

Thuật toán NSGA-II cho bài toán giao hàng bằng xe tải kết hợp với máy bay không người lái

Sinh viên: Tạ Thành Đạt
Mã Sinh viên: 20000544
Lớp: K65A2
Cán bộ hướng dẫn: PGS.TS. Lê Trọng Vĩnh
TS. Nguyễn Thị Tâm

Ngày 25 tháng 4 năm 2024

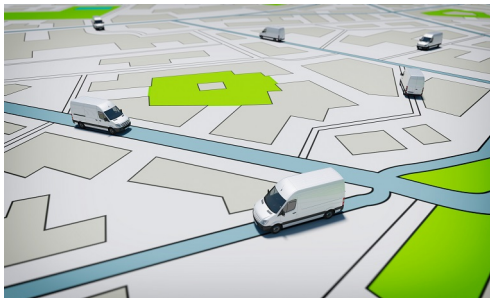
Nội dung

- 1 Giới thiệu
- 2 Mô hình bài toán
- 3 Các nghiên cứu liên quan
- 4 Thuật toán đề xuất
- 5 Thực nghiệm
- 6 Kết luận

Nội dung

- 1 Giới thiệu
- 2 Mô hình bài toán
- 3 Các nghiên cứu liên quan
- 4 Thuật toán đề xuất
- 5 Thực nghiệm
- 6 Kết luận

- Bài toán định tuyến xe (Vehicle Routing Problem) là tập hợp các bài toán về định tuyến đường đi cho xe tải để phục vụ một tập khách hàng nào đó.



Giới thiệu





- Bài toán định tuyến xe kết hợp máy bay không người lái (Vehicle Routing Problem with Drone) được phát triển từ bài toán VRP.



- Bài toán định tuyến xe kết hợp máy bay không người lái (Vehicle Routing Problem with Drone) được phát triển từ bài toán VRP.

Thách thức của bài toán VRPD:

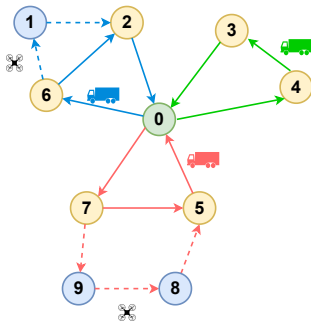
- Cần xử lý đường đi cho cả xe tải và máy bay không người lái.
- Năng lượng sử dụng cho máy bay không người lái bị hạn chế.

Nội dung

- 1 Giới thiệu
- 2 Mô hình bài toán**
- 3 Các nghiên cứu liên quan
- 4 Thuật toán đề xuất
- 5 Thực nghiệm
- 6 Kết luận

Bài toán tối ưu đa mục tiêu kết hợp xe tải kết hợp với drone

Cho n khách hàng và m xe tải giống nhau, mỗi xe tải có chứa một máy bay không người lái có thời lượng sử dụng nhất định. Tìm các tuyến đường giao hàng cho mỗi xe sao cho tổng thời gian di chuyển và lượng khí thải thoát ra là ít nhất.



Tối ưu đa mục tiêu

Định nghĩa

$$\text{Minimize: } F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \quad (1)$$

$$\text{Ràng buộc: } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, q \quad (2)$$

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, p \quad (3)$$

$$x_k^l \leq x_k \leq x_k^u \quad k = 1, \dots, n. \quad (4)$$

trong đó,

- $F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$ là véc tơ hàm mục tiêu.
- $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ là véc tơ lời giải. Giá trị x_k^l là cận dưới và x_k^u là cận trên.
- $g_i(x) \leq 0$ là các ràng buộc bất đẳng thức, q là số ràng buộc bất đẳng thức.
- $h_j(x) = 0$ là các ràng buộc đẳng thức, p là số ràng buộc đẳng thức.

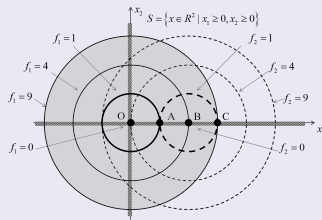
Không gian thiết kế và không gian mục tiêu

Ví dụ

$$\text{Minimize: } f_1(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2. \quad (5)$$

$$f_2(x_1, x_2) = (x_1 - 2)^2 + x_2^2. \quad (6)$$

$$\text{Ràng buộc: } x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \quad (7)$$



Hình: Minh họa hai hàm mục tiêu f_1, f_2 trong không gian thiết kế.

