

Tổng quan về 1-Robot bao phủ môi trường

Nhóm: KHMT - K61 - ĐHBKHN

Trần Hữu Thuý

Nguyễn Nam Thắng

Lê Đình Mạnh



Nội dung:

1. Giới thiệu
2. Bài toán lập lịch bao phủ cho robot
3. Một số nghiên cứu liên quan
4. Đề xuất mô hình
5. Kết quả thực nghiệm

Giới thiệu

Robot di động tự trị:

“Mobile robots are robots that can move from one place to another autonomously, that is, without assistance from external human operators.” (1)

Robot di động là các robot có thể di chuyển từ một vị trí đến vị trí khác tự động mà không có bất kì sự hỗ trợ nào từ các thao tác của con người. (1)



Tầm quan trọng của robot di động

Robot di động hiện nay đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực:

- Giao hàng...
- Quân sự: rà phá bom mìn
- Phát hiện nguy hiểm, thăm dò các khu vực không xác định
- Tìm kiếm và cứu trợ: tìm kiếm và giải cứu những người sống sót trong khu vực đô thị sau một trận động đất.





Thách thức của robot di động tự trị

Vấn đề năng lượng

- *Nạp năng lượng của Robot di động tự trị*
 - Robot di động hiện tại sử dụng pin để duy trì năng lượng => Hạn chế: nguồn năng lượng và thời gian hoạt động.
 - Sau một số hữu hạn hành động Robot phải quay trở lại trạm để thay pin hoặc sạc lại năng lượng.
- Trong một số môi trường khắc nghiệt (thăm dò khu vực thảm họa, môi trường ô nhiễm...). Robot cần được thay pin tại chỗ.

Thách thức: Làm thế nào để giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng và kéo dài thời gian sống của robot di động trở thành một vấn đề quan trọng



2. Bài toán lập đường đi bao phủ (CPP)

- Bài toán lập đường đi bao phủ (CPP) là bài toán tìm đường đi cho Robot, đi qua tất cả các điểm trong một khu vực, và thoả mãn các ràng buộc [3]:
 - Robot phải di chuyển qua tất cả các điểm trong khu vực mục tiêu, bao phủ toàn bộ khu vực.
 - Hạn chế lập đường đi
 - Robot hoạt động liên tục và tuần tự mà không cần sự hỗ trợ từ con người
 - Tránh các chướng ngại vật [3]
- Dựa trên sự phức tạp của vấn đề lập kế hoạch đường đi bao phủ, bài toán này được xác định là **NP-hard** [3]
- Bài toán được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực [3]:
 - robot rà phá bom mìn, máy cắt cỏ, máy gặt tự động,
 - robot rửa cửa sổ, robot sơn nhà cao ốc...



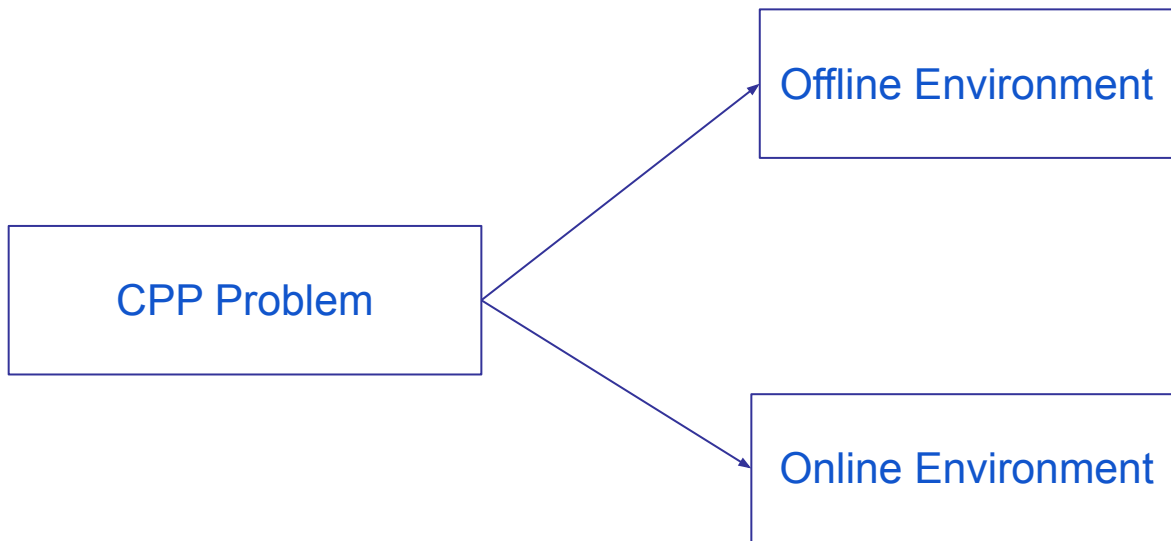
Bài toán lập đường đi bao phủ (CPP) với ràng buộc năng lượng

- Bài toán bao phủ không có ràng buộc năng lượng - đã được nghiên cứu rất nhiều [3]. Bên cạnh đó, bài toán bao phủ với các ràng buộc về năng lượng là một bài toán mới [2], [3].
- Do năng lượng của Robot bị hữu hạn, Robot không thể bao phủ toàn bộ môi trường trong một lần đi. Trước khi hết pin, Robot phải quay lại trạm sạc để được sạc đầy và tiếp tục công việc của mình [2]. Điều này ảnh hưởng nhiều đến kết quả hoàn thành nhiệm vụ công việc của robot.

Wei, M., & Isler, V. (2018, May). Coverage path planning under the energy constraint. In 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 368-373). IEEE. [2]



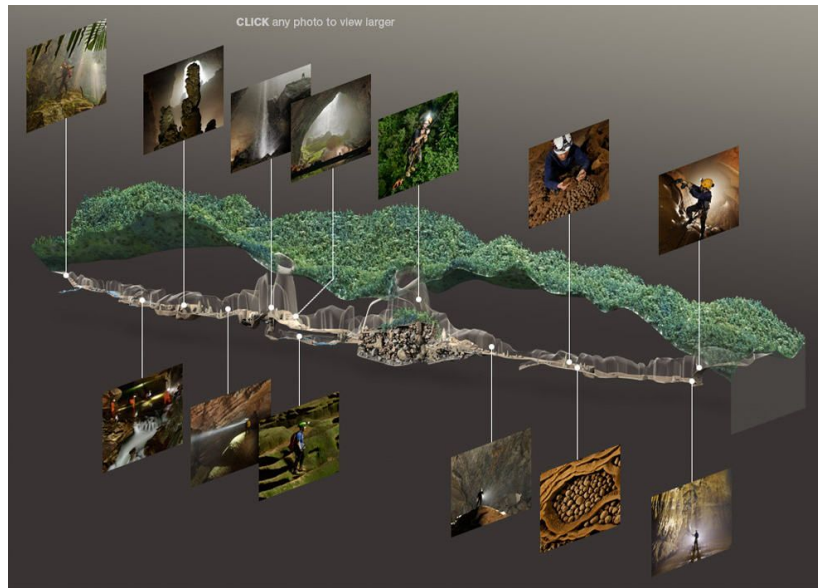
Bài toán lập đường đi bao phủ (CPP)



