

Chương 3. Chuyển động tập thể (Collective movements)

TS. Phạm Duy Hưng

Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Công nghệ - ĐHQGHN

hungpd@vnu.edu.vn

Nội dung chương 3

- Di chuyển theo bầy (Flocking)
- Đội hình (Formation)
- **Bao phủ (Coverage)**
- **Phân nhiệm (Task Allocation)**

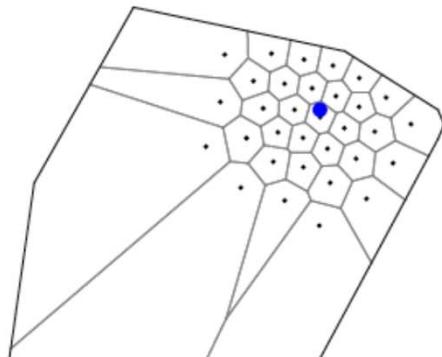
Phần 3. Điều khiển bao phủ (Coverage control)

Đọc:

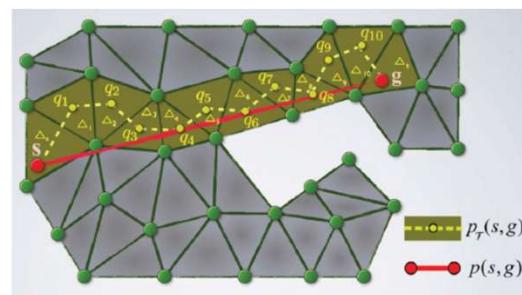
- [1] Cortes, Jorge, Sonia Martinez, Timur Karatas, and Francesco Bullo. "Coverage control for mobile sensing networks." *IEEE Transactions on robotics and Automation* 20, no. 2 (2004): 243-255.
- [2] Hung, Pham Duy, Tran Quang Vinh, and Trung Dung Ngo. "Distributed coverage control for networked multi-robot systems in any environments." In *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 1067-1072. IEEE, 2016.

Bao phủ là gì ?

- Bài toán bao phủ nghiên cứu cách thức phối hợp giữa các robot để tạo ra **vùng bao phủ của cảm biến** lên môi trường cho mục đích giám sát.



Phương pháp hình học sử dụng phân vùng Voronoi



Phương pháp thăm dò dựa trên mô hình xác suất với thuật toán tham lam

- ✓ **Bao phủ dạng lưới**
 - Không có cấu trúc (free configuration)
 - Cấu trúc định trước (predefined pattern)



Phương pháp sử dụng trường thế nhân tạo APF

Vùng và cấu trúc bao phủ đa robot

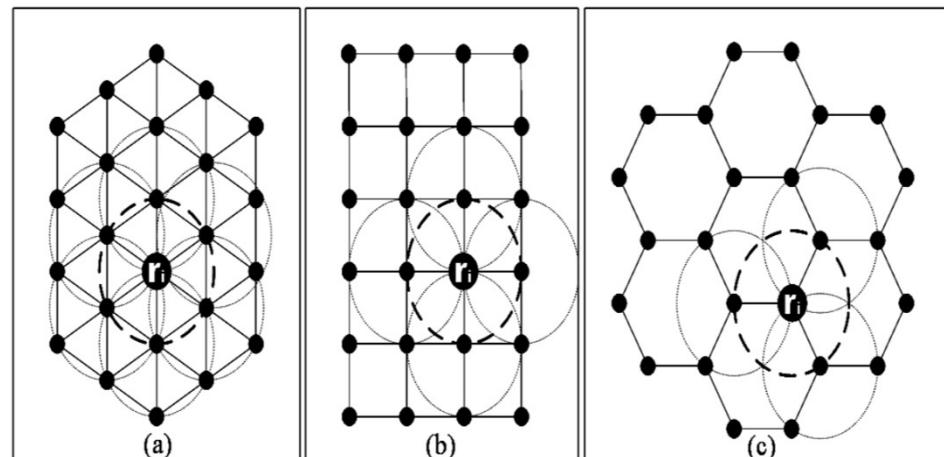
- Vùng bao phủ của mạng đa robot:

$$C = \bigcup_{i \in N} S_i$$

- Các cấu trúc lưới bao phủ:

- ✓ Lưới lục giác kín (còn gọi là lưới tam giác)
- ✓ Lưới vuông
- ✓ Lưới lục giác hở (lục giác không tâm)

[Ref]: Lee, Geunho, and Nak Young Chong. "A geometric approach to deploying robot swarms." *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 52.2-4 (2008): 257-280.



Diện tích bao phủ: a) $\frac{\sqrt{3}}{2} nd^2$, b) nd^2 và c) $\frac{3\sqrt{3}}{4} nd^2$
với n là số robot và d là bán kính phân bố

Điều khiển bao phủ dựa trên phân vùng Voronoi

- **Hàm tối ưu vị trí:**

$$\mathcal{H}(P, \mathcal{W}) = \sum_{i=1}^n \int_{W_i} f(\|q - p_i\|) \phi(q) dq$$

- ✓ $P = (p_1, \dots, p_n)$ Vị trí các robot
- ✓ Q bao gồm các phân vùng W_i không giao nhau: $Q = \bigcup W_i$
- ✓ $f(\|q - q_i\|)$ hàm suy giảm chất lượng cảm biến theo khoảng cách
- ✓ $\phi(q)$: hàm mật độ thông tin hoặc xác suất tại điểm q trong W_i
- **Tối đa hóa bao phủ để phát hiện thông tin**

Điều khiển bao phủ dựa trên phân vùng Voronoi

- **Phân vùng Voronoi:** Cho miền Q là tập hợp đa diện lồi, phân vùng Voronoi $V(p) = \{V_1, \dots, V_n\}$ được tạo bởi các điểm (p_1, \dots, p_n)

$$V_i = \{q \in Q \mid \|q - p_i\| \leq \|q - p_j\|, \forall j \neq i\}$$

Điều khiển bao phủ dựa trên phân vùng Voronoi

- **Tâm vùng Voronoi V_i**
$$C_V = \frac{1}{M_V} \int_V q \rho(q) dq$$
- ✓ M_V là “khối lượng”:
$$M_V = \int_V \rho(q) dq$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}_V}{\partial p_i}(P) = 2M_{V_i}(p_i - C_{V_i})$$
- ✓ $\rho(q) = \phi(q)$ là hàm mật độ $\rightarrow C_{V_i} = \operatorname{argmin}_{p_i} \mathcal{H}_V(P)$

Điều khiển bao phủ dựa trên phân vùng Voronoi

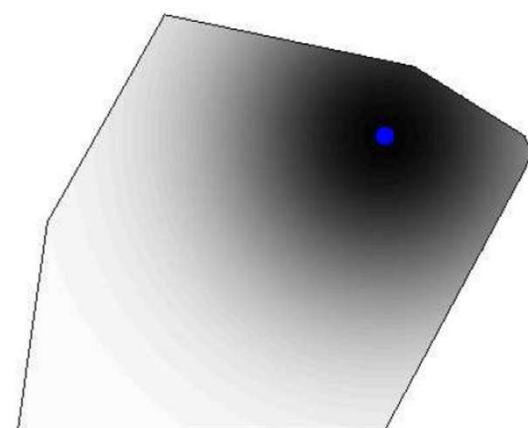
- **Thuật toán Lloyd**

- ✓ Vị trí ban đầu của robot $P = (p_1, \dots, p_n)$
- ✓ Tính phân vùng Voronoi $V(p) = \{V_1, \dots, V_n\}$
- ✓ Tính trọng tâm vùng Voronoi C_{V_i} của V_i
- ✓ Cập nhật vị trí robot $p_i \leftarrow C_{V_i}$
- ✓ Lặp lại cho đến khi $p_i \approx C_{V_i}$

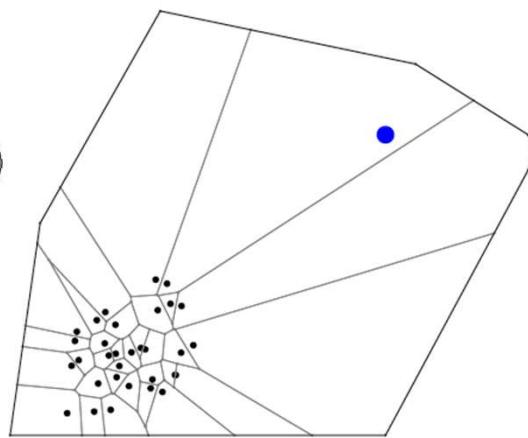
$$\dot{p}_i = u_i$$

$$u_i = -k_{\text{prop}}(p_i - C_{V_i})$$

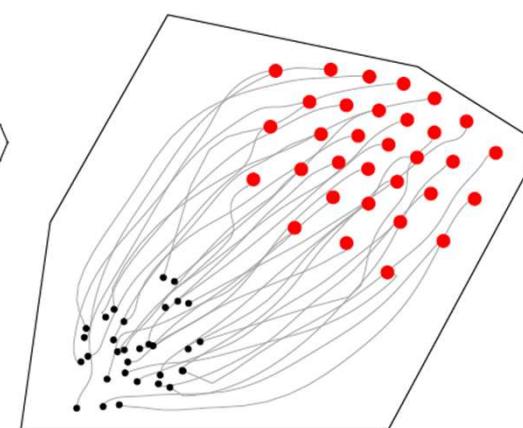
Điều khiển bao phủ dựa trên phân vùng Voronoi



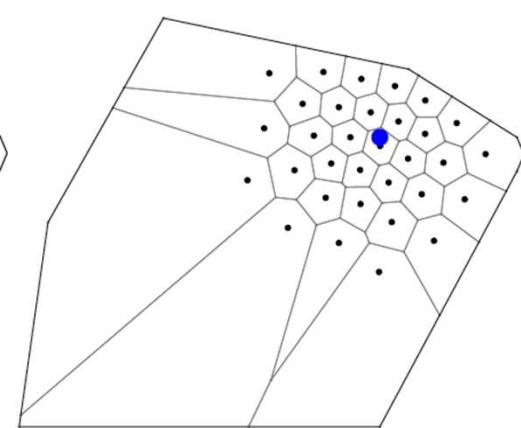
Môi trường đa giác có
hàm mật độ Gauss
 $\phi = \exp(-x^2 - y^2)$



Khởi tạo



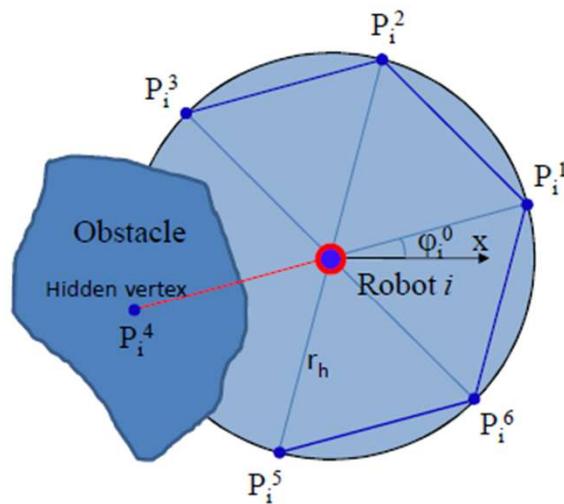
Quy đạo chuyển động



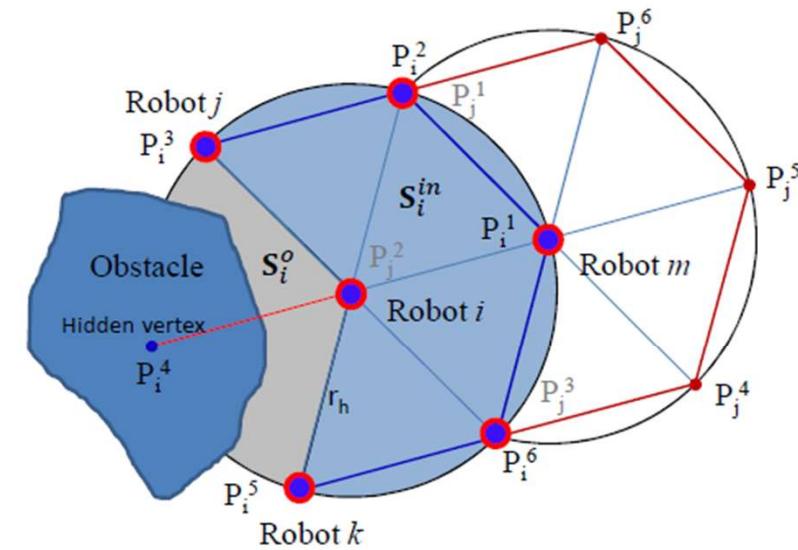
Triển khai hoàn thành

Điều khiển bao phủ dựa trên lưới lục giác

- Mỗi Robot có 6 đỉnh ảo phân bố đều theo cấu trúc lục giác, bán kính r_h
 - ✓ Nút lục giác đủ
 - ✓ Nút lục giác khuyết