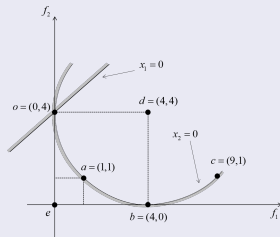
Không gian thiết kế và không gian mục tiêu

Ví dụ

$$\text{Minimize: } f_1(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2. \quad (5)$$

$$f_2(x_1, x_2) = (x_1 - 2)^2 + x_2^2. \quad (6)$$

$$\text{Ràng buộc: } x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \quad (7)$$

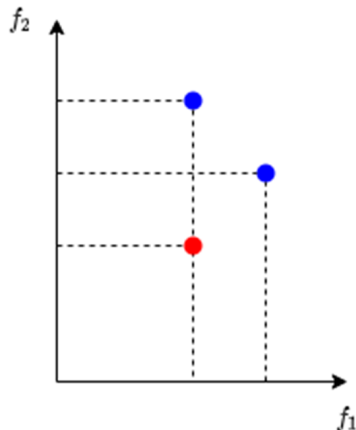


Hình: Không gian mục tiêu

Khái niệm trội và bị trội

Một lời giải x_1 được gọi là trội hơn x_2 nếu:

- x_1 không tệ hơn x_2 trong mọi hàm mục tiêu.
- x_1 tốt hơn x_2 trong ít nhất 1 hàm mục tiêu.



Mô hình hoá bài toán

Bài toán được biểu diễn dưới dạng một đồ thị $G = (C, E)$, trong đó:

- Tập đỉnh $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \cup \{0\}$.
- Tập cạnh E là tập các cung (c_i, c_j) biểu diễn đường đi từ đỉnh c_i đến đỉnh c_j , độ dài của cung kí hiệu là d_{ij}

Đối với mỗi khách hàng c_i ($i = 1, 2, \dots, n$), kí hiệu:

- cap_i^C : nhu cầu của khách hàng
- w_i^C : độ ưu tiên của khách hàng
- t_i^C : thời gian phục vụ khách hàng
- as_i^C : thời điểm bắt đầu khung thời gian giao hàng
- ae_i^C : thời điểm kết thúc khung thời gian giao hàng
- ts_i^C : thời gian có thể giao hàng trước thời điểm as_i^C
- te_i^C : thời gian có thể giao hàng sau thời điểm ae_i^C

Mô hình hoá bài toán

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$: là tập m xe tải giống nhau, mỗi xe tải chứa một máy bay không người lái. Với mỗi xe tải v_k ($k = 1, 2, \dots, m$), kí hiệu:

- t_{ij}^v : thời gian di chuyển từ khách hàng c_i đến c_j
- t_{ik}^v : thời điểm xe tải k đến điểm c_i
- cap_k^v : sức chứa của xe tải k
- CO_2^v : lượng khí thải trung bình

Với mỗi máy bay không người lái trên xe tải k , kí hiệu:

- t'_{ij} : thời gian máy bay không người lái di chuyển từ khách hàng c_i đến c_j
- t'_{ik} : thời điểm máy bay không người lái k đến c_i
- d'_{ij} : độ dài đường di chuyển của máy bay không người lái từ c_i đến c_j
- $C^D \in C$ là tập các khách được phục vụ bởi máy bay không người lái, $|C^D| = l$

Mô hình hoá bài toán

Với mỗi máy bay không người lái trên xe tải k , kí hiệu:

- $C^L = \{c_0^L, c_1^L, \dots, c_n^L\}$: tập các điểm máy bay không người lái có thể cất cánh
- $C^R = \{c_1^R, c_2^R, \dots, c_{n+1}^R\}$: tập các điểm máy bay không người lái có thể hạ cánh
- t^L : thời gian chuẩn bị cho máy bay không người lái cất cánh
- t^R : thời gian để nhận máy bay không người lái
- b : thời lượng pin của máy bay không người lái
- e : năng lượng tiêu thụ trung bình của máy bay không người lái (Wh/mile)
- CO_2' : lượng CO_2 trung bình máy bay không người lái thải ra trong 1 giờ