Bài toán lập đường đi bao phủ (CPP)

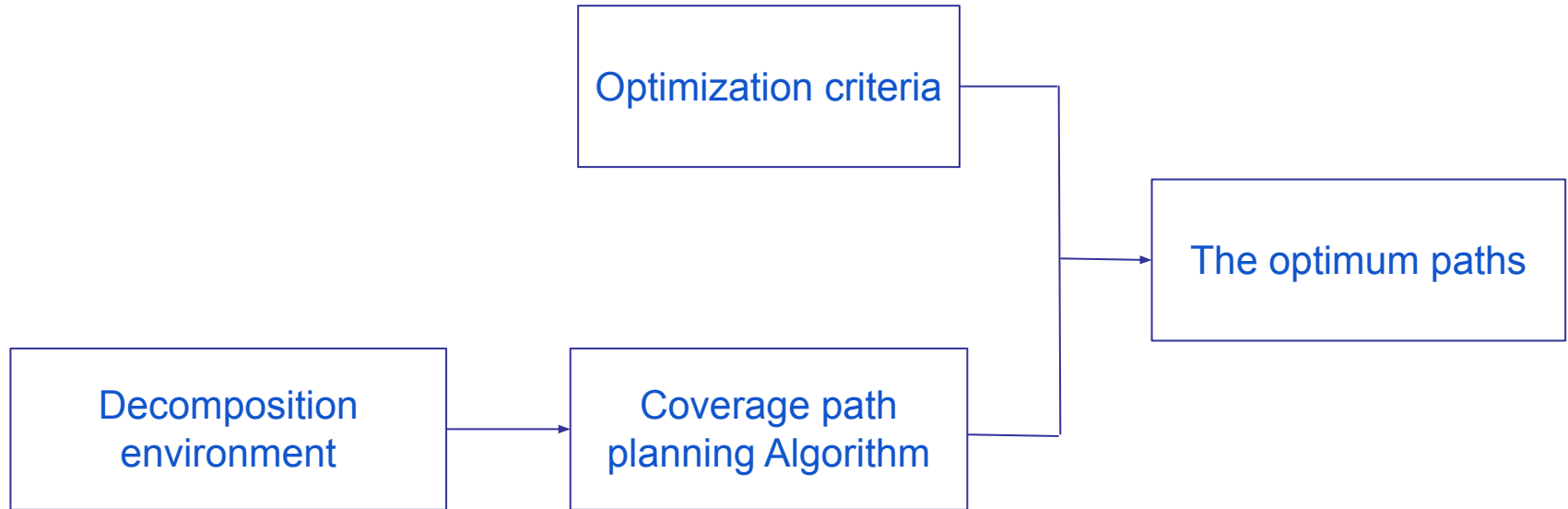
Offline CPP: Thông tin về môi trường và chướng ngại vật (như hình dạng, vị trí,...) đã biết

Online CPP: Robot sẽ khám phá môi trường mà chưa có thông tin về môi trường, đồng thời phát hiện và tránh chướng ngại vật



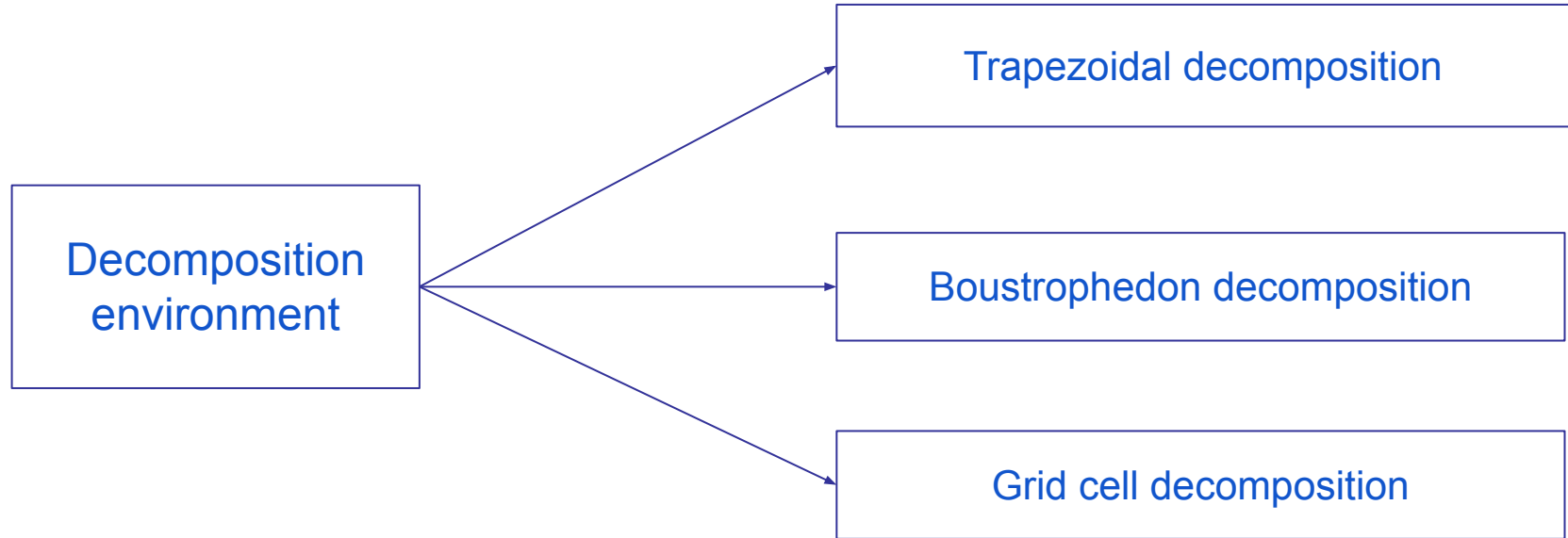


Offline CPP Problem





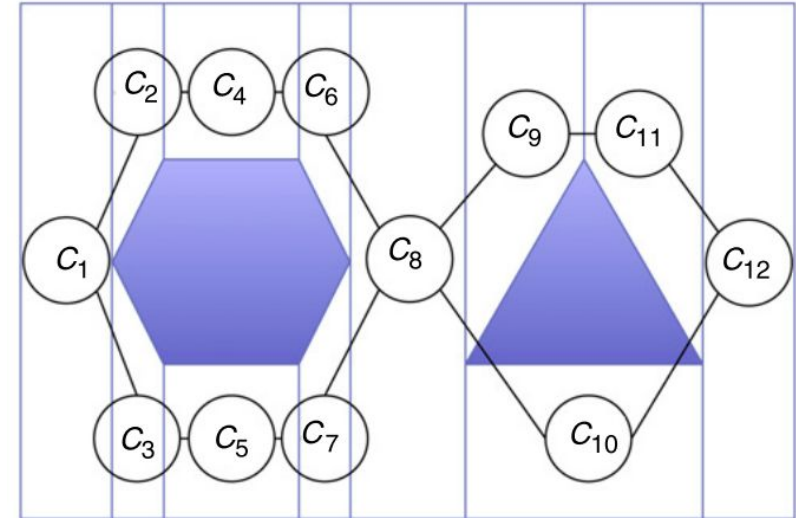
Decomposition offline environment[1]



[1] Galceran, Enric, and Marc Carreras. "A survey on coverage path planning for robotics." *Robotics and Autonomous systems* 61.12 (2013): 1258-1276.