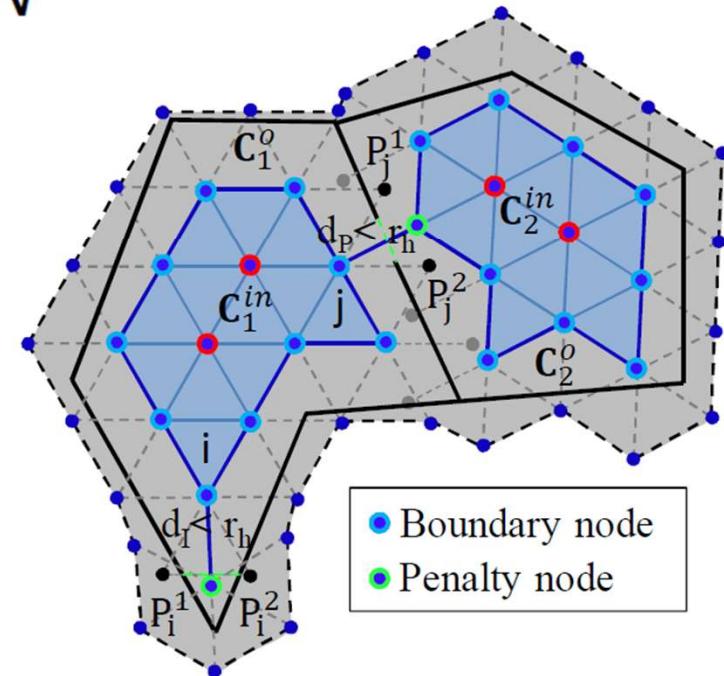
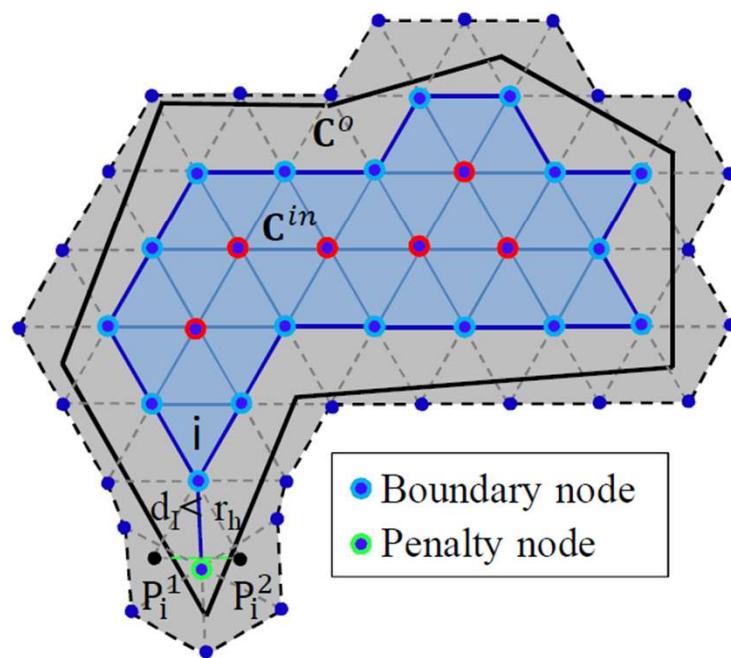
(a) 5 virtual targets of i



(b) 3 virtual targets of m

Điều khiển bao phủ dựa trên lưới lục giác

$$\mathbf{C} = \bigcup_{i \in N} \mathbf{S}_i$$



Quy tắc tạo đích ảo (Virtual Target Generation)

Quy tắc tạo đích ảo VTG

$$P_i^j = x_i + (r_h \cos \varphi_i^j, r_h \sin \varphi_i^j)$$

Với $j \in I = \{1, \dots, 6\}$

- Đích quy tắc:**

$$\varphi_i^j = \varphi_i^o + (j - 1) \frac{\pi}{3}$$

$$P_i = \{P_i^j, j \in I \mid P_i^j \notin (P_i^o \cup P_i^{ob})\}$$

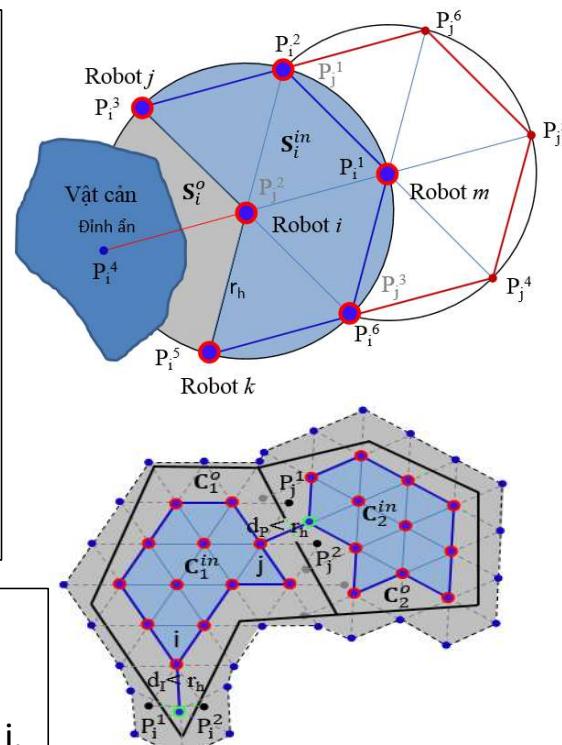
- Đích bất quy tắc:**

$$\varphi_i^{P_{jk}} = \varphi_i^j + \rho_p \frac{\varphi_i^j - \varphi_i^k}{2}$$

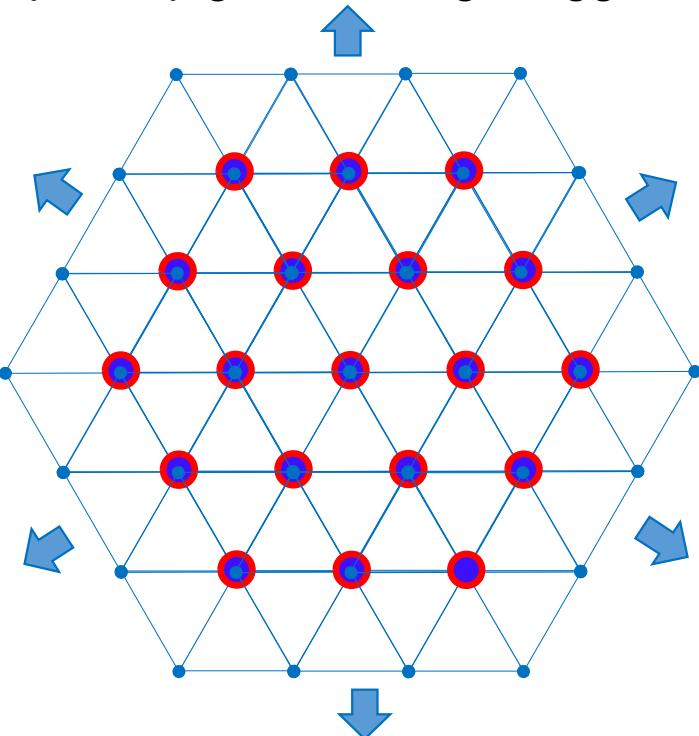
$$P_i^p = \{P_i^{P_{jk}}, j \in I, k \in I^+ \mid P_i^j, P_i^k \in P_i^{ob}\}$$

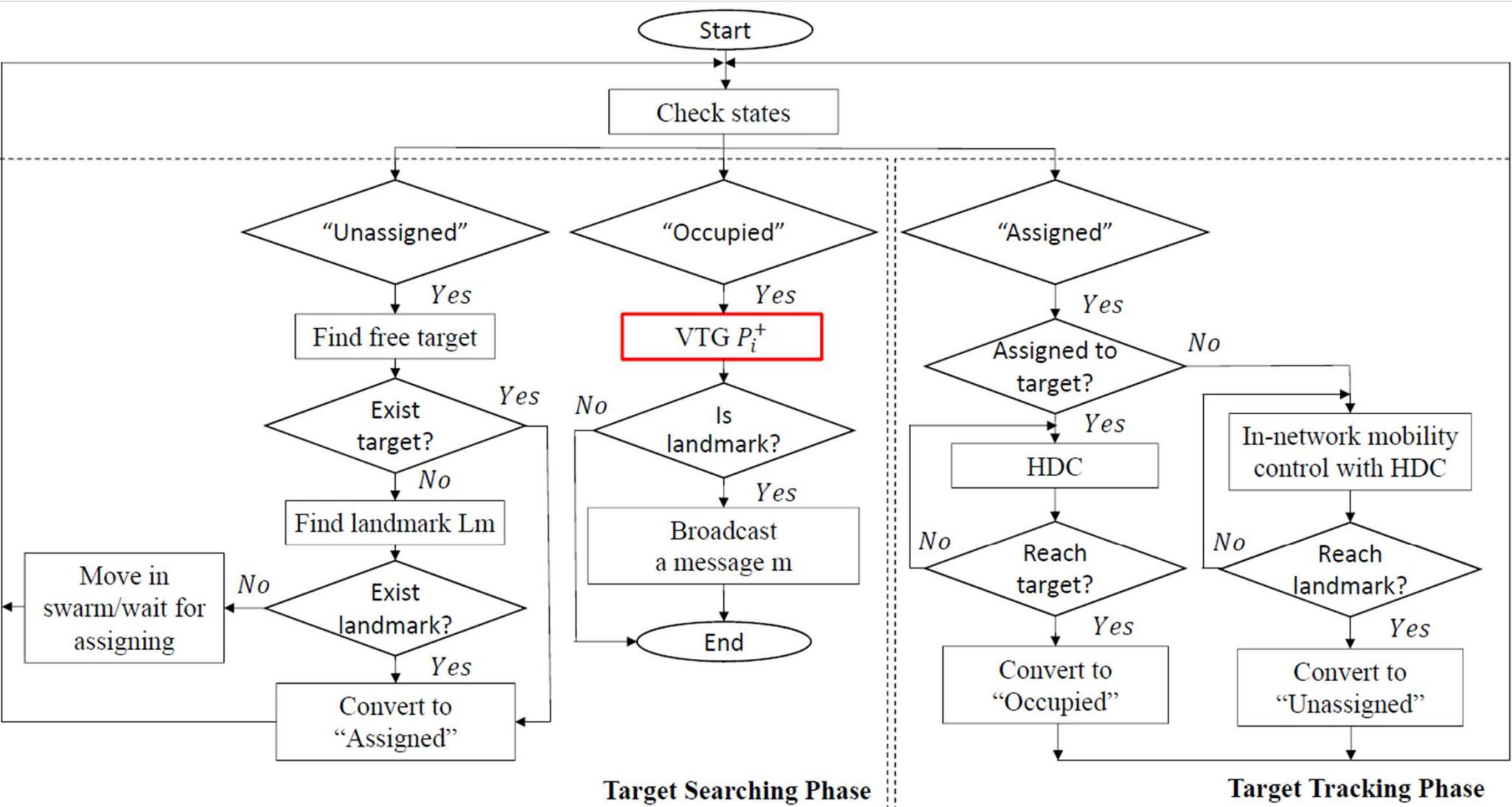
Bộ lọc đích ảo:

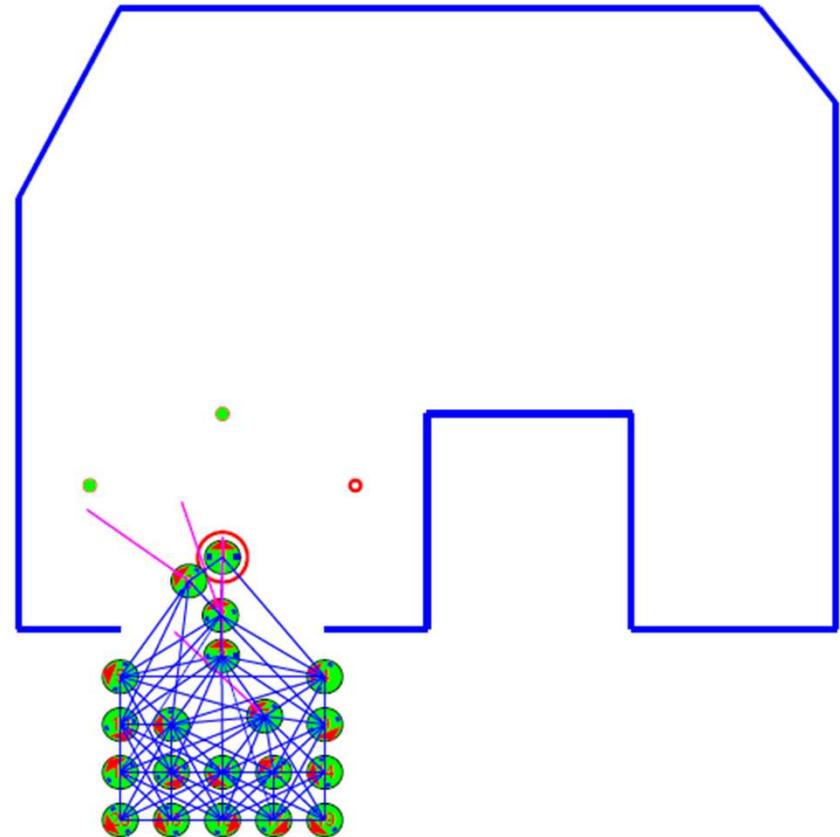
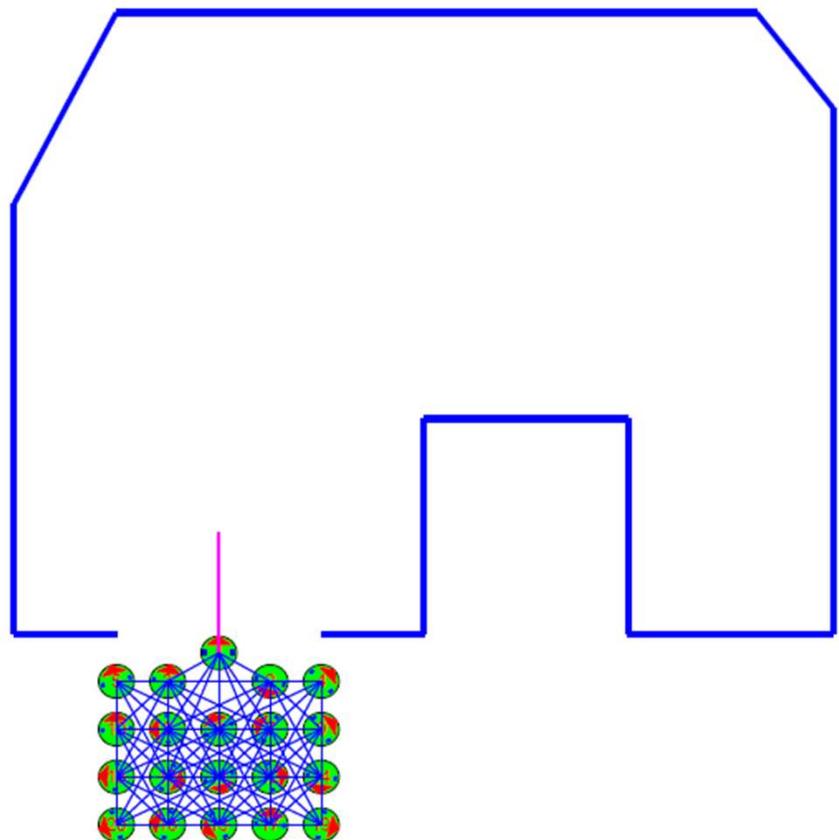
- ✓ $P_i^{N_i^o}$: tập các các đỉnh ảo đã được chiếm bởi các neighbor của robot i.
- ✓ P_i^{ob} : tập các đỉnh ẩn