Mô hình hoá bài toán

Các biến quyết định

- $x_{ijk}^c = \begin{cases} 1, & \text{Nếu xe tải } k \text{ di chuyển qua cung } (c_i, c_j) \\ 0, & \text{Ngược lại} \end{cases}$
- $y_{ijkl} = \begin{cases} 1, & \text{Nếu xe tải và máy bay } k \text{ cùng xuất phát tại điểm } c_i. \\ & \text{Sau đó, máy bay đến } c_j \text{ để giao hàng và quay về } c_i. \\ & \text{Còn xe tải không qua điểm } c_j \text{ mà đi đến } c_l \\ 0, & \text{Nếu không sử dụng máy bay không người lái.} \end{cases}$
- $z_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Xe tải } k \text{ đã giao hàng đến điểm } c_i \text{ mà chưa tới } c_j \\ 0, & \text{Xe tải } k \text{ chưa giao hàng đến cả hai điểm } c_i \text{ và } c_j \end{cases}$
- o_{ik} : là một số nguyên không âm biểu diễn vị trí của điểm c_i trên tuyến đường của xe tải k .

Hàm mục tiêu

Tối thiểu hoá tổng thời gian di chuyển của tất cả các phương tiện:

$$\sum_{v_k \in V} t_{0k}^v \quad (8)$$

Tối thiểu hoá lượng khí CO_2 mà các phương tiện thải ra:

$$\sum_{v_k \in V} \sum_{\substack{c_i^L \in C^L \\ c_i^L \neq c_i}} CO_2^v \times d_{c_i^L i}^v \times x_{c_i^L i k}^c + \sum_{v_k \in V} \sum_{\substack{c_i^L \in C^L \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{\substack{c_i^R \in C^R \\ c_i^R \neq c_i}} CO_2' \times e \times (d_{c_i^L i}^L + d_{i c_i^R}^R) \times y_{c_i^L i c_i^R k} \quad (9)$$

trong đó:

- $\sum_{v_k \in V} \sum_{\substack{c_i^L \in C^L \\ c_i^L \neq c_i}} CO_2^v \times d_{c_i^L i}^v \times x_{c_i^L i k}^c$: lượng khí CO_2 nếu không sử dụng máy bay không người lái.
- $\sum_{v_k \in V} \sum_{\substack{c_i^L \in C^L \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{\substack{c_i^R \in C^R \\ c_i^R \neq c_i}} CO_2' \times e \times (d_{c_i^L i}^L + d_{i c_i^R}^R) \times y_{c_i^L i c_i^R k}$: lượng khí CO_2 nếu sử dụng máy bay không người lái.

Mỗi khách hàng chỉ được giao hàng đúng một lần:

$$\sum_{v_k \in V} \sum_{\substack{c_i^L \in C^L \\ c_i^L \neq c_i}} x_{c_i^L i k}^C + \sum_{v_k \in V} \sum_{\substack{c_i^L \in C^L \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{\substack{c_i^R \in C^R \\ c_i^R \neq c_i}} y_{c_i^L i c_i^R k} = 1 \quad (10)$$

Mỗi xe tải phải xuất phát từ kho và quay lại kho sau khi giao hàng:

$$\sum_{c_i^R \in C^R} x_{0 c_i^R k}^C \leq 1 \quad (11)$$

$$\sum_{c_i^L \in C^L} x_{c_i^L 0 k}^C \leq 1 \quad (12)$$

Các ràng buộc

Các phương tiện không được di chuyển mà không giao hàng:

$$x_{00k}^c = 0 \quad (13)$$

Ràng buộc bảo toàn luồng cho xe tải:

$$\sum_{\substack{c_i^L \in C^L \\ c_i^L \neq c_i}} x_{c_i^L i k}^c - \sum_{\substack{c_i^R \in C^R \\ c_i^R \neq c_i}} x_{i c_i^R k}^c = 0 \quad (14)$$