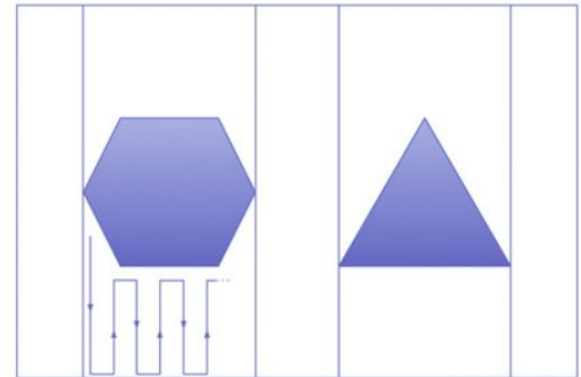
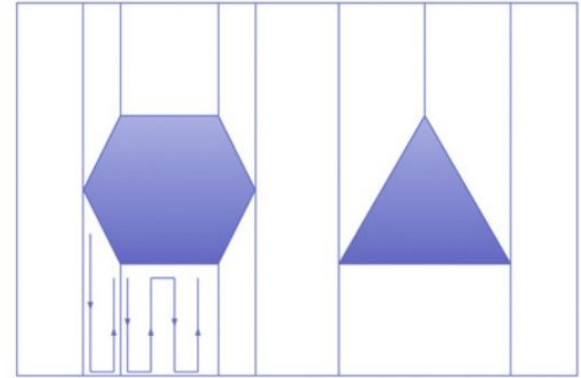
Trapezoidal decomposition[1]

- Môi trường áp dụng: Môi trường và chướng ngại vật đa giác
- Cách phân rã: Tại các đỉnh của đa giác kẻ các đường thẳng song song với nhau và vuông góc với biên của môi trường
- Nhược điểm:
 - Chỉ áp dụng được cho môi trường, chướng ngại vật dạng đa giác
 - Dễ đi các đường lặp lại



Boustrophedon decomposition[1]

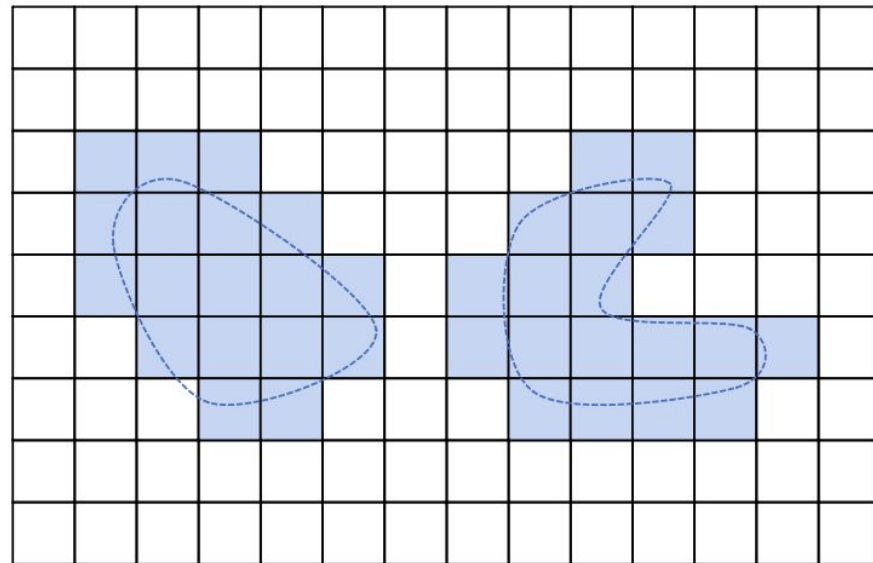
- Môi trường áp dụng: Môi trường và chướng ngại vật có dạng đa giác
- Cách phân rã: Tương tự như Trapezoidal decomposition nhưng chỉ xét các đỉnh có thể kéo dài về 2 phía mà không bị chặn bởi chướng ngại vật
- Nhược điểm:
 - Chỉ áp dụng được cho môi trường và chướng ngại vật đa giác



[1] Galceran, Enric, and Marc Carreras. "A survey on coverage path planning for robotics." *Robotics and Autonomous systems* 61.12 (2013): 1258-1276.

Grid cell decomposition [1]

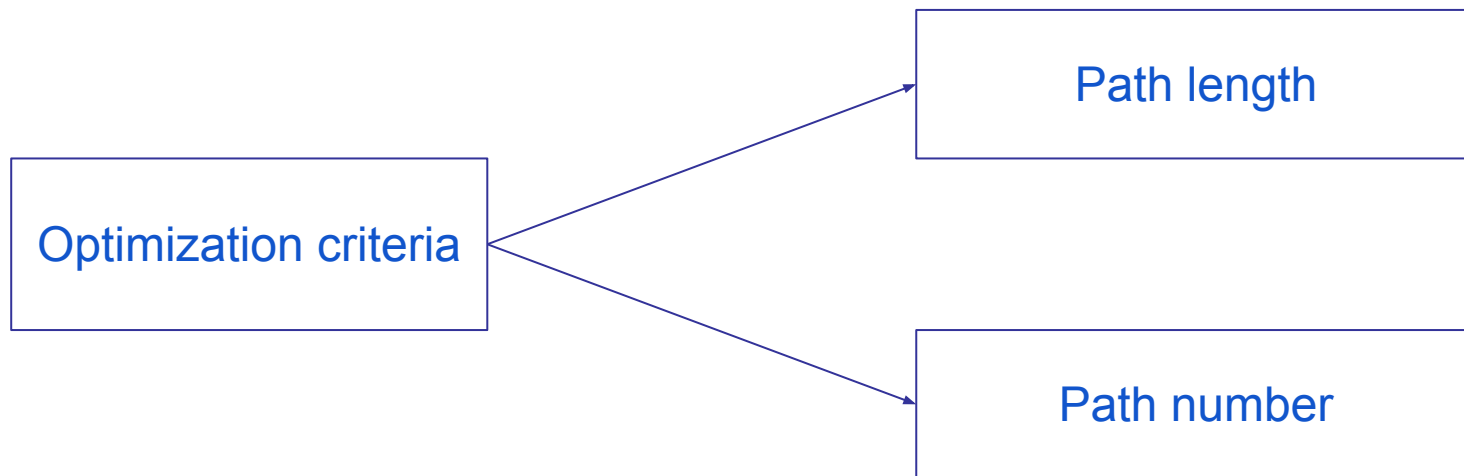
- Môi trường áp dụng: Môi trường bất kì
- Cách phân rã: Chia môi trường, chướng ngại vật thành lưới các ô vuông nhỏ
- Nhược điểm:
 - Phương pháp phân rã tương đối
 - Độ chính xác phụ thuộc vào kích thước ô
 - Bộ nhớ lưu trữ lớn



[1] Galceran, Enric, and Marc Carreras. "A survey on coverage path planning for robotics." *Robotics and Autonomous systems* 61.12 (2013): 1258-1276.