Tạo lưới lục giác chiếm đóng không gian





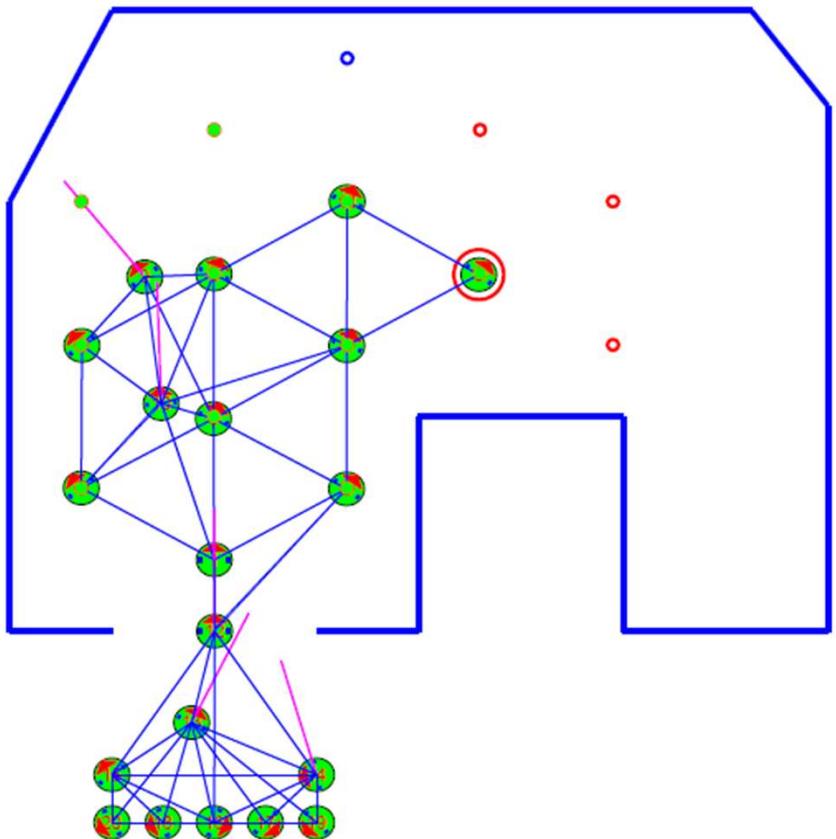
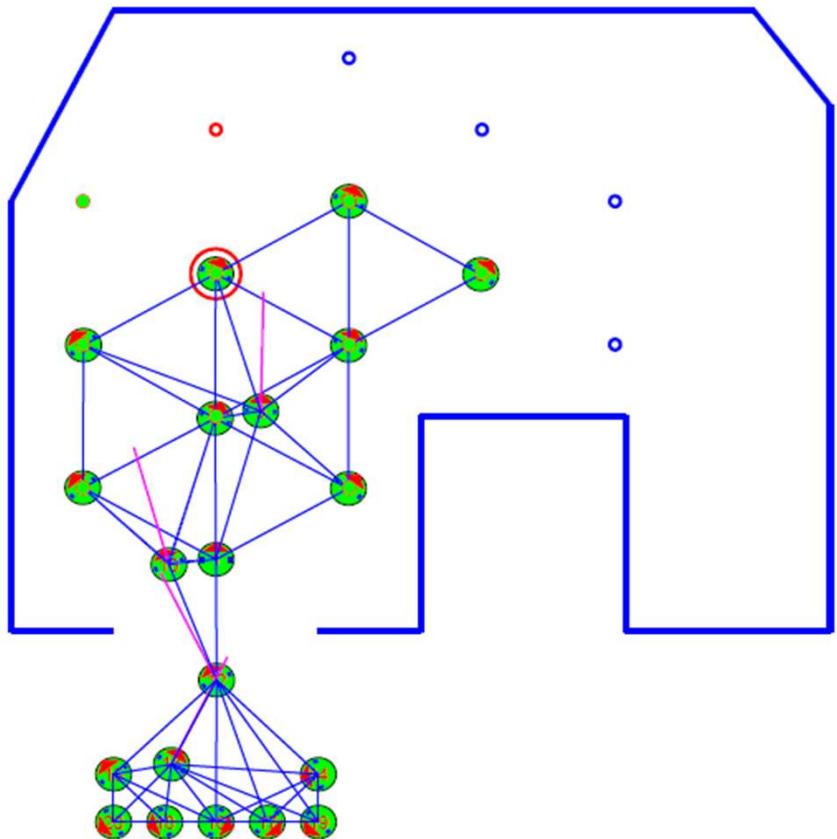


Activated landmark

Activated landmark's vertices

Assigned vertex

Inactivated landmarks' vertices

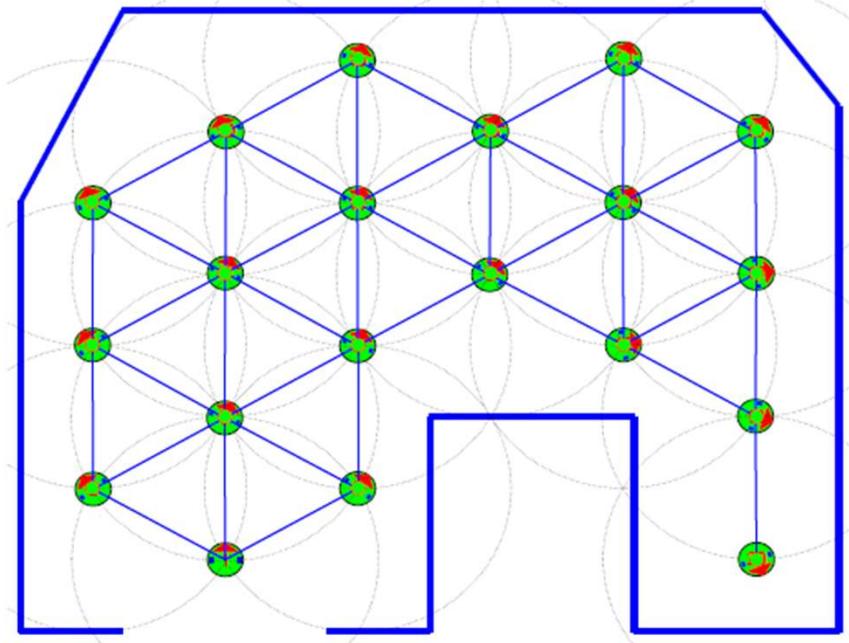
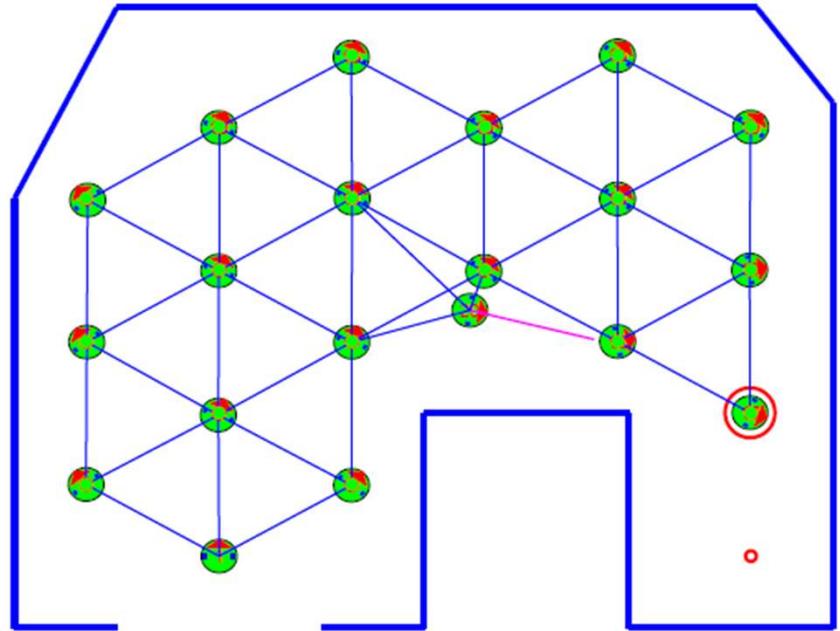


Activated landmark

Assigned vertex

Activated landmark's vertices

Inactivated landmarks' vertices



Video thí nghiệm: 1. <https://youtu.be/3NSJR7zxfEo>
 2. <https://www.youtube.com/watch?v=zYcsyFGsSoU>



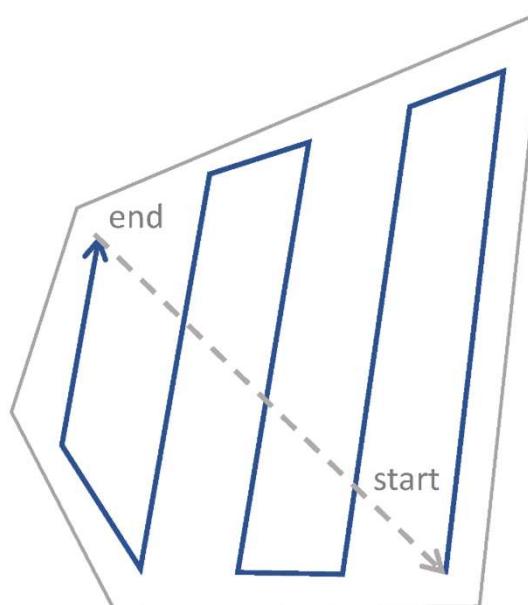
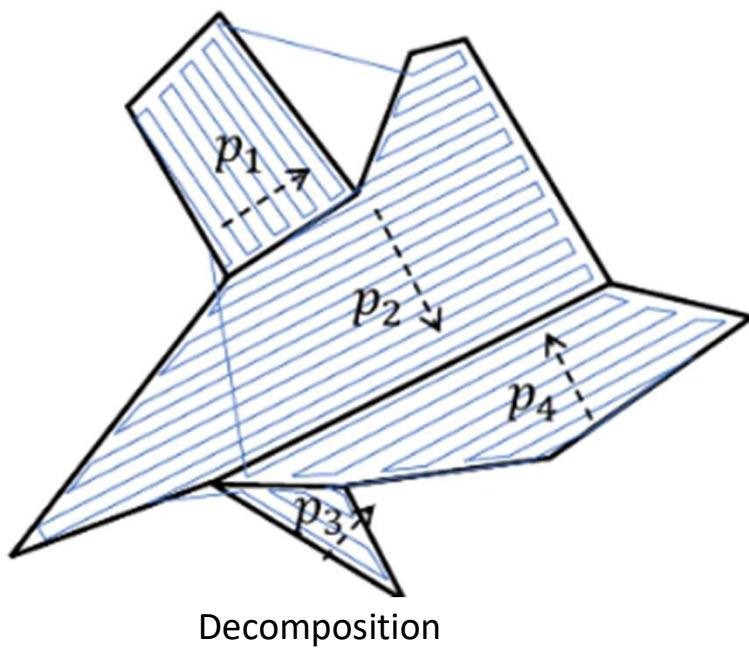
Activated landmark

Activated landmark's vertices

Assigned vertex

Inactivated landmarks' vertices

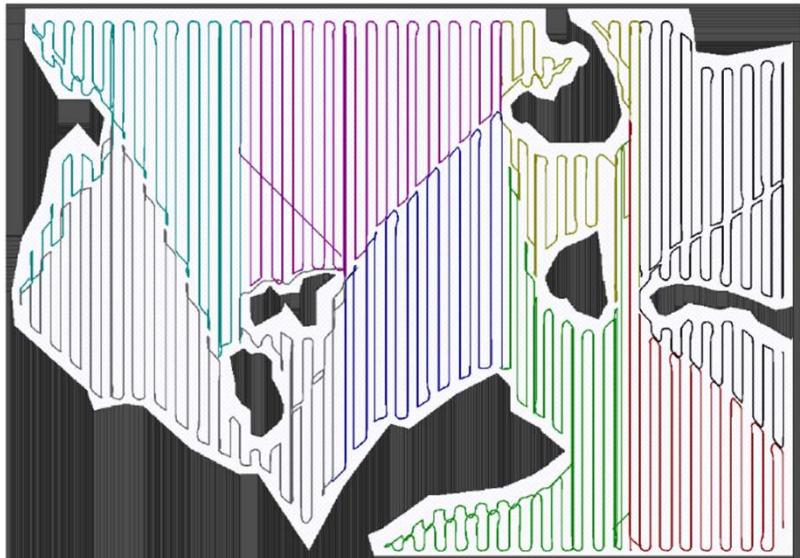
Coverage Path Planning (CPP) cho MRS (UAVs)



No decomposition

[1] Cabreira, T.M.; Brisolara, L.B.; Ferreira Jr., P.R. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles. *Drones* **2019**, 3, 4. <https://doi.org/10.3390/drones3010004>

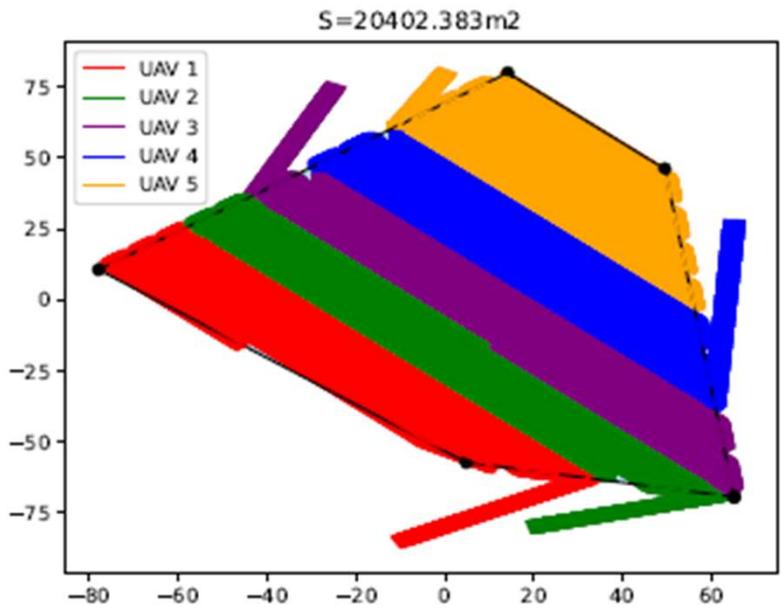
Decomposition



Phương pháp phân chia khu vực

[1] Karapetyan, Nare, et al. "Efficient multi-robot coverage of a known environment." *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2017.