Ràng buộc để loại bỏ subtour cho xe tải:

$$o_{c_i^L k} - o_{c_i^R k} + 1 \leq (n-1)(1 - x_{c_i^L c_i^R k}^c) \quad (15)$$

$$o_{c_i^R k} \leq M \sum_{c_i^L \in C^L} x_{c_i^L c_i^R k}^c \quad (16)$$

Ràng buộc về sức chứa của xe tải

$$\sum_{c_i \in C} \left(\sum_{c_i^R \in C^R} cap_i^c x_{i c_i^R k}^c + \sum_{c_i^L \in C^L} \sum_{c_i^R \in C^R} cap_i^c y_{c_i^L i c_i^R k}^c \right) \leq cap_k^v \quad (17)$$

Các ràng buộc

Ràng buộc về điểm xuất phát

$$\sum_{\substack{c_i \in C \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{\substack{c_i^R \in C^R \\ c_i^R \neq c_i}} y_{c_i^L i c_i^R k} \leq 1 \quad (18)$$

Ràng buộc về điểm quay về

$$\sum_{\substack{c_i^L \in C^L \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{\substack{c_i \in C \\ c_i^R \neq c_i}} y_{c_i^L i c_i^R k} \leq 1 \quad (19)$$

Ràng buộc về điểm giao hàng

$$y_{c_i^L i c_i^R k} \leq x_{c_i^L c_i^R k}^c, v_k \in V, c_i^L \neq c_i^R, c_i^R \neq c_i \quad (20)$$

Các ràng buộc

Ràng buộc thời gian giao hàng của xe tải:

$$t_{c_i^L k} + t_{c_i^L c_j^R}^v + t_i^c + t^L \left(\sum_{\substack{c_i \in C \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{c_i^R \in C^R} y_{c_i^L i c_i^R k} \right) + t^R \left(\sum_{\substack{c_i^L \in C^L \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{c_i \in C} y_{c_i^L i c_i^R k} \right) \leq t_{c_i^R k}^v + M(1 - x_{c_i^L c_i^R k}) \quad (21)$$

Ràng buộc thời gian giao hàng của máy bay không người lái:

$$t_{c_i^L k}^v + t_{c_i^L i}^L + t^L - M(1 - \sum_{c_i^R \in C^R} y_{c_i^L i c_i^R k}) \leq t_{ik}^L \quad (22)$$

$$t_{ik}^L + t_{i c_i^R}^L + t_j^c + t^R - M(1 - \sum_{c_i^L \in C^L} y_{c_i^L i c_i^R k}) \leq t_{c_i^R k}^L \quad (23)$$

Ràng buộc về thời gian cất cánh của máy bay không người lái:

$$t_{c_i^L k}^L \geq t_{c_i^L k} - M(1 - \sum_{\substack{c_i \in C \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{\substack{c_i^R \in C^R \\ c_i^R \neq c_i}} y_{c_i^L i c_i^R k}) \quad (24)$$

Các ràng buộc

$$t'_{c_i^L k} \leq t_{c_i^L k} + M(1 - \sum_{\substack{c_i \in C \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{\substack{c_i^R \in C^R \\ c_i^R \neq c_i}} y_{c_i^L i c_i^R k}) \quad (25)$$

Ràng buộc về thời gian hạ cánh của xe tải và máy bay không người lái

$$t'_{c_i^R k} \geq t_{c_i^R k} - M(1 - \sum_{\substack{c_i \in C \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{\substack{c_i^R \in C^R \\ c_i^R \neq c_i}} y_{c_i^L i c_i^R k}) \quad (26)$$

$$t'_{c_i^R k} \leq t_{c_i^R k} + M(1 - \sum_{\substack{c_i \in C \\ c_i^L \neq c_i}} \sum_{\substack{c_i^R \in C^R \\ c_i^R \neq c_i}} y_{c_i^L i c_i^R k}) \quad (27)$$

Ràng buộc về tổng thời gian di chuyển của máy bay không người lái

$$b + M(1 - \sum_{\substack{c_i \in C \\ c_i^R \neq c_i}} y_{c_i^L i c_i^R k}) \geq t'_{c_i^R k} - t'_{c_i^L k} \quad (28)$$