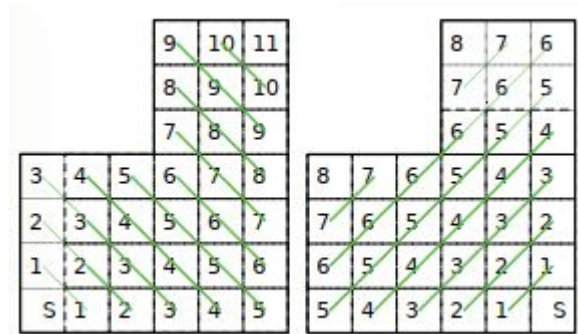
Optimization criteria[2]



3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 1: CPP with the energy constraint (1)

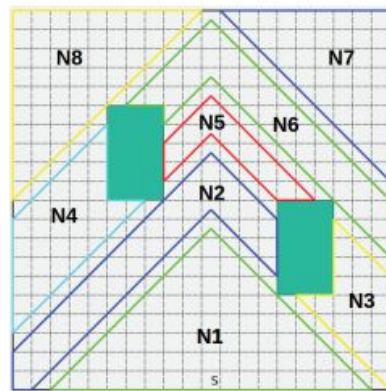
- Nhóm tác giả [2] đề xuất thuật toán lập đường đi bao phủ cho môi trường offline contour connected.
- Để giải quyết bài toán: tác giả đã giới thiệu các chiến lược di chuyển riêng nhằm thăm những ô ở xa nhất trước sau đó mới thăm những ô gần trạm sạc.



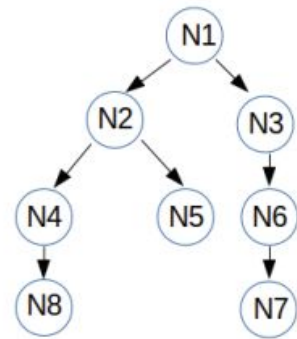
3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.

- Nhóm tác giả đề xuất thuật toán phân chia **môi trường bất kì** thành dạng cây với mỗi node là 1 môi trường contour connected
- Gom các node của cây thành working zone mà trong đó mỗi phần tử không thể thăm bằng đường đơn duy nhất
- Hạn chế số lần về thăm trạm sạc



(a)



(b)

Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.



3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.

Phát biểu bài toán

- Cho môi trường P có chứa chướng ngại vật, được biểu diễn dưới dạng lưới ô.
- Môi trường có duy nhất một trạm sạc S .
- Robot chỉ có thể di chuyển tuyến tính và bị giới hạn về năng lượng, robot chỉ có thể di chuyển tối đa B ô trong một lần sạc.
- Cần xác định tập các con đường $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$ bao phủ toàn bộ môi trường P , đảm bảo số con đường là nhỏ nhất và tổng chiều dài các con đường là nhỏ nhất.



3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.

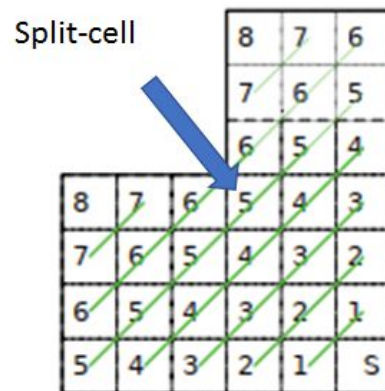
Mô hình hóa

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">● Đầu vào :<ul style="list-style-type: none">○ Môi trường P, chương ngại vật được phân rã lưới ô○ Vị trí trạm sạc S○ Năng lượng B của robot● Đầu ra :<ul style="list-style-type: none">○ Tập con đường $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$ bao phủ P | <ul style="list-style-type: none">● Điều kiện :<ul style="list-style-type: none">○ Robot di chuyển tuyến tính○ π_i bắt đầu và kết thúc tại S○ $\pi_i \leq B$● Mục tiêu :<ul style="list-style-type: none">○ Tối thiểu hóa số con đường và tổng chiều dài các con đường |
|---|--|

3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.

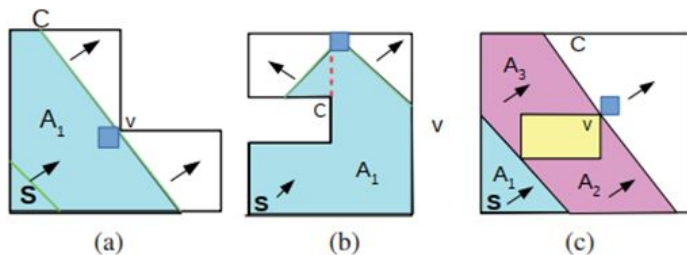
- **Contour** : đường nối các ô cùng khoảng cách đến trạm sạc
- **Split-cell** : Ô nằm trên contour mà contour đó sát với biên và ô đó không nằm ở hai đầu mút contour
- **Contour-connected environment**: môi trường không chứa split-cell



Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.

3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.

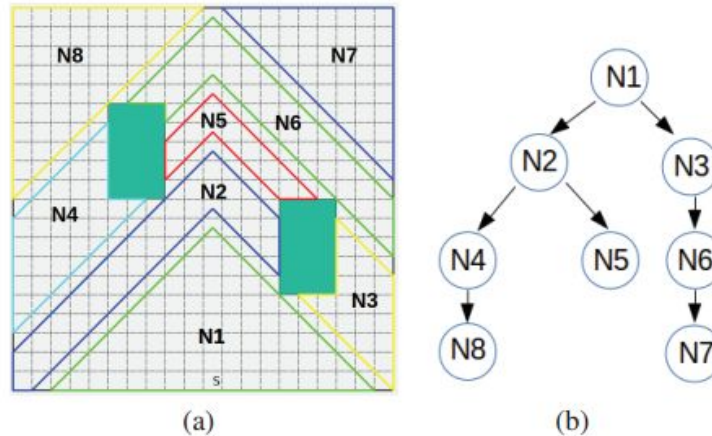


- Split-cell phân chia môi trường thành nhiều môi trường contour connected
- Phân loại split-cell:
 - Một quá trình quét chia thành nhiều quá trình quét khác (hình a, b)
 - Nhiều quá trình quét hợp lại thành một (hình c)

Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.

3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.



Biểu diễn mỗi trường dạng cây khi xác định được tập split cell

Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.

3. Một số nghiên cứu liên quan

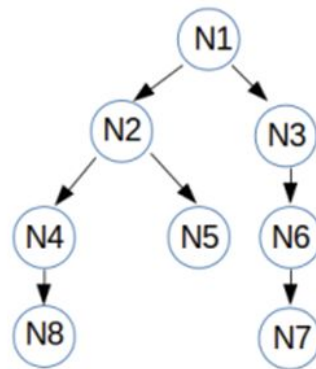
Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.

