarke–W...	Mixture	40	12387	131.25	161.60	30.35	23.13	4	3992	7	13	0.79
3	Sweep	Uniform	40	12335	115.10	144.74	29.64	25.75	4	3975	2	14	0.98
4	Sweep	Clustered	40	12865	62.80	90.08	27.28	43.45	4	3902	4	13	0.47
5	Sweep	Mixture	40	12387	131.25	178.72	47.47	36.17	4	3744	3	13	0.67
6	KMeans	Uniform	40	12335	115.10	148.97	33.87	29.42	4	3660	7	12	0.25
7	KMeans	Clustered	40	12865	62.80	108.11	45.31	72.15	7	2616	3	8	0.15
8	KMeans	Mixture	40	12387	131.25	342.09	210.84	160.64	14	3992	1	13	0.72

Рисунок 1 – Аналітичні результати тестування методів кластеризації маршрутів доставки для різних сценаріїв просторового розподілу пунктів доставки

На основі проведених досліджень було розроблено веб-застосунок оптимізації маршрутів доставки з урахуванням вантажопідйомності транспортних засобів. Програмна реалізація виконана з використанням мови Python та фреймворку Flask. Модуль забезпечує: введення координат пунктів доставки; урахування обмежень вантажопідйомності; вибір алгоритму оптимізації; побудову маршрутів із використанням сервісу дорожньої маршрутизації; візуалізацію результатів на інтерактивній карті (рис. 2).

Маршрут	Магазинів	Попит (кг)	Відстань (км)
Маршрут 1	5	1848 (92.4%)	3.38
Маршрут 2	5	1614 (80.7%)	16.44
Маршрут 3	3	1670 (83.5%)	30.81
всього	13	6132	50.63

Рисунок 2 – Введення пунктів доставки та побудова кластеризованих маршрутів

Тестування програмного модуля підтвердило коректність реалізації алгоритмів та відтворюваність отриманих експериментальних результатів. Інтерактивна візуалізація дозволяє аналізувати структуру сформованих маршрутів та порівнювати їхню ефективність.

Висновок

У роботі проведено порівняльне дослідження евристичних алгоритмів кластеризації для розв’язання задачі маршрутизації транспортних засобів з обмеженням вантажопідйомності на різних

типах просторових розподілів даних. Встановлено, що ефективність розглянутих методів суттєво залежить від структури розташування пунктів доставки.

Практичну реалізацію досліджених підходів здійснено у вигляді веб-застосунку, який може використовуватися як ефективний інструмент підтримки прийняття рішень у сфері логістики. Отримані результати створюють основу для подальших досліджень, зокрема розширення моделі додатковими обмеженнями та інтеграції з реальними транспортними даними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ekayanti E., Sugianto, Efendi I. B. Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) with Sweep and Nearest Neighbor Algorithm. *Sinergi International Journal of Logistics*. 2024. Vol. 2, №1, P.17–29. <https://doi.org/10.61194/sijl.v2i1.187>
2. Arifita E., Rakhmawati F. Analysis of Book Distribution Routes Using the Capacity Vehicle Routing Problem (CVRP) Method Using the Sweep Algorithm. *Sinkron : Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*. 2023. Vol. 7, №1, P.360-367. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v8i1.12013>
3. Pratiwi M., Lubis R. S. Distribution Route Optimization Using Nearest Neighbor Algorithm and Clarke and Wright Savings. *Sinkron : Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*. 2023. Vol. 7, №3, P.1638-1652. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v8i3.12622>
4. Abdellaoui A, Benabbou L., El Hallaoui I. *Towards a connection between the capacitated vehicle routing problem and the constrained centroid-based clustering*. 2024. arXiv:2403.14013.
5. Чорна О. С., Дідик П. Ю., Тітов С.В., Тітова О. В. Використання алгоритмів кластеризації для автоматизації планування маршрутів у задачах маршрутизації перевезень. *Системи обробки інформації*. 2024. № 1 (176). С. 115-123. <https://doi.org/10.30748/soi.2024.176.14>
6. Rizkallah L., Farouk M., Darwish N. A Clustering Algorithm for Solving the Vehicle Routing Assignment Problem in Polynomial Time. *International Journal of Engineering and Technology*. 2019. Vol. 9. DOI: 10.14419/ijet.v9i1.22231.

Шевчук Олександр Федорович – доцент кафедри комп’ютерних наук, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: shevchuk@vntu.edu.ua

Пяста Марія Володимирівна – студентка групи ІКН-226 факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: marpie173@gmail.com

Дусик Юлія Андріївна – студентка групи ІКН-226 факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: ydusyk@gmail.com

Shevchuk Oleksandr F. – Associate Professor of the Department of Computer Sciences, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: shevchuk@vntu.edu.ua

Piasta Mariia V. – student, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: marpie173@gmail.com

Dusyk Yulia A. – student, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ydusyk@gmail.com