Các ràng buộc

Ràng buộc về thứ tự giao hàng cho xe tải:

$$(o_{c_j^L k} - o_{ik}) \leq Mz_{c_j^L ik} \quad (29)$$

$$(o_{c_j^L k} - o_{ik}) \geq M(z_{c_j^L ik} - 1) + 1 \quad (30)$$

Ràng buộc thời gian giao hàng cho máy bay không người lái khi giao hàng nhiều điểm liên tục:

$$t'_{c_i^R k} - M(3 - \sum_{c_i \in C} y_{c_i^L ic_i^R k} - \sum_{c_i \in C} \sum_{c_h^R \in C^R} y_{ji c_h^R k} - z_{c_i^L jk}) \leq t'_{jk} \quad (31)$$

Xe tải cần di chuyển đến điểm nhận trước khi máy bay không người lái hạ cánh:

$$y_{0ic_i^R k} \leq \sum_{\substack{c_i^L \in C^L \\ c_i^L \neq c_i \\ c_i^L \neq c_i^R}} x_{c_i^L c_i^R k} \quad (32)$$

Ràng buộc độ ưu tiên cho khách hàng:

$$\sum_{c_i \in C} w_i^c(t) \geq w \quad (33)$$

$$w_i^c(t) = \begin{cases} 0, & t < ts_i^c \\ f_i(t), & ts_i^c \leq t < as_i^c \\ 1, & as_i^c \leq t < ae_i^c \\ h_i(t), & ae_i^c \leq t < te_i^c \\ 0, & te_i^c < t \end{cases} \quad (34)$$

$$f_i(t) = 1 - \left(\frac{t - ts_i^c}{as_i^c - ts_i^c} \right)^5 \quad (35)$$

$$h_i(t) = 1 - \left(\frac{te_i^c - t}{te_i^c - ae_i^c} \right)^5 \quad (36)$$

Nội dung

- 1 Giới thiệu
- 2 Mô hình bài toán
- 3 Các nghiên cứu liên quan**
- 4 Thuật toán đề xuất
- 5 Thực nghiệm
- 6 Kết luận

Các nghiên cứu liên quan và hạn chế

- Chỉ xem xét giải bài toán tối ưu hoá đơn mục tiêu.^{1 2}
- Giải bài toán đa mục tiêu bằng cách đưa về đơn mục tiêu.^{3 4}

¹ Luo, H., Dridi, M., & Grunder, O. (2023). A branch-price-and-cut algorithm for a time-dependent green vehicle routing problem with the consideration of traffic congestion. *Computers & Industrial Engineering*, 177, 109093.

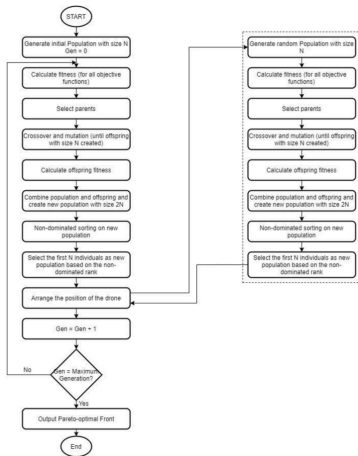
² Matos, M. R. S., Frota, Y., & Ochi, L. S. (2018). Green vehicle routing and scheduling problem with split delivery. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 69, 13-20.

³ Ferreira, K. M., de Queiroz, T. A., Munari, P., & Toledo, F. M. B. (2024). A variable neighborhood search for the green vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints and split delivery. *European Journal of Operational Research*.

⁴ Ji, B., Zhou, S., Samson, S. Y., & Wu, G. (2021). An enhanced neighborhood search algorithm for solving the split delivery vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 162, 107720.

Các nghiên cứu liên quan và hạn chế

• Thuật toán chưa tối ưu ⁵



Những hạn chế trong thuật toán:

- Sử dụng hai thuật toán NSGA-II lồng nhau, 1 thuật toán để tìm đường định tuyến cho xe tải, 1 thuật toán để tìm đường định tuyến cho máy bay không người lái.
- Mã hoá nhị phân cho đường đi của máy bay không người lái.
- Sử dụng lai ghép 2 điểm cắt có thể tạo ra những lời giải không hợp lệ và không kế thừa được các đặc tính của cha mẹ

⁵ R. Kuo, E. Edbert, F. E. Zulvia, S.-H. Lu, Applying nsga-ii to vehicle routing problem with drones considering makespan and carbon emission, Expert Systems with Applications 221 (2023)