Input:

- T , cây biểu diễn môi trường
- B , năng lượng sạc đầy của robot

Output: Working zone $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ với A_i là một nhóm các node

Ràng buộc: A_i không thể bao phủ bảo một con đường

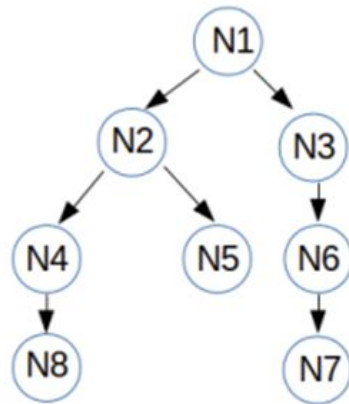


Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.

3. Một số nghiên cứu liên quan

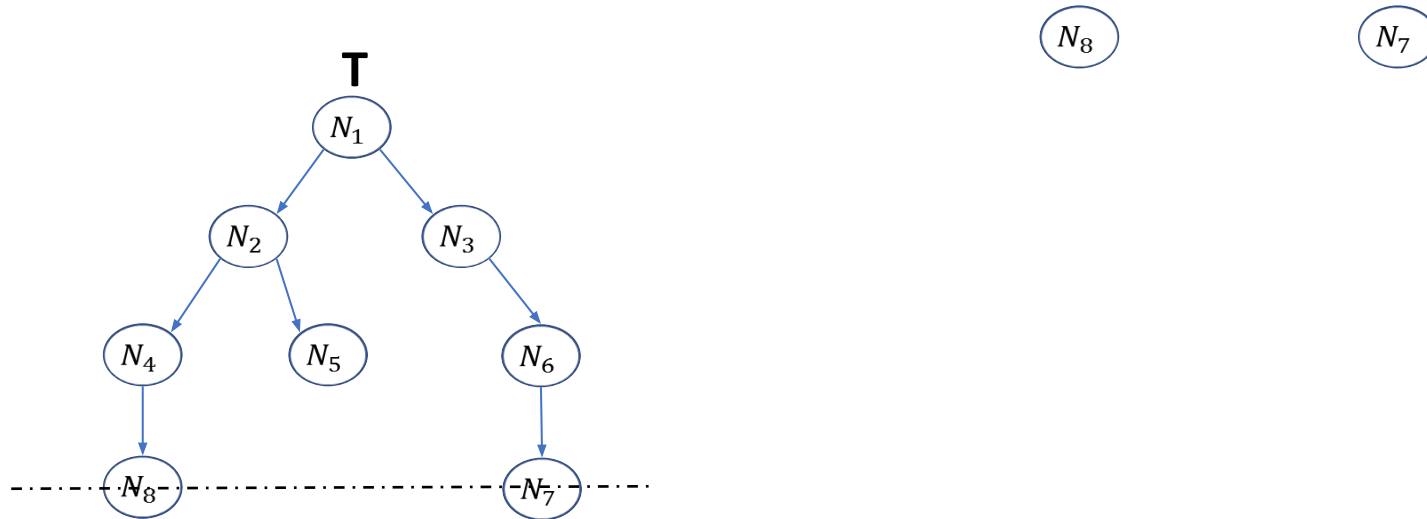
Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.

- Thuật toán xác định tập working zone A được thực hiện theo độ sâu từ dưới lên
- Tại mỗi độ sâu, $\{N_1, N_2, \dots, N_p\}$ là các node con của N, thực hiện 2 bước :
 - Nếu $\text{subtree}(N_i)$ không thể bao phủ bằng đường đơn duy nhất \rightarrow thêm $\text{subtree}(N_i)$ vào A, xóa $\text{subtree}(N_i)$ khỏi cây
 - Với các node cùng độ sâu còn lại, lập thành các subarea không thể bao phủ bằng đường đơn, sau đó thực hiện như bước trên.



3. Một số nghiên cứu liên quan

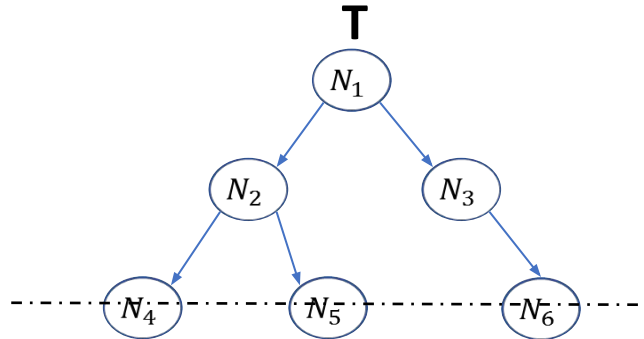
Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.



Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.

3. Một số nghiên cứu liên quan

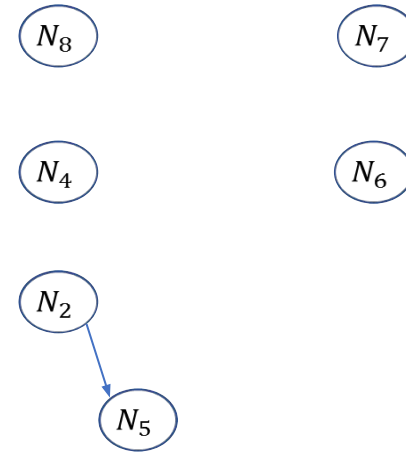
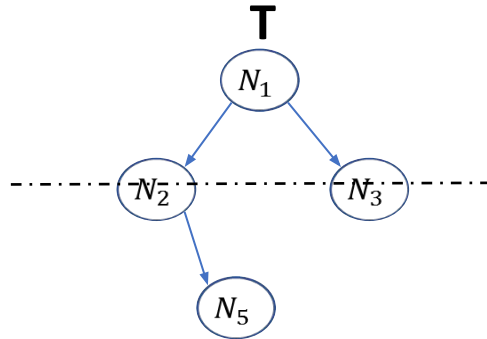
Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.



Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.

3. Một số nghiên cứu liên quan

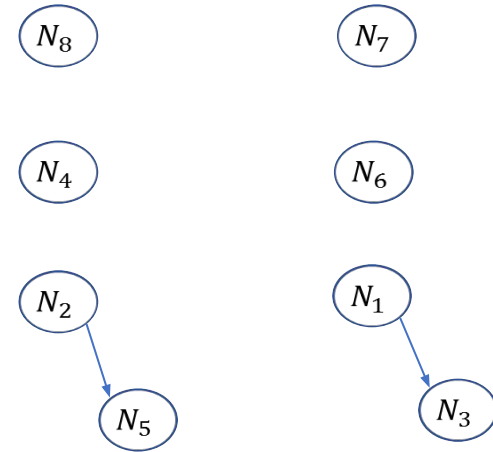
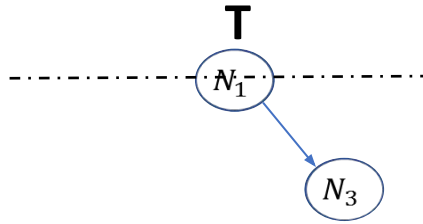
Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.



Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.

3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.



Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.

3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.

- Thuật toán bao phủ toàn bộ môi trường thăm toàn bộ tập working zone.

Algorithm 2 Coverage Algorithm.

Input: The working zone $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$.

Output: Solution paths Π_{sol1}, Π_{sol2} .

```
1:  $\Pi_1 = \emptyset; \Pi_2 = \emptyset; i = 1; j = 1;$ 
2: while  $P$  is not fully covered do
3:   Start recording path  $\pi_i$ ;
4:    $c_0 \in A_t \leftarrow$  closest uncovered cell in  $P$ ; Move to  $c_0$ ;
5:    $cover(A_r)$ ;
6:   if  $remains(subTree(A_t))$  can be fully covered by
     one path then
7:     Add  $\pi_j$  to cover  $remains(subTree(A_t))$ ;
8:     Add  $\pi_j$  to  $\Pi_{sol2}; j = j + 1;$ 
9:   end if
10:  Add  $\pi_i$  to  $\Pi_{sol1}; j = j + 1;$ 
11: end while
```

Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.



3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.

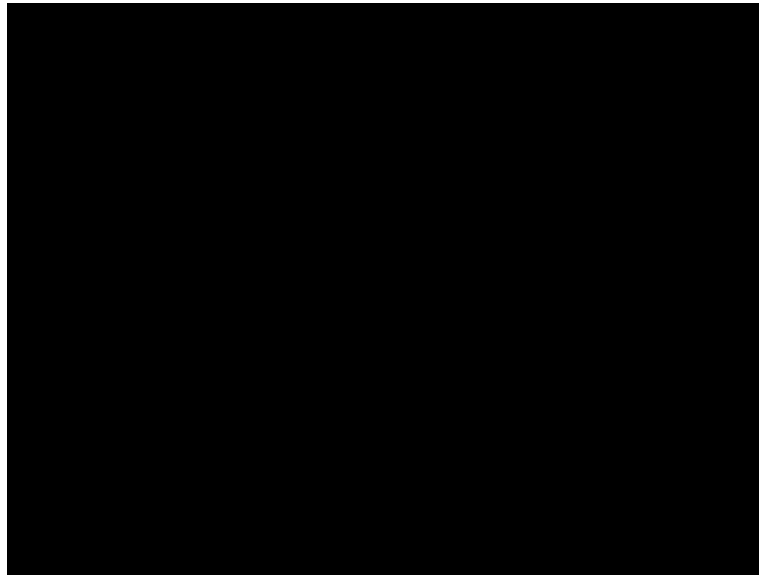
Kết quả:

- $n \leq 16(\ln|P|)n^*$ với n và n^* là số đường đi của thuật toán và số đường đi tối ưu
- $l \leq 32(\ln|P|)l^*$ với l và l^* là độ dài đường đi của thuật toán và độ dài tối ưu



3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.





3. Một số nghiên cứu liên quan

Bài 2: A log-approximation for CPP with the energy constraint.

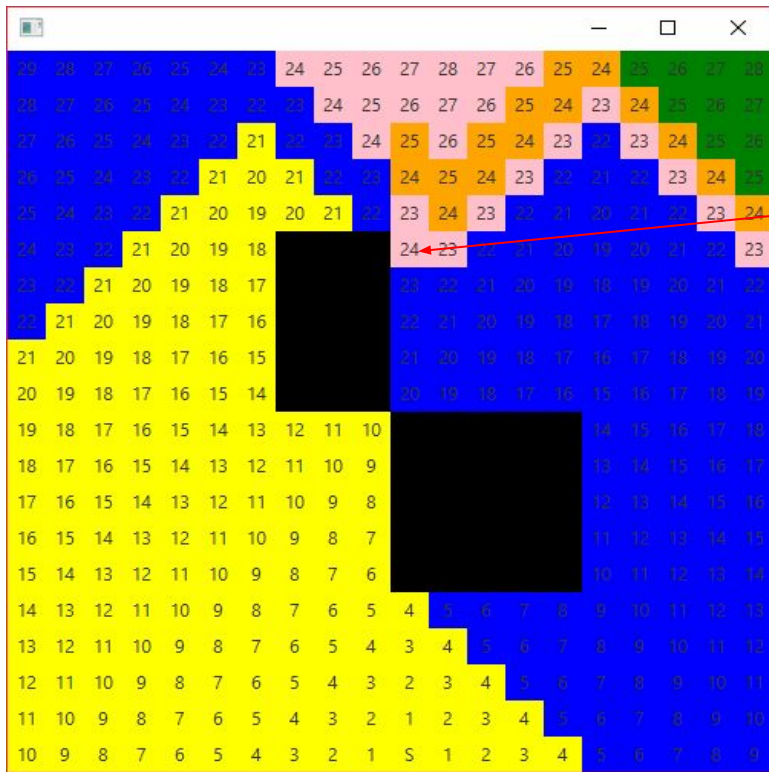
Ưu điểm:

- Robot hạn chế quay trở lại trạm sạc do cơ chế chia cây

Nhược điểm:

- Robot bị giới hạn về chuyển động tuyến tính
- Mô hình đang giải quyết bài toán offline và không xét đến các ràng buộc khác ngoài ràng buộc năng lượng giới hạn
- **Số cell bị lặp lại nhiều rất nhiều**

Vấn đề



Vị trí phân chia không chính xác

Boustrophedon Algorithm

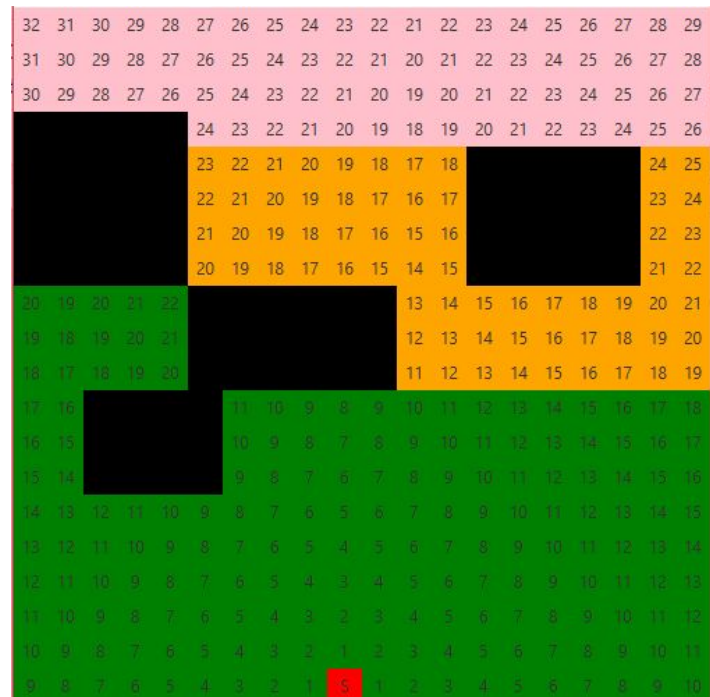
1. Sử dụng phân chia môi trường theo Boustrophedon Decomposition
2. Nhóm các môi trường con theo thuật toán nhóm cây để thu được tập working zone
3. Bao phủ từng phần tử của working zone bằng chuyển động boustrophedon