✓ Phương pháp quét dòng (sweep-line approach)

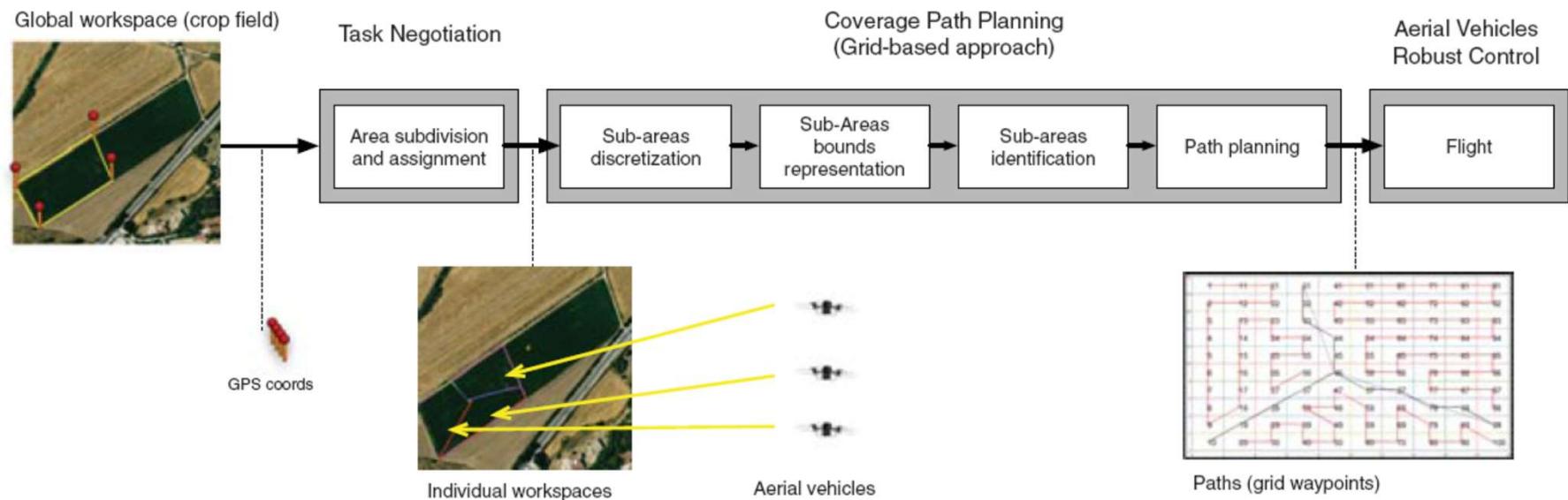


Phương pháp phân chia cân bằng

[2] Quang, Hung Pham, and Hung Pham Duy. "Multi-UAV Coverage Strategy Using a Balanced Decomposition Approach." *2023 12th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*. IEEE, 2023.

✓ Tối ưu thời gian (quãng đường, số lần turn) 19

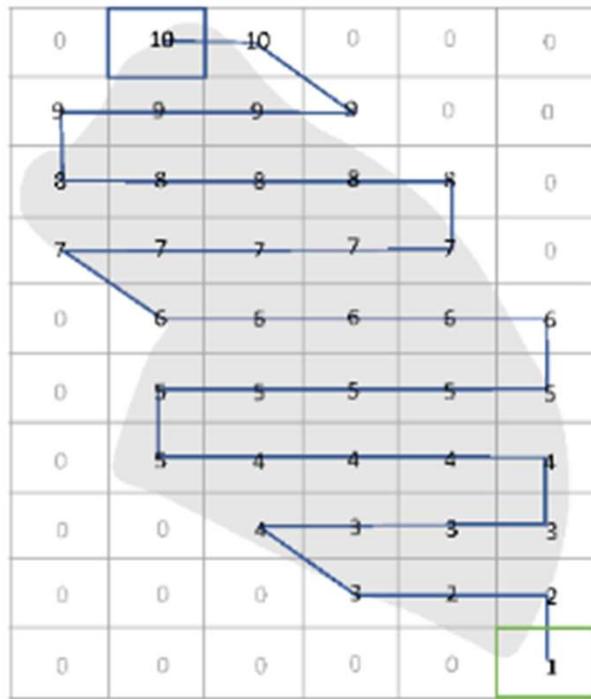
Decomposition



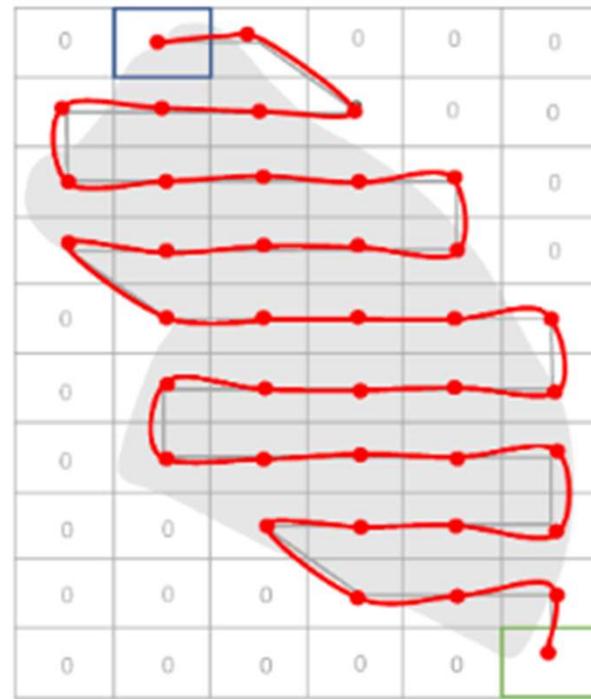
CPP dựa trên chia lưới dùng cho mục đích viễn thám trong nông nghiệp

[3] Barrientos, Antonio, et al. "Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots." *Journal of Field Robotics* 28.5 (2011): 667-689.

No Decomposition

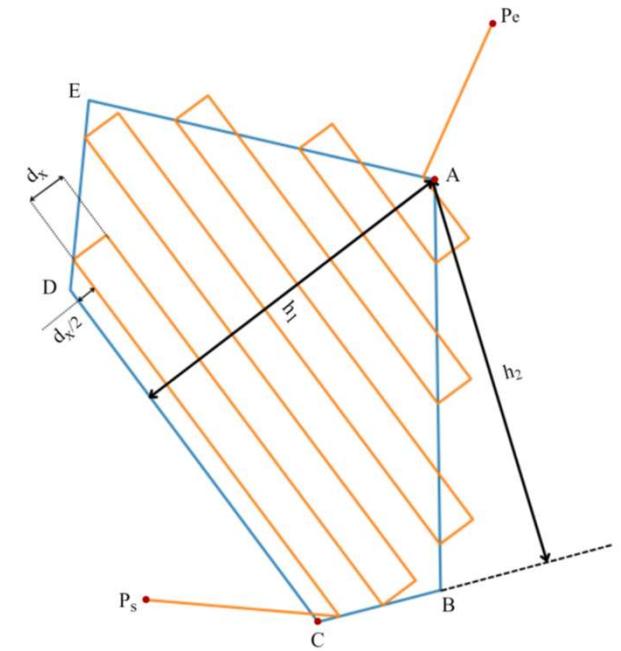


Wavefront (mặt sóng)



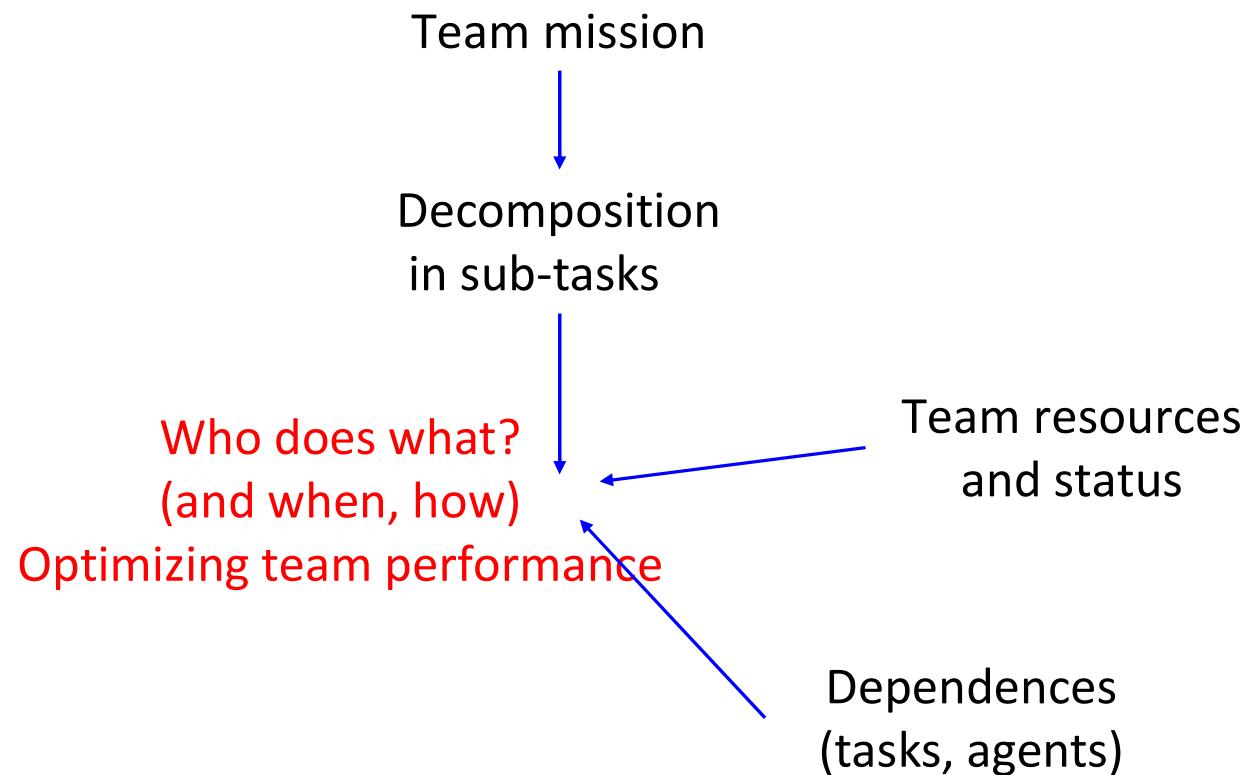
Cubic interpolation (nội suy bậc 3)

Phương pháp chia lưới



Phương pháp RCPP
(Rotating Calipers Path Planner)

Phần 4. Phân nhiệm (Task Allocation)



MRTA:

- Một tập nhiệm vụ T
- Một tập Robots/Agents $R \Rightarrow$ Tập hợp các sub-team 2^R
- Hàm đánh giá hiệu quả/chi phí của một nhóm robot tham gia thực hiện nhiệm vụ:

$$c: 2^T \times 2^R \rightarrow R$$

- Một ánh xạ phân nhiệm:

$$f: T \rightarrow 2^R$$

(mỗi nhiệm vụ được gán cho một sub-team)

- Yêu cầu: tìm ánh xạ phân nhiệm tối ưu sao cho hàm chi phí thấp nhất.