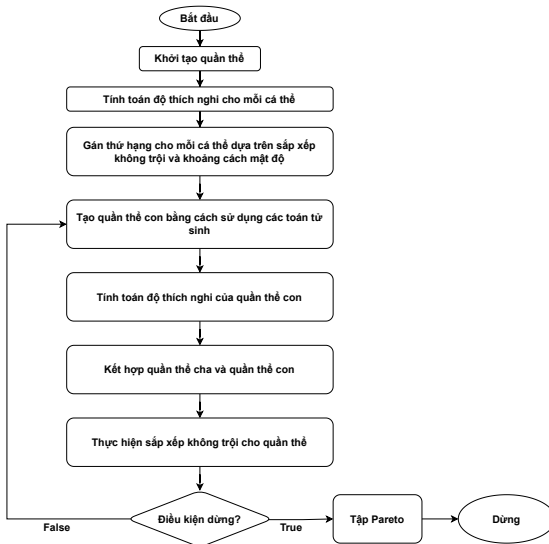
Nội dung

- 1 Giới thiệu
- 2 Mô hình bài toán
- 3 Các nghiên cứu liên quan
- 4 Thuật toán đề xuất**
- 5 Thực nghiệm
- 6 Kết luận

Các đóng góp chính của nghiên cứu

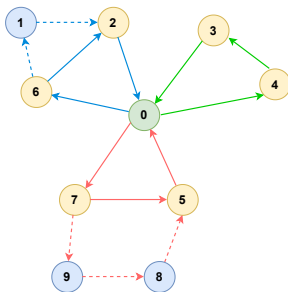
- Đề xuất thuật toán INSGA-II
- Đề xuất cách mã hoá mới chỉ dùng một véc tơ có thể tìm ra lời giải cho cả bài toán thay vì dùng 2 véc tơ như nghiên cứu đã có
- Đề xuất cách lai ghép thứ tự bộ phận để tìm ra các con lai kế thừa được các đặc trưng của cha mẹ
- Đề xuất 3 phép đột biến mới

Thuật toán đề xuất (INSGA-II)

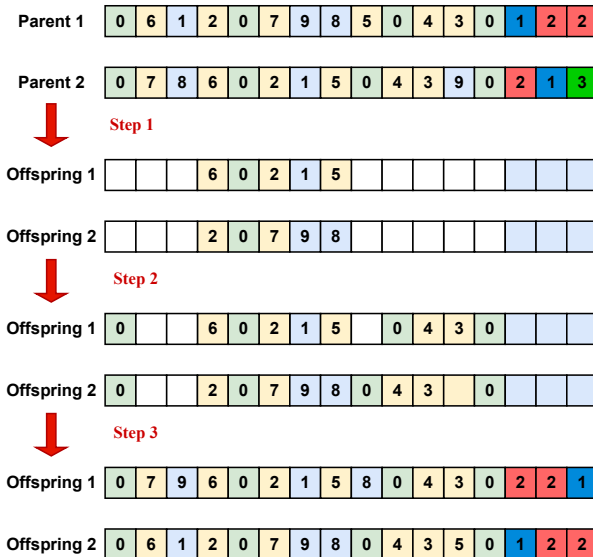


Mã hoá

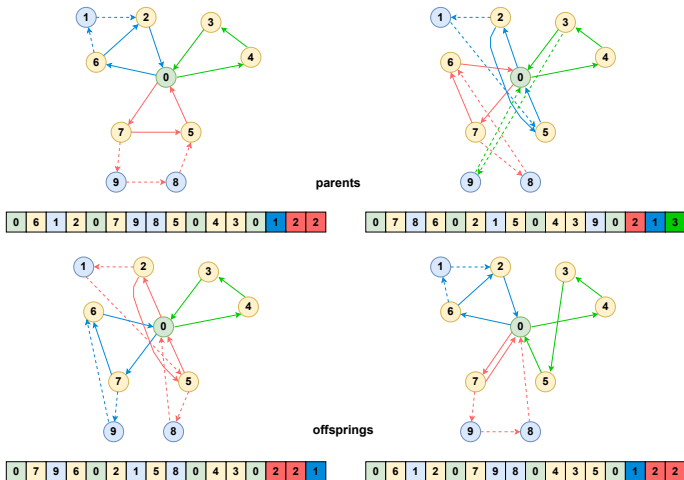
- Chỉ sử dụng 1 véc-tơ
- Thêm / (số lượng khách hàng được phục vụ bởi máy bay không người lái) vị trí vào phía sau gen biểu diễn cá thể.