Đề xuất (tiếp)

29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
24	23	22	21	20						16	15	14	15	16	17	18	19	20	21
23	22	21	20	19						15	14	13	14	15	16	17	18	19	20
22	21	20	19	18						14	13	12	13	14	15	16	17	18	19
21	20	19	18	17						13	12	11	12	13	14	15	16	17	18
20	19	18	17	16						12	11	10	11	12	13	14	15	16	17
19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	10	11	12				16	17	18
18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	9	10	11				15	16	17
17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	8	9	10				14	15	16
16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	7	8	9				13	14	15
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	6	7	8				12	13	14
14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9

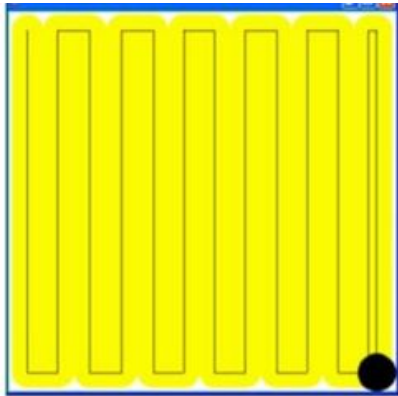
29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
24	23	22	21	20						24	23	22	21	20	19	18	19	20	21
23	22	21	20	19						23	22	21	20	19	18	17	18		24
22	21	20	19	18						22	21	20	19	18	17	16	17		23
21	20	19	18	17						21	20	19	18	17	16	15	16		22
20	19	18	17	16						20	19	18	17	16	15	14	15		21
19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	10	11	12						
18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	9	10	11						
17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	8	9	10						
16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	7	8	9						
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	6	7	8						
14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Phân chia môi trường theo Boustrophedon Decomposition

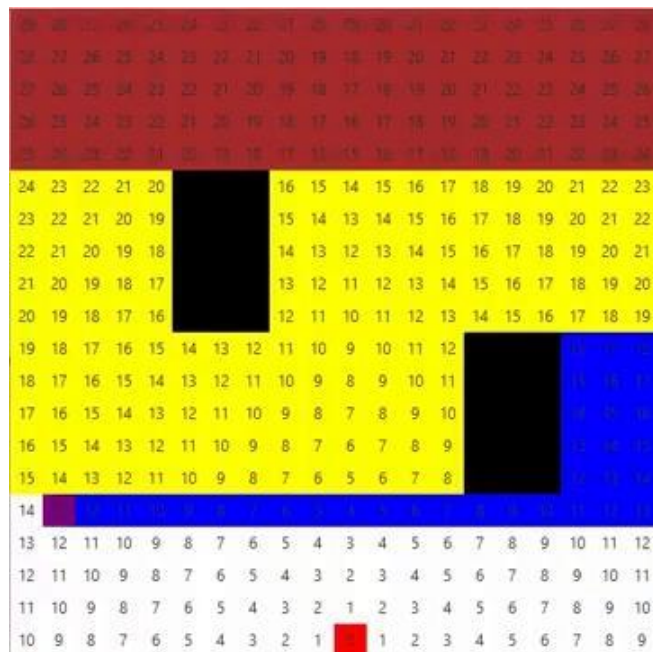


37

Đề xuất (tiếp)

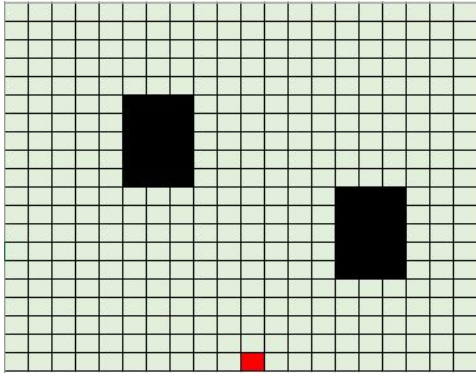


Chuyển động Boustrophedon

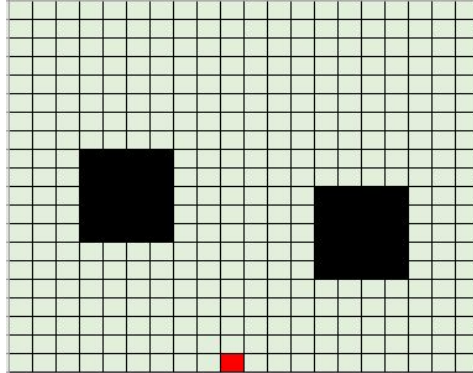


Dữ liệu thực nghiệm

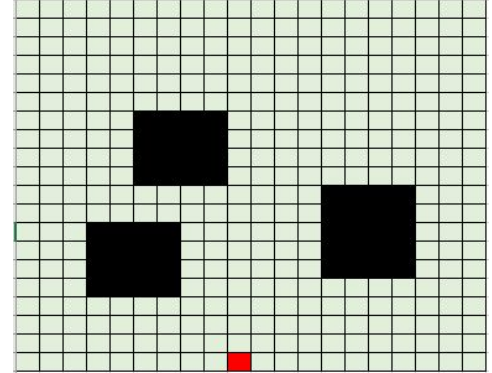
Môi trường phân chia dưới dạng lưới ô, chướng ngại vật hình chữ nhật