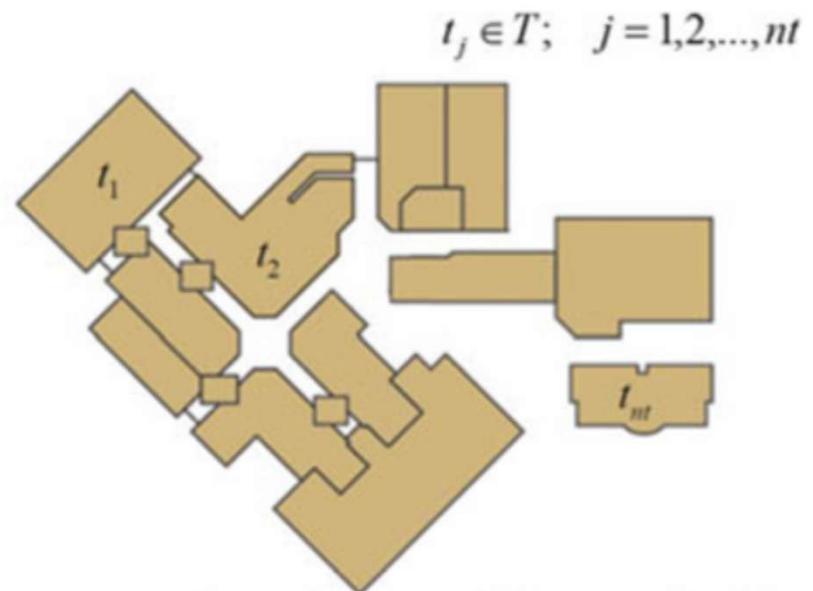


$r_i \in R; \quad i = 1, 2, \dots, n$

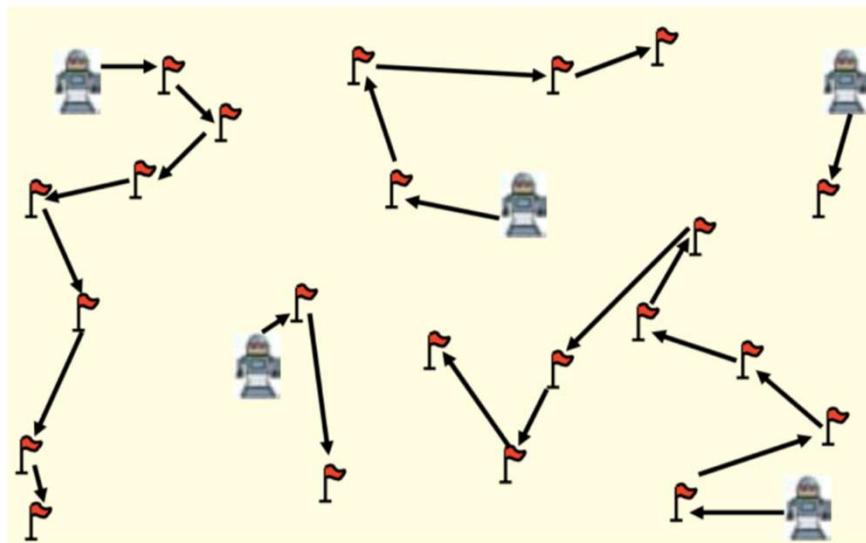
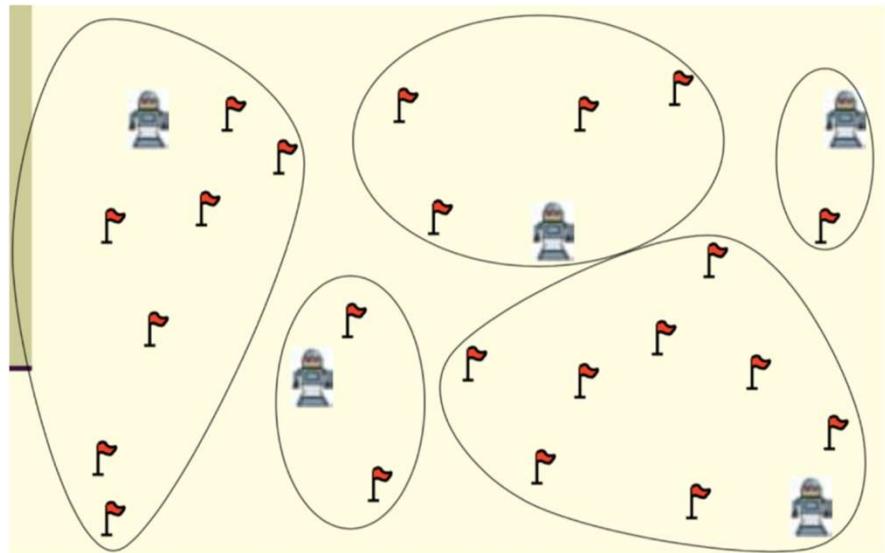
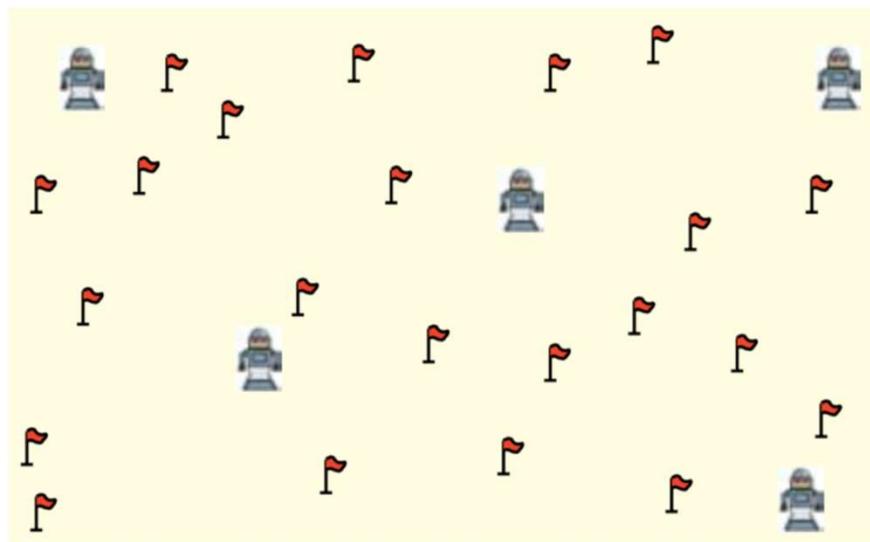


A set of n mobile Robots: R

||| $A: T \rightarrow R$

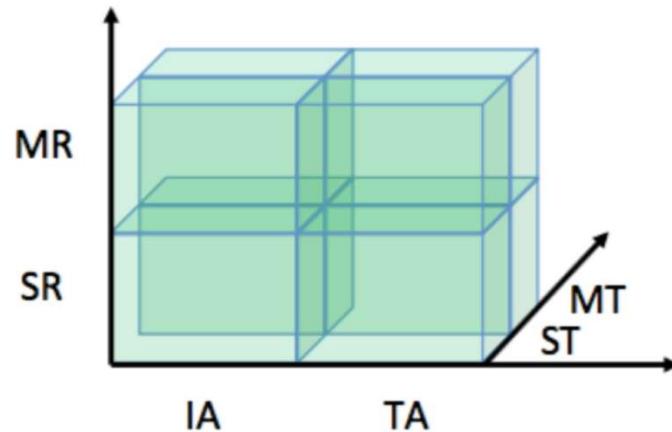


A set of nt surveillance tasks: T



Task Type

Single robot (SR) versus multi robot (MR) tasks



Robot Type

Single-task (ST) versus multi –task (MT) robots

Allocation Type

Instantaneous assignment (IA) versus time-extended assignment (TA)

IA: các robot chỉ quan tâm đến nhiệm vụ đang thực hiện, không cần hoặc không thể lập kế hoạch cho phân nhiệm trong tương lai

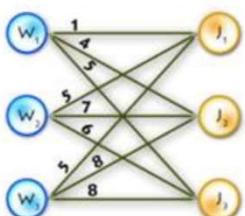
TA: các robot có thể mở rộng lịch trình, không bị ràng buộc về số lượng nhiệm vụ có thể đảm nhận, có thể nhận nhiệm vụ phát sinh trong tương lai.

Thuật toán Hungarian

Thuật toán Hungarian

	Job				
	1	2	...	n	
Agent	1	d_{11}	d_{12}	\dots	d_{1n}
	2	d_{21}	d_{22}	\dots	d_{2n}
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	n	d_{n1}	d_{n2}	\dots	d_{nn}

$$\begin{pmatrix} 1 & 4 & 5 \\ 5 & 7 & 6 \\ 5 & 8 & 8 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{array}{c} \text{Agent} \\ \hline \text{Job} \end{array}$$



$$\begin{aligned} \min \quad z &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} &= 1 \quad j = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &= 1 \quad i = 1, \dots, n \\ x_{ij} &\in \{0, 1\} \end{aligned}$$

- ✓ R=T: bài toán TA trở thành phân nhiệm tuyến tính
- ✓ Độ phức tạp tính toán $O(T^3)$.

Thuật toán Hungary

- Các bước của thuật toán

- ✓ **Bước 0: Khởi tạo ma trận chi phí.** Lối vào là ma trận A ($n \times n$) với các phần tử a_{ij} không âm biểu diễn chi phí Agent i thực hiện task j .
- ✓ **Bước 1: trừ giá trị nhỏ nhất của hàng.** Đối với mỗi hàng, tìm phần tử nhỏ nhất và trừ nó cho mỗi phần tử trong hàng đó.
- ✓ **Bước 2: trừ giá trị nhỏ nhất của cột.** Đối với mỗi cột, tìm phần tử nhỏ nhất và trừ nó cho mỗi phần tử trong cột đó.
- ✓ **Bước 3: phủ tất cả các số 0 với số đường thẳng tối thiểu.** Phủ các số 0 trong ma trận kết quả bằng số lượng tối thiểu các đường thẳng ngang và dọc. Nếu có n đường thẳng, thì phép phân công tồn tại trong số các số 0. Thuật toán dừng lại. Nếu ít hơn n đường thẳng, thì tiếp tục bước 4.
- ✓ **Bước 4: tạo thêm giá trị 0.** Tìm phần tử nhỏ nhất (gọi nó là k) không bị gạch bởi các đường thẳng ở bước 3. Trừ k cho tất cả các phần tử chưa bị gạch và cộng k cho tất cả các phần tử bị gạch 2 lần. Quay lại bước 3.

Thuật toán Hungary - Ví dụ

Bước 0: Bảng chi phí phân công robot – công việc

	T1	T2	T3	T4
R1	82	83	69	92
R2	77	37	49	92
R3	11	69	5	86
R4	8	9	98	23

Bước 1: trừ giá trị nhỏ nhất của hàng

	T1	T2	T3	T4
R1	13	14	0	23
R2	40	0	12	55
R3	6	64	0	81
R4	0	1	90	15

Bước 2: trừ giá trị nhỏ nhất của cột

	T1	T2	T3	T4
R1	13	14	0	8
R2	40	0	12	40
R3	6	64	0	66
R4	0	1	90	0

-0 -0 -0 -15

Bước 3: Phủ tất cả 0 bằng số đường tối thiểu

	T1	T2	T3	T4
R1	13	14	0	8
R2	40	0	12	40
R3	6	64	0	66
R4	0	1	90	0

Xuất hiện 3 lines

Bước 3: Phủ tất cả 0 với số đường tối thiểu

	T1	T2	T3	T4
R1	7	8	0	2
R2	40	0	18	40
R3	0	58	0	60
R4	0	1	96	0

Xuất hiện 4 lines

Bước 4: Tạo thêm giá trị 0

	T1	T2	T3	T4
R1	13	14	0	8
R2	40	0	12	40
R3	6	64	0	66
R4	0	1	90	0

-6: các phần tử không bị phủ

+6: các phần tử phủ đôi

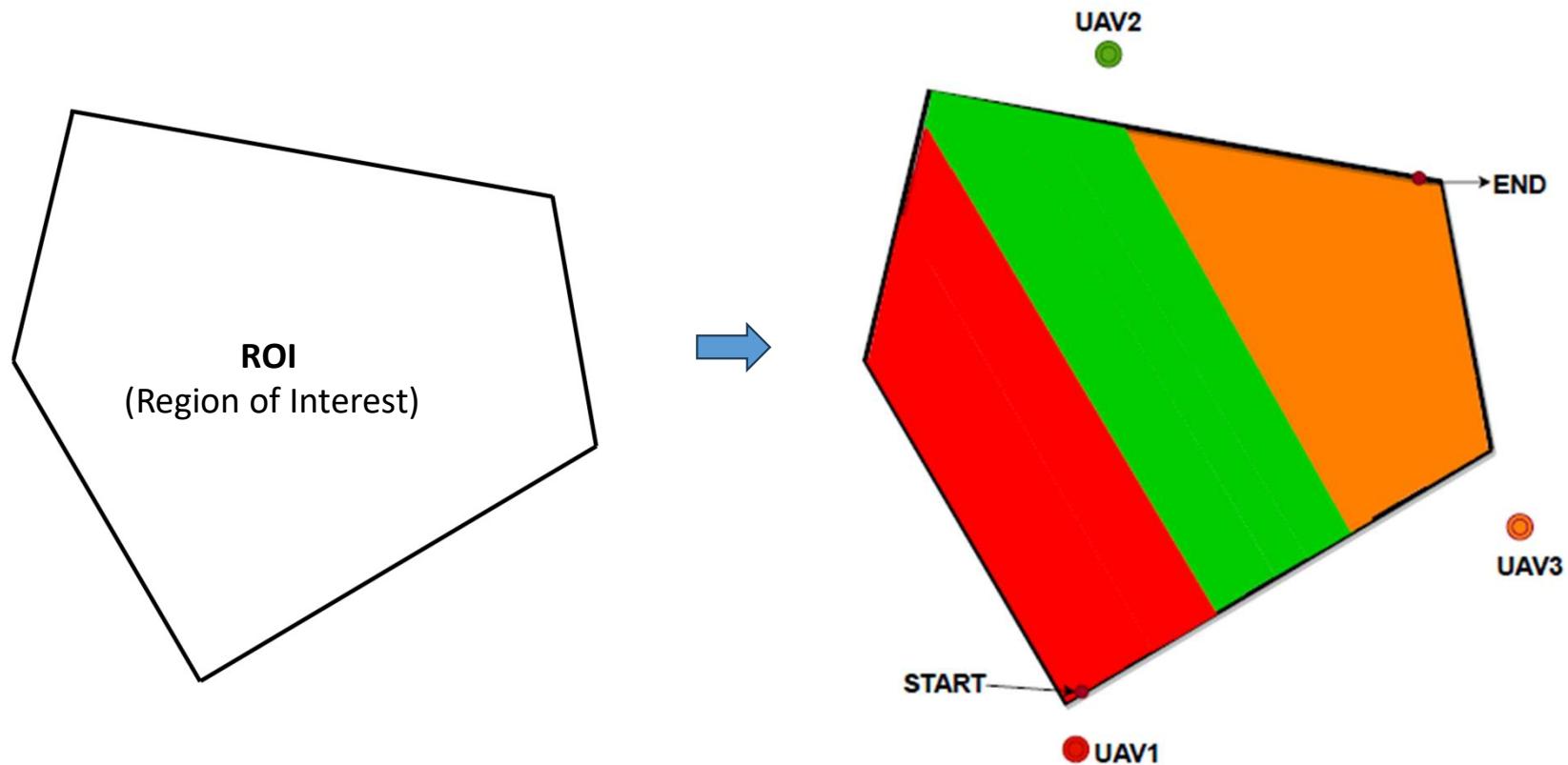
Stop: tồn tại phân công tối ưu
(số line tối thiểu = n)