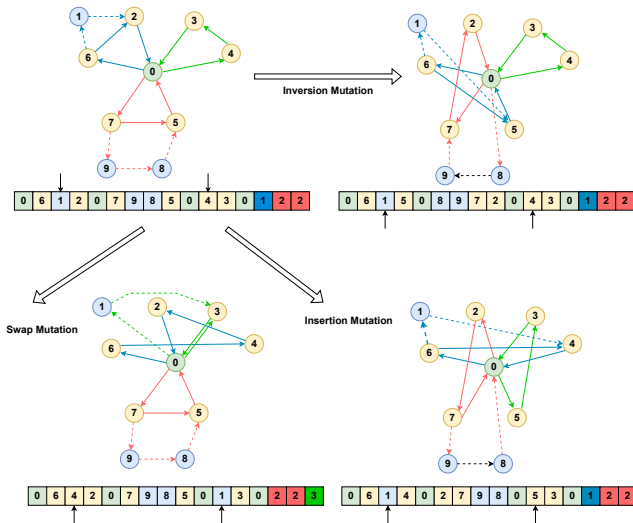
Lai ghép thứ tự



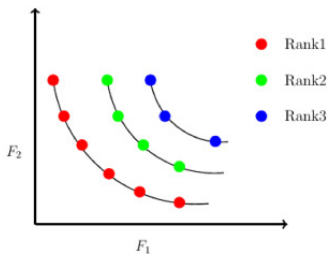
Lai ghép thứ tự



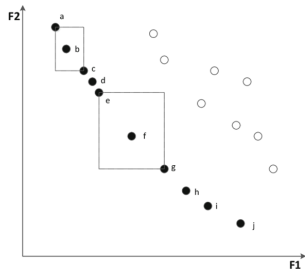
Đột biến



Chọn lọc



Hình: Sắp xếp không trội.



Hình: Khoảng cách quy tụ.

Nội dung

- 1 Giới thiệu
- 2 Mô hình bài toán
- 3 Các nghiên cứu liên quan
- 4 Thuật toán đề xuất
- 5 Thực nghiệm**
- 6 Kết luận

Cài đặt thực nghiệm

Các thuật toán được cài đặt bằng

- Ngôn ngữ Python.
- Hệ điều hành Window 11, CPU AMD Ryzen 7 4800H 2.9GHz, 16GB RAM
- Mỗi thuật toán được tiến hành 5 lần thực hiện.

Bảng: Tham số của các thuật toán.

Tham số	NSGA-II	INSGA-II
Số lượng thể hệ	100	100
Số lần đánh giá	10000	10000
Tỷ lệ lai ghép	0.8	0.8
Tỷ lệ đột biến	0.1	0.1

Dữ liệu được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm 68 tập dữ liệu tương ứng với các kịch bản khác nhau ⁶. Mỗi kịch bản được đặt tên có dạng $n.m.t$, trong đó:

- n là số khách hàng của kịch bản
- $m \times m$ kích thước địa hình
- t là số thứ tự của kịch bản

Chia làm 2 tập dữ liệu con:

- Tập 1 bao gồm các tập dữ liệu có lượng khách hàng nhỏ: 10, 12, 20.
- Tập 2 bao gồm các tập dữ liệu có lượng khách hàng lớn: 100, 150.

⁶<https://zenodo.org/records/2572757>

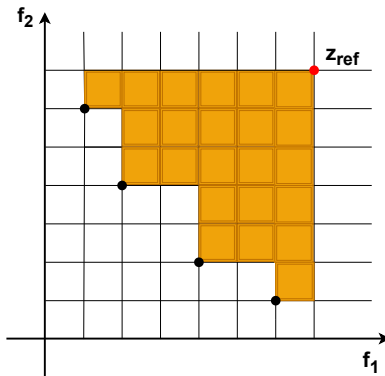
Bảng: Một số tham số của bài toán⁷

Tham số	Giá trị
Truck speed	35/60.0
Drone speed	50/60.0
Truck capacity	1300
Drone capacity	5
Service time truck	2
Service time drone	1
Endurance	30
Max drive time	8*60
Launch time	1
Recovery time	1
Cost factor	$1.13 * 1.61 * (7/100.0)$
Drone factor cost	0.1

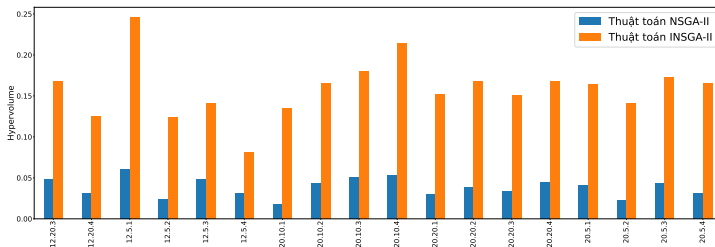
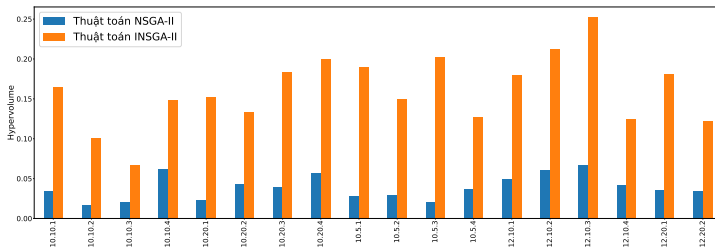
⁷ R. Kuo, E. Edbert, F. E. Zulvia, S.-H. Lu, Applying nsga-ii to vehicle routing problem with drones considering makespan and carbon emission, Expert Systems with Applications 221 (2023)

Độ đo đa mục tiêu

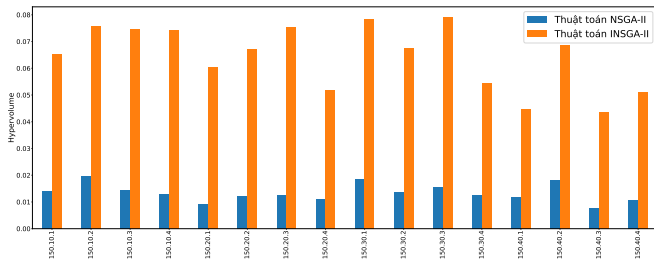
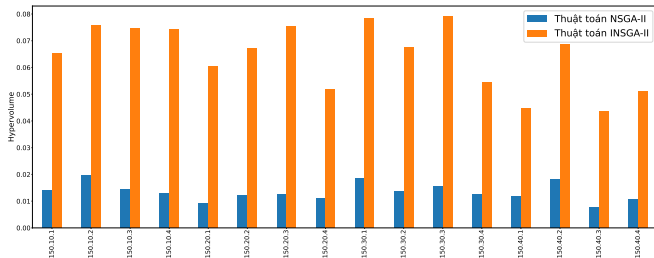
Độ đo S (Hypervolume) của một trong những độ đo được sử dụng phổ biến. Giá trị của độ đo S của một thuật toán là tổng diện tích của các lời giải không trội trên biên Pareto tối ưu đến điểm tham chiếu.



Kết quả



Kết quả



Nội dung

- 1 Giới thiệu
- 2 Mô hình bài toán
- 3 Các nghiên cứu liên quan
- 4 Thuật toán đề xuất
- 5 Thực nghiệm
- 6 Kết luận**

- Nghiên cứu đã tìm hiểu đưa ra giải pháp cho bài toán tối ưu đa mục tiêu bằng cách sử dụng thuật toán NSGA-II với các toán tử di truyền phù hợp.
- Kết quả được đánh giá trên độ đo Hypervolume cho thấy tính hiệu quả của thuật toán trên nhiều bộ dữ liệu khác nhau.
- Tuy nhiên, nếu bài toán xét đến các yếu tố động thì thuật toán sẽ không phù hợp và cần phải nghiên cứu thêm.

**Cảm ơn thầy, cô và mọi người đã
chú ý lắng nghe!**