Test case 0

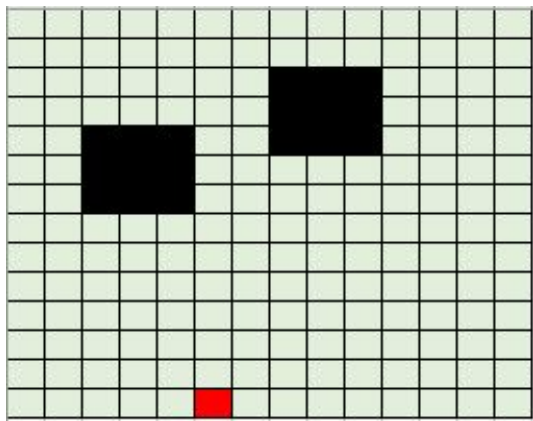


Test case 1

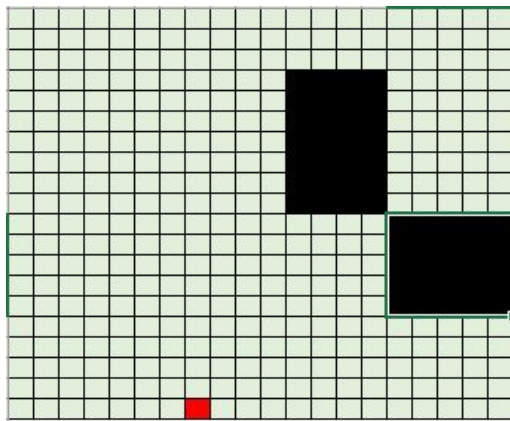


Test case 2

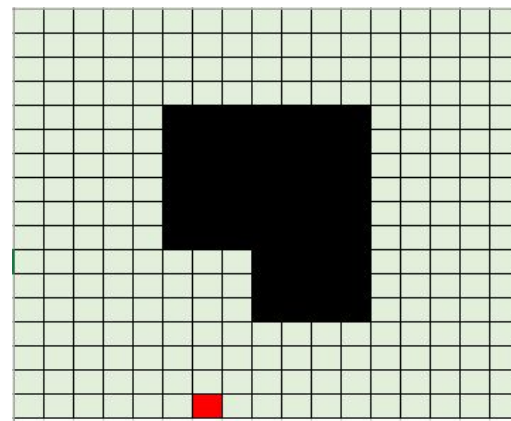
Dữ liệu thực nghiệm



Test case 3

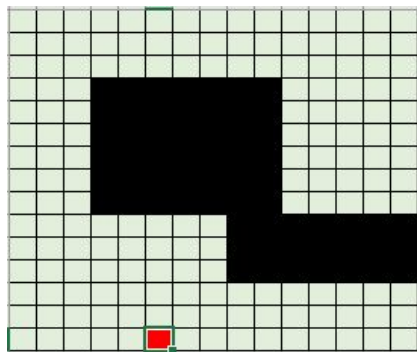


Test case 4

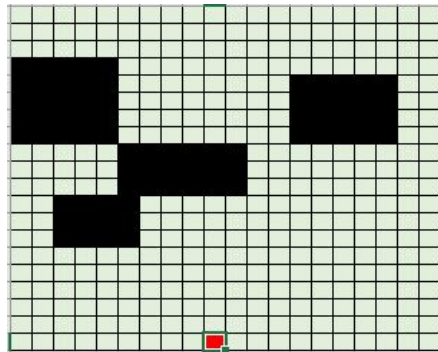


Test case 5

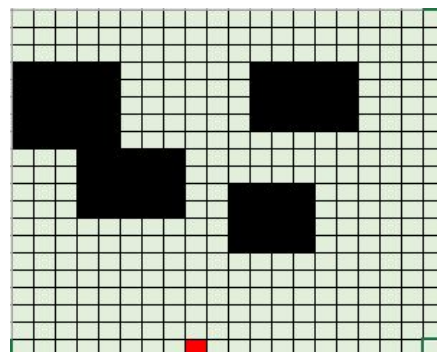
Dữ liệu thực nghiệm



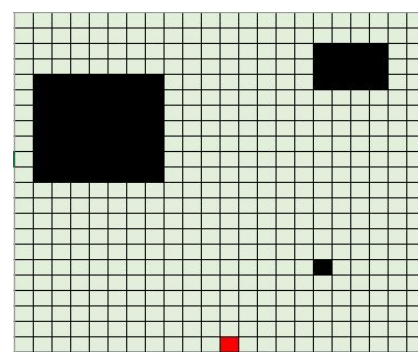
Test case 7



Test case 8



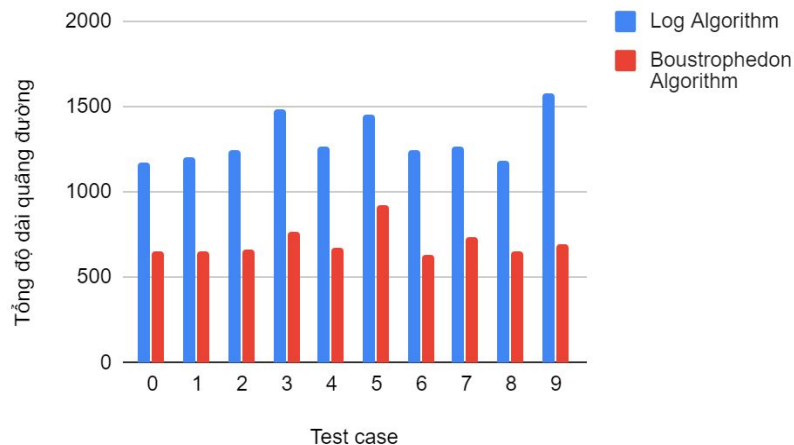
Test case 9



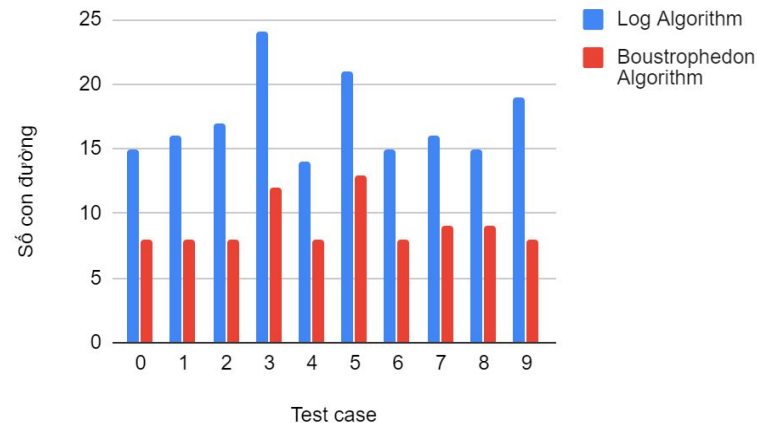
Test case 10

Kết quả

So sánh về tổng chiều dài quãng đường



So sánh về số đường dẫn



Test case	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
B	80	80	80	64	94	74	88	86	82	86



Nhận xét

- Chi phí cả về tổng chiều dài quãng đường và số con đường do thuật toán Boustrophedon là tốt hơn so với Log Algorithm.
- Log Algorithm chuyển động trên giữa 2 điểm trên contour mất 2 đơn vị năng lượng, trong khi Boustrophedon chuyển động giữa 2 điểm liền nhau chỉ mất một đơn vị năng lượng. Do đó thuật toán đề xuất tốt hơn khoảng gần 2 lần.



5. Tài liệu tham khảo

1. Tzafestas, S. G. (2013). *Introduction to mobile robot control*. Elsevier.
2. Wei, M., & Isler, V. (2018, May). Coverage path planning under the energy constraint. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 368-373). IEEE.
3. E. Galceran and M. Carreras. A survey on coverage path planning for robotics. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12):1258–1276, 2013.
4. I. Shnaps and E. Rimon. Online coverage of planar environments by a battery powered autonomous mobile robot. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2):425–436, April 2016.
5. Wei, Minghan, and Volkan Isler. "A log-approximation for coverage path planning with the energy constraint." *Twenty-Eighth International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2018.
6. G. Sharma, A. Dutta, and J.-H. Kim. Optimal online coverage path planning with energy constraints. In *AAMAS*, 2019 (Accepted).



Cảm ơn cô và các
bạn đã lắng nghe