	T1	T2	T3	T4
R1	7	8	0	2
R2	40	0	18	40
R3	0	58	0	60
R4	0	1	96	0

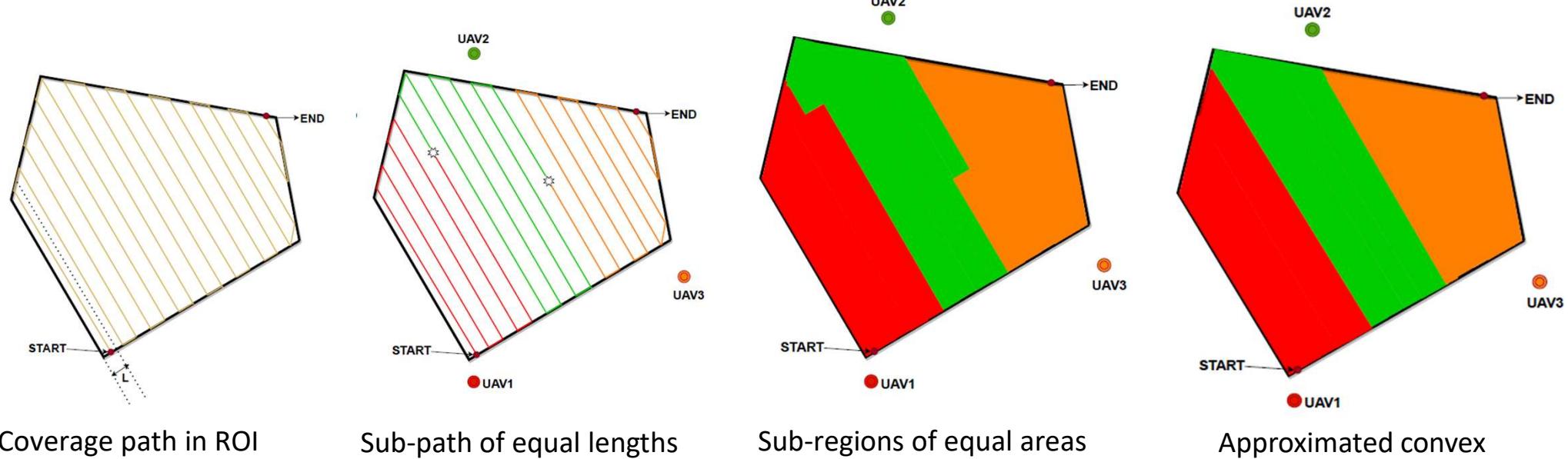
Tổng chi phí: $69+37+11+23=80$

Ví dụ từ website: <https://www.hungarianalgorithm.com/>

Bài toán phân vùng cân bằng



Bài toán phân vùng cân bằng

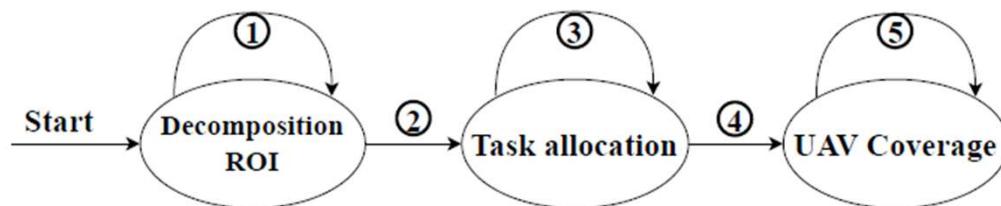


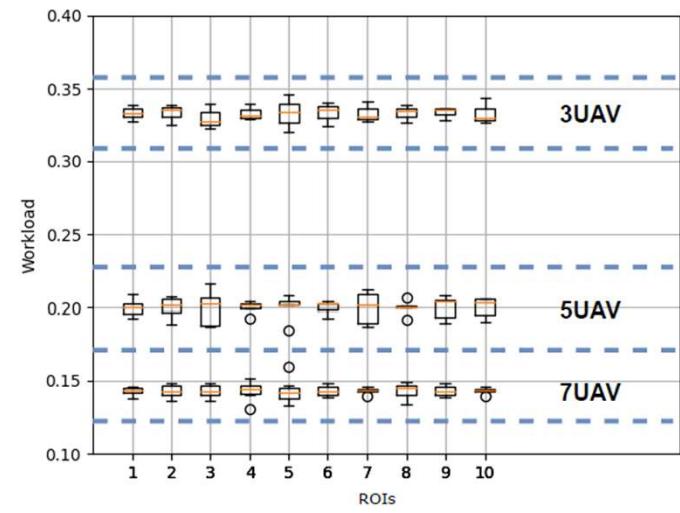
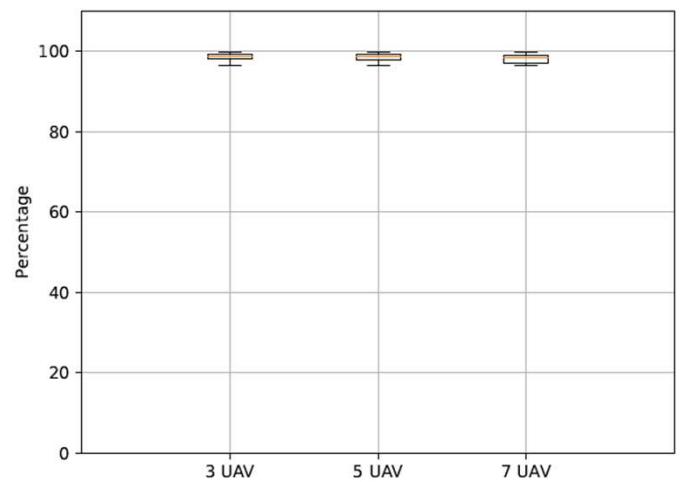
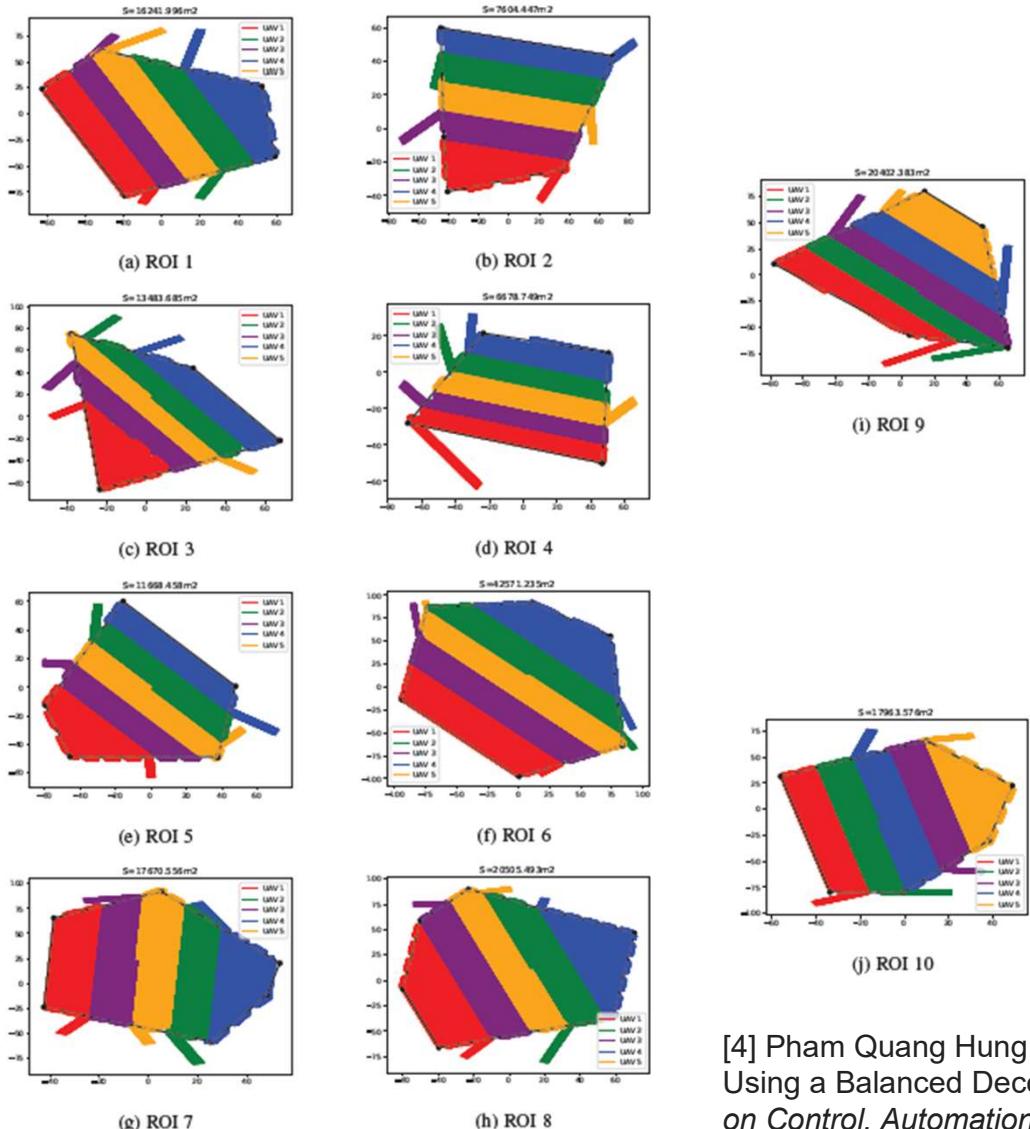
Coverage path in ROI

Sub-path of equal lengths

Sub-regions of equal areas

Approximated convex

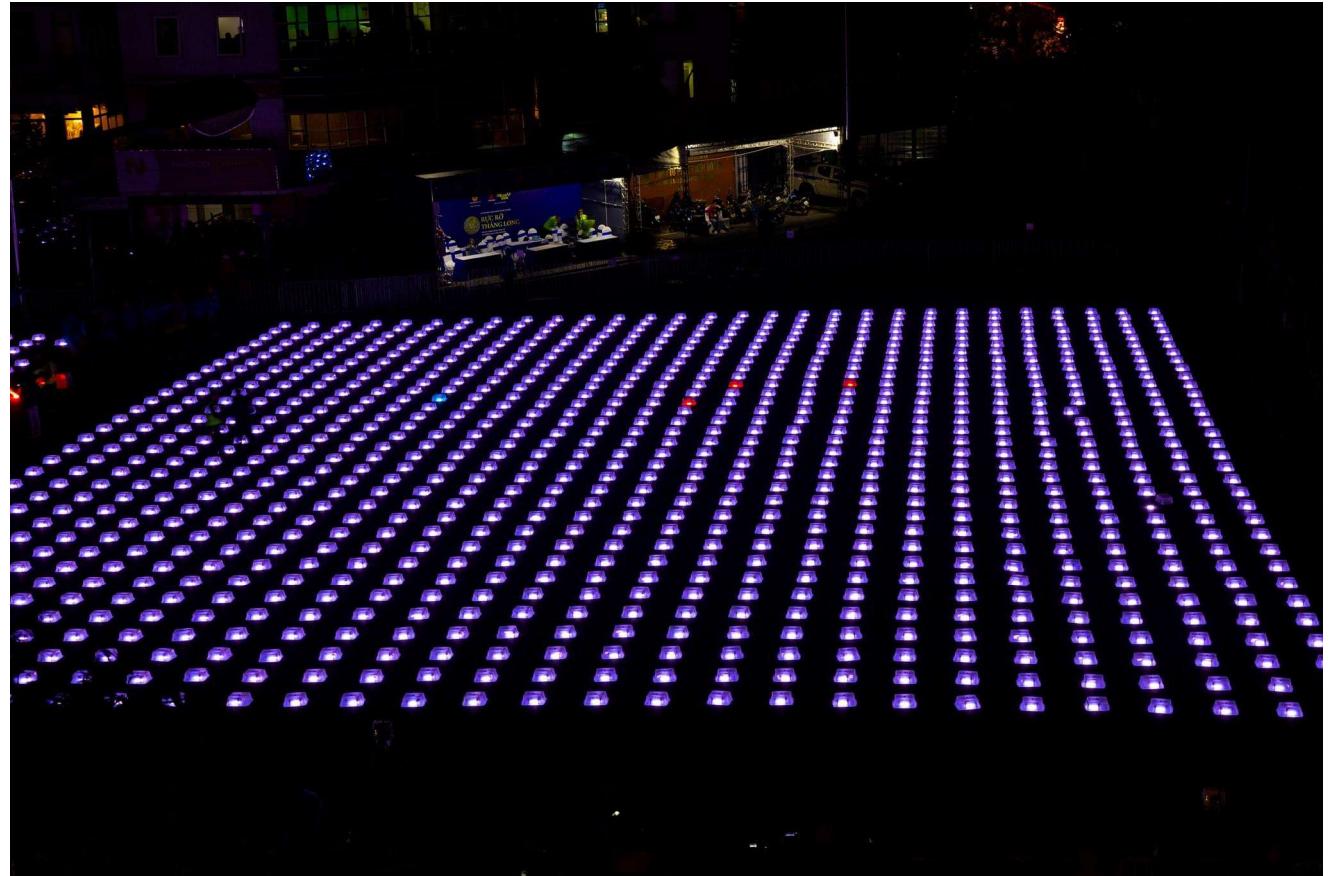




[4] Pham Quang Hung, and Pham Duy Hung. "Multi-UAV Coverage Strategy Using a Balanced Decomposition Approach." 2023 12th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). IEEE, 2023.

Phân nhiệm trong hệ thống Drone-LSS

Drones and Tasks ?
Cost function ?



Phân nhiệm các Drone trong Hệ thống trình diễn ánh sáng (Light Show System)

[3] Nar, Dharna, and Radhika Kotecha. "Optimal waypoint assignment for designing drone light show formations." *Results in Control and Optimization* 9 (2022): 100174.

Thuật toán Hungarian

- Các giả định khi sử dụng thuật toán phân công (phương pháp Hungarian)
 - ✓ Chi phí được biết ở đơn vị tính toán tập trung
 - ✓ Chi phí là xác định (không nhiễu)
 - ✓ Chi phí không thay đổi (hằng số)
 - ✓ Phân công 1-1 (1 robot cho 1 nhiệm vụ và 1 nhiệm vụ cho 1 robot)
 - Sự phức tạp
 - ✓ Sự không chắc chắn đối với giá trị thực sự của cost $U(i,j)$
 - ✓ Môi trường động (thay đổi về chi phí và agents)
 - ✓ Sự phụ thuộc của Robot/nhiệm vụ (tính không đồng nhất/dư thừa robot)
 - Hệ quả
 - ✓ Dưới mức tối ưu (sub-optimality)
 - ✓ Bài toán có thể trở thành NP-hard (cho bài toán kết hợp tổ hợp)
 - ✓ Thực tế không khả thi (lời giải tập trung có thể không thực hiện được)
- } Tất cả những vấn đề này rất phổ biến trong robotics

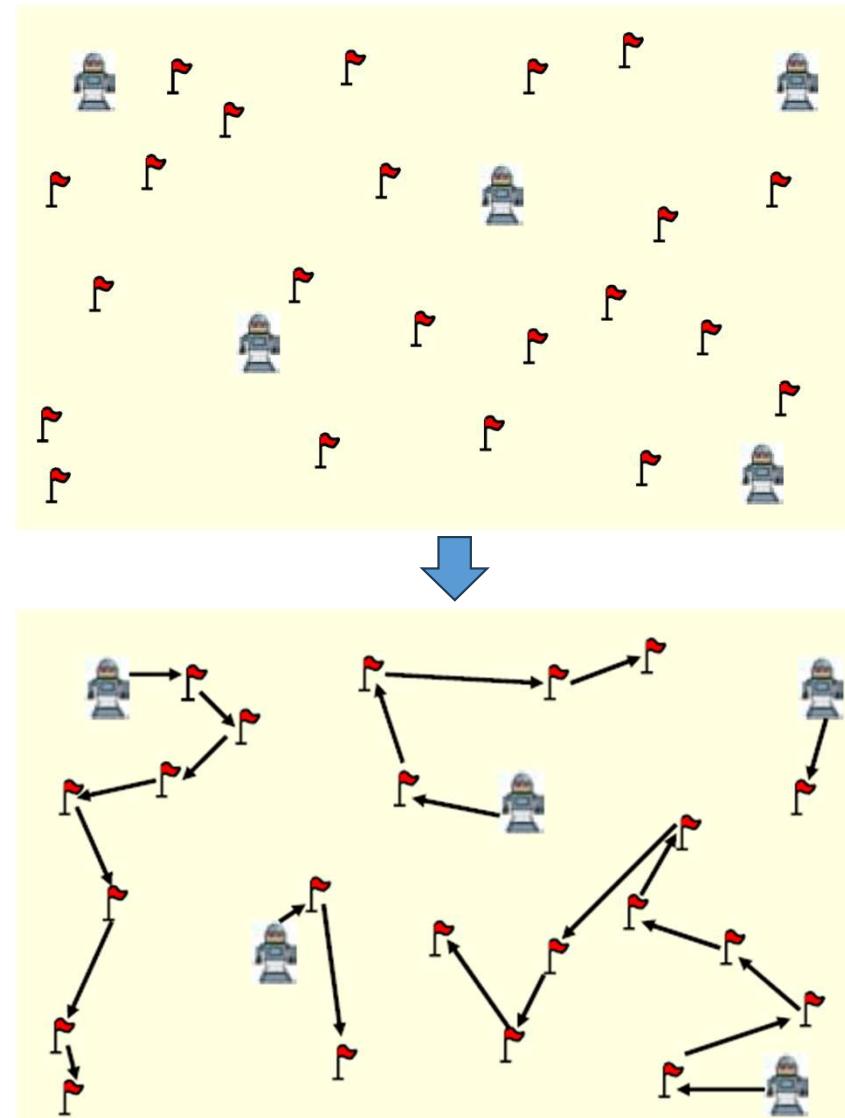
Thuật toán Hungary

- Thuật toán Hungary phiên bản phân tán cho phân nhiệm đa robot
- [3] Chopra, Smriti, et al. "A distributed version of the hungarian method for multi-robot assignment." *IEEE Transactions on Robotics* 33.4 (2017): 932-947. (Georgia Institute of Technology, USA)

Phương pháp phân nhiệm dựa trên thị trường

Ý tưởng

- Hoạt động theo mô hình kinh tế
- Mục tiêu: phân công robots cho targets
- Mô hình đấu giá (Auction-Based Model):
 - ✓ Trình tự đấu giá
 - ✓ Giá thầu và hàm chi phí
- 3 loại đấu giá:
 - ✓ Parallel auctions
 - ✓ Combinatorial auctions
 - ✓ Sequential auctions



Sequential Auctions

- Có nhiều vòng đấu thầu cho đến khi các robot giành được tất cả mục tiêu.
- Trong mỗi vòng, mỗi robot đặt thầu cho tất cả các đích chưa có robot nào giành được. Giá thầu tối thiểu trên tất cả các robot và đích sẽ thắng (Robot tương ứng sẽ giành được mục tiêu tương ứng).
- Mỗi robot xác định một đường đi với chi phí tối thiểu để thăm tất cả các mục tiêu nó đã giành được.

Tiêu chuẩn hiệu suất nhóm

- **Minisum**

- ✓ Mục tiêu của nhóm: tối thiểu tổng chi phí quãng đường trên tất cả robot
=> Tối ưu năng lượng/quãng đường di chuyển.
- ✓ Ứng dụng: Logistics/giao hàng, thăm dò,...

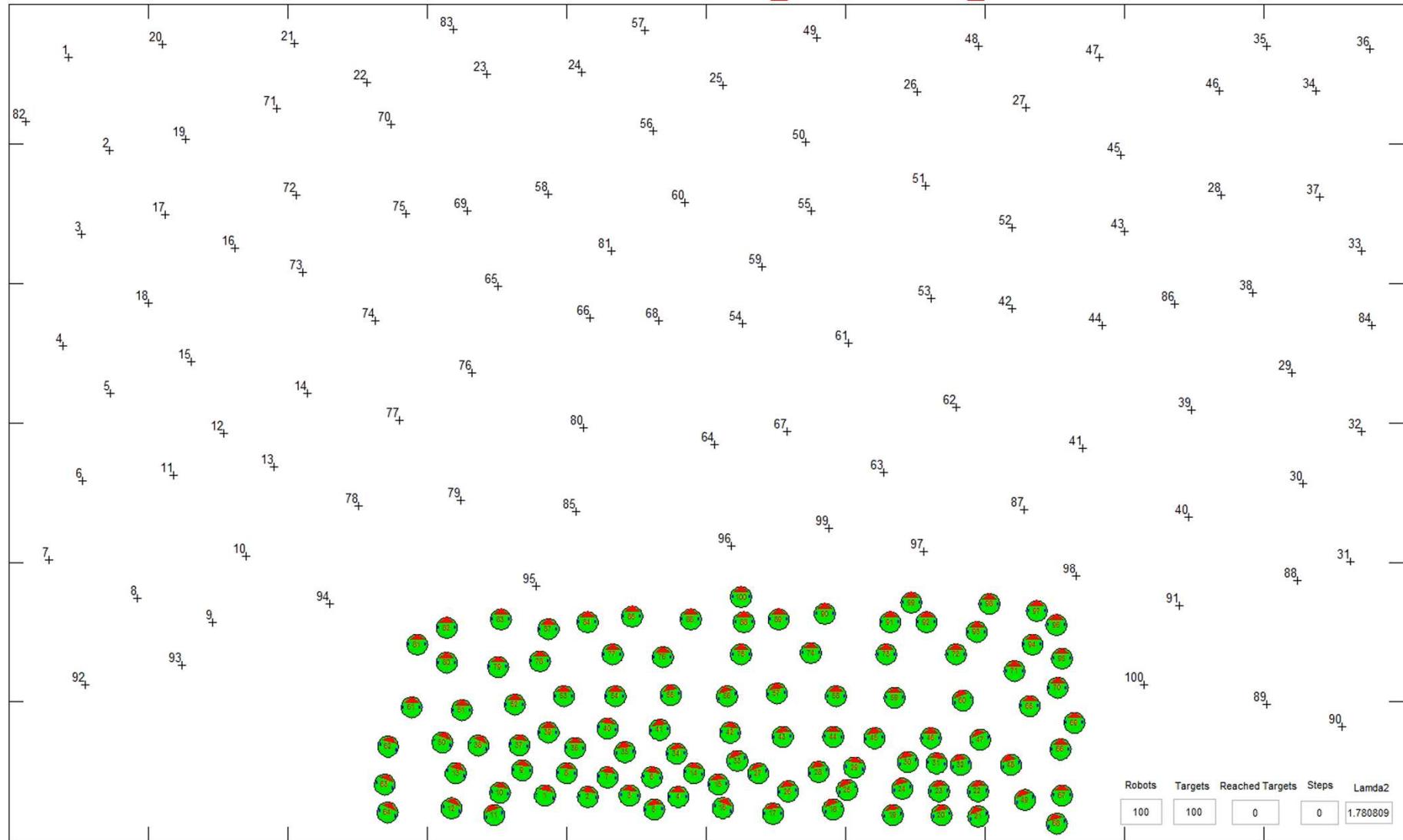
- **MiniMax**

- ✓ Mục tiêu của nhóm: tối thiểu chi phí đường đi lớn nhất trên tất cả robots.
=> Tối thiểu tổng thời gian hoàn thành.
- ✓ Ứng dụng: tuần tra, rà phá bom mìn,...

- **MiniAvg:**

- ✓ Mục tiêu: tối thiểu thời gian đến trung bình trên tất cả các mục tiêu.
=> Tối thiểu thời gian phục vụ trung bình.
- ✓ Ứng dụng: tìm kiếm, cứu hộ

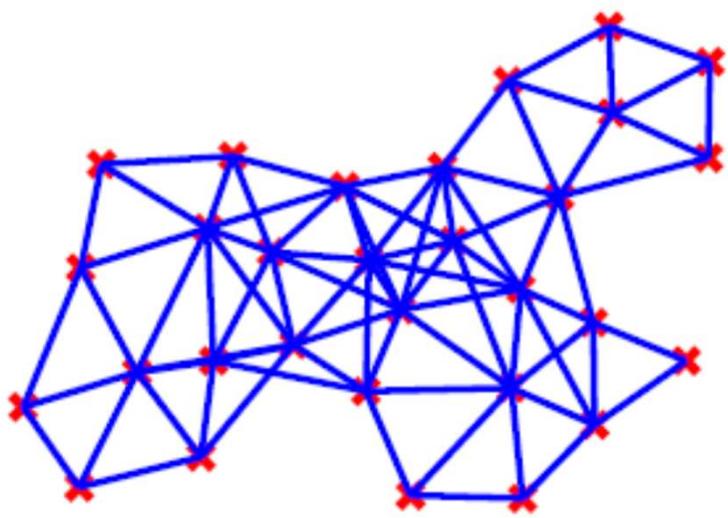
Bài toán multi-target tracking



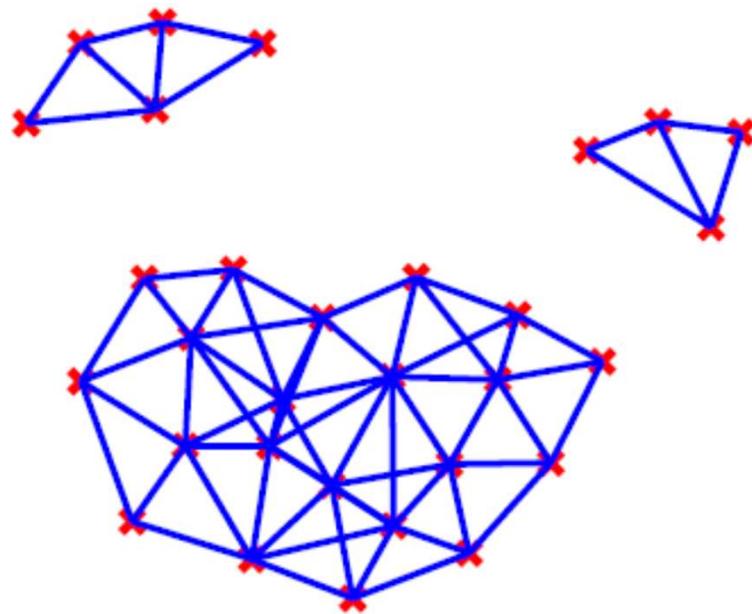
Bài toán giả định

- MRS gồm n robot di động được định danh $N=\{1, \dots, n\}$. Các robot hoạt động tự trị, có khả năng phân biệt, xác định vị trí tương đối với các robot khác và vật cản, có khả năng trao đổi thông tin với các robot trong dải truyền thông; ban đầu các robot kết nối trong cùng một mạng.
- MRS có nhiệm vụ triển khai để tìm kiếm và chiếm đóng các đích phân bố ngẫu nhiên, không biết trước trong môi trường. Mỗi đích chỉ được chiếm đóng bởi 1 robot.

[1] Hung, Pham Duy, Tran Quang Vinh, and Trung Dung Ngo. "A scalable, decentralised large-scale network of mobile robots for multi-target tracking." *Intelligent Autonomous Systems 13*. Springer, Cham, 2016. 621-637.

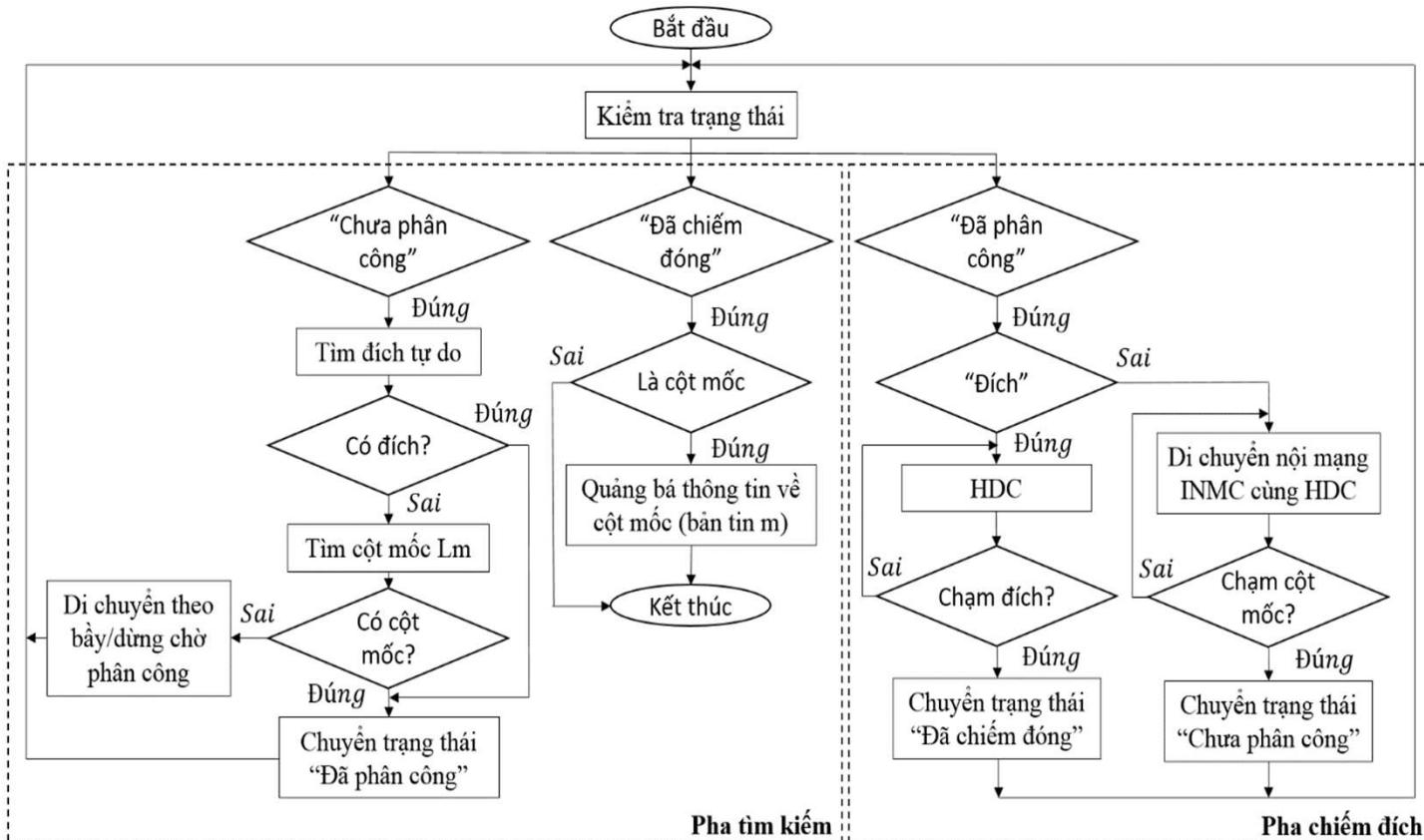
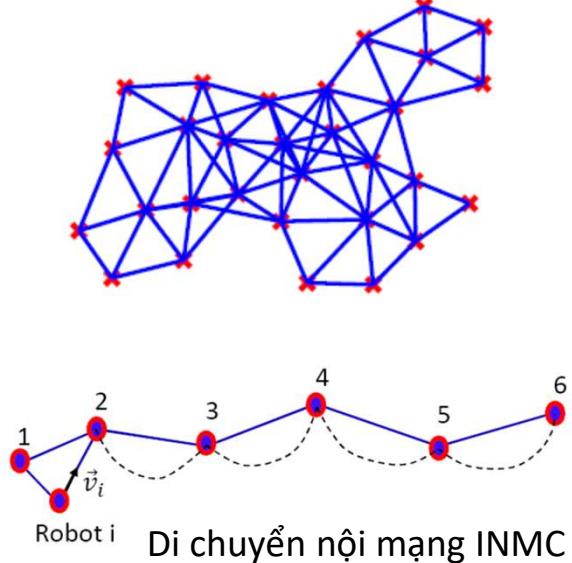


Đám mây đích liên thông



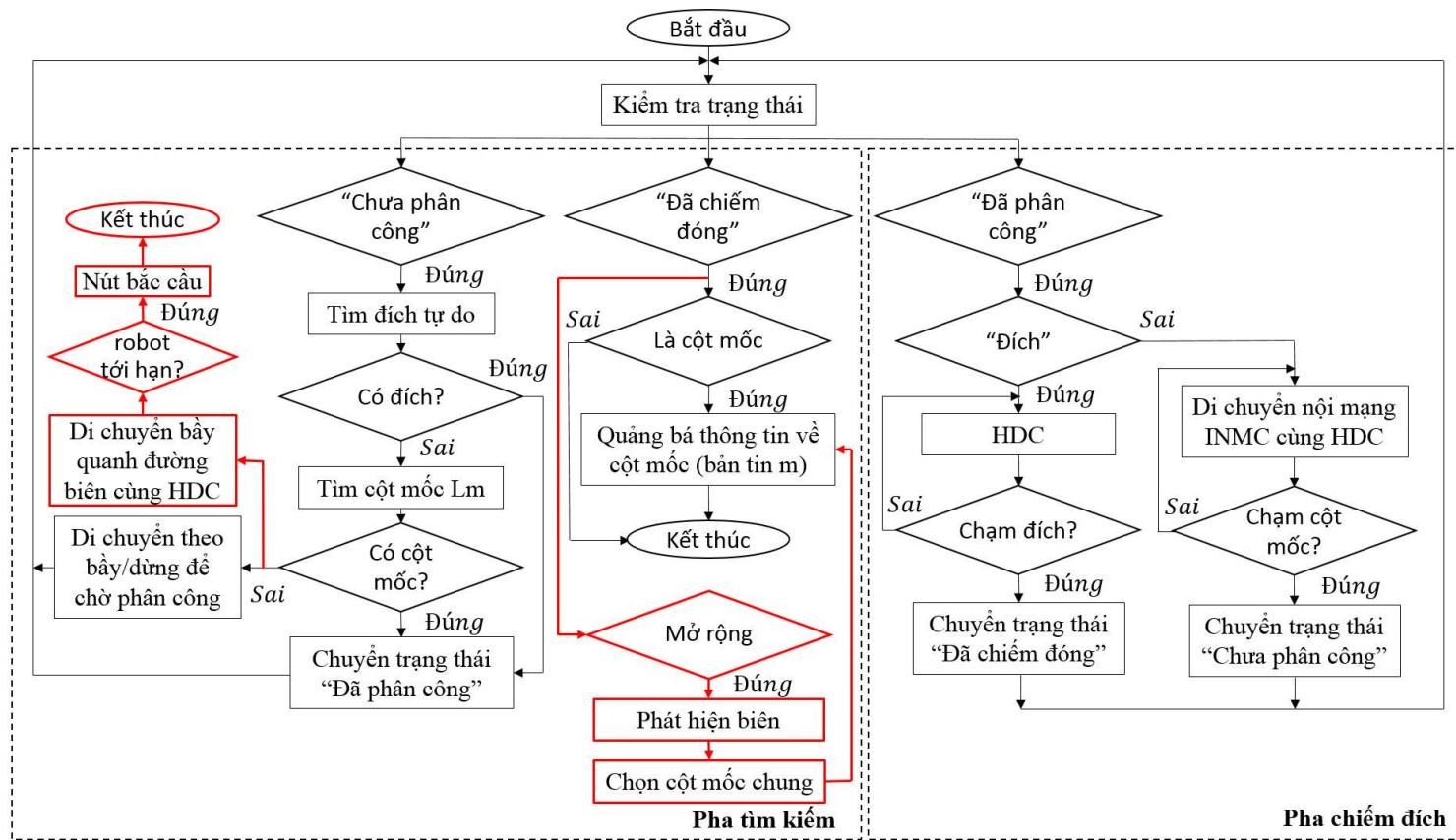
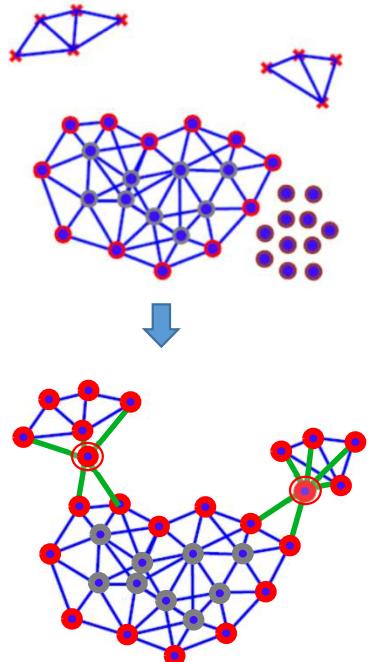
Đám mây đích không liên thông

Chiến lược MTT



Chiến lược MTT mở rộng

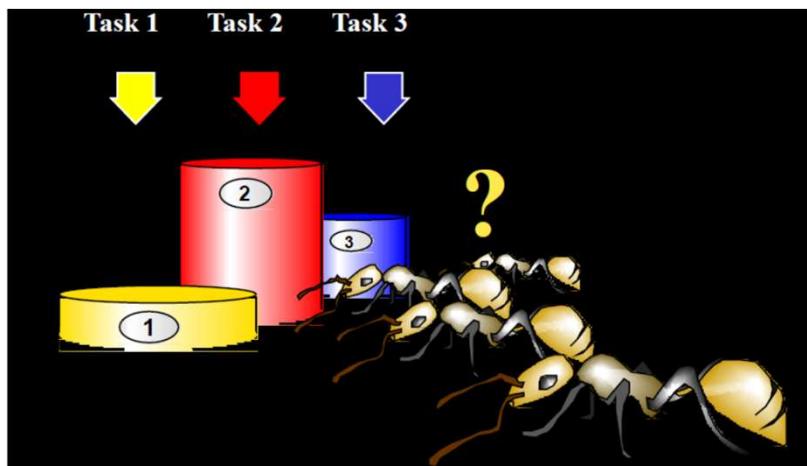
2. Chiến lược MTT mở rộng



Phương pháp phân nhiệm dựa trên ngưỡng

Phương pháp tiếp cận tự tổ chức

- Lấy cảm hứng từ phân công lao động trong xã hội côn trùng từ các quan sát của Wilson (1984).



Làm thế nào để đạt được sự phân nhiệm động (tính linh hoạt)?

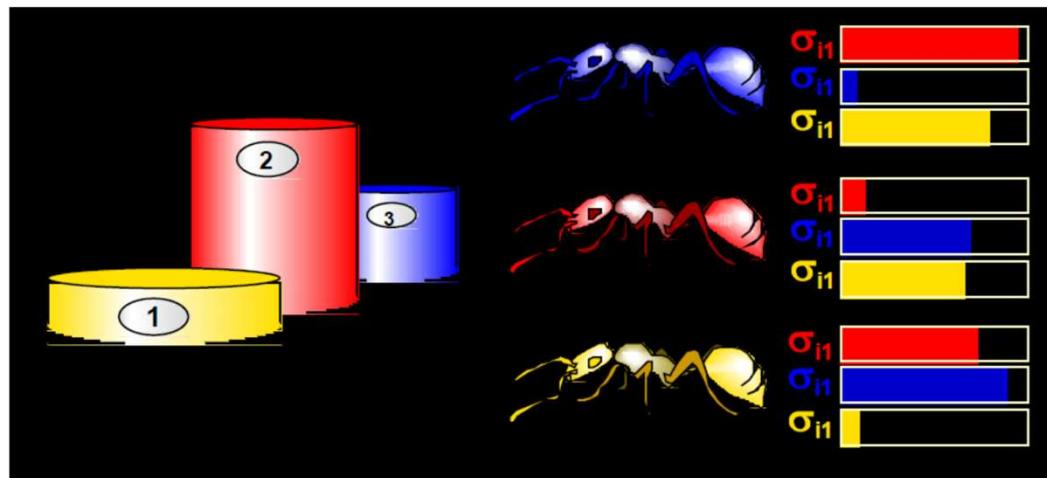
➡ Đáp ứng hành vi dựa trên ngưỡng (threshold-based) dường như là một cơ chế hợp lý về mặt sinh học để đạt được sự linh hoạt của các vai trò xã hội.

Tính linh hoạt của vai trò xã hội

- ✓ *Số lượng cá thể* thực hiện các nhiệm vụ khác nhau và bản chất *các nhiệm vụ* phải thực hiện có thể *thay đổi liên tục* trong quá trình sống của bầy đàn.
- ✓ *Tỷ lệ lao động* thực hiện các nhiệm vụ khác nhau *thay đổi theo các xáo trộn* trong nội bộ bầy *hoặc môi trường*.

Phương pháp tiếp cận tự tổ chức

- Phân nhiệm với mô hình ngưỡng cố định (fixed-threshold model)



Ngưỡng càng thấp, càng có thể là yếu tố kích thích để đạt được một phản ứng nhất định;
Ngưỡng càng thấp thì phản ứng của một cá nhân đối với một kích thích nhất định càng cao.

Mô hình ngưỡng phản ứng

- **Ngưỡng phản ứng là gì?**

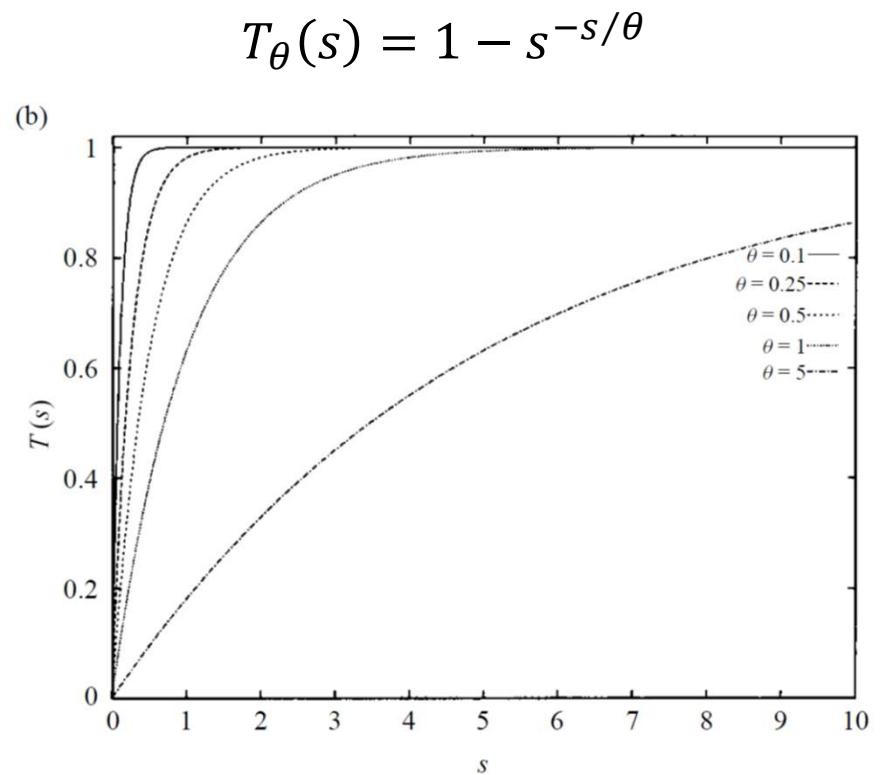
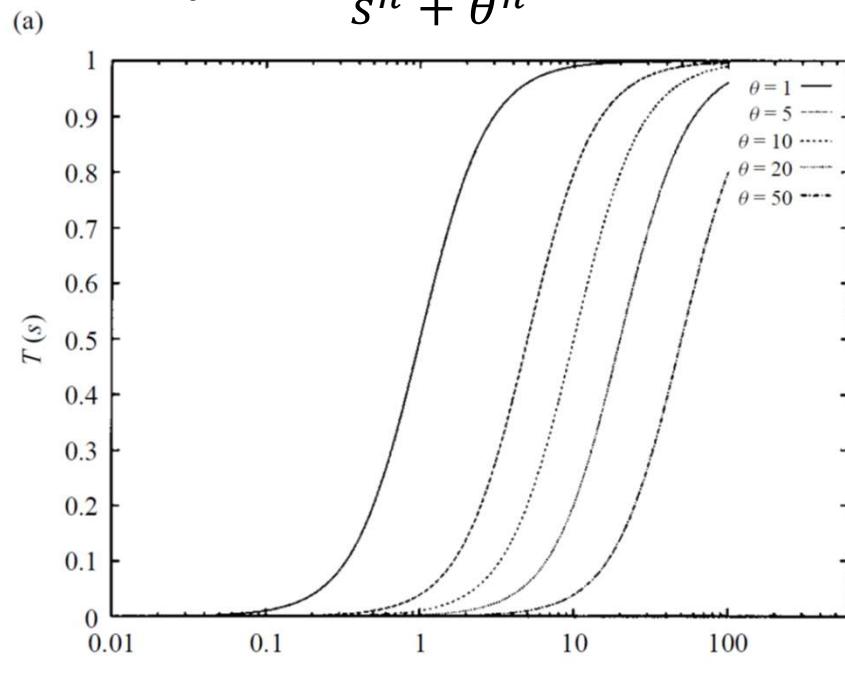
- s là cường độ kích thích liên quan đến một nhiệm vụ cụ thể: s có thể là số lần tiếp xúc hoặc nồng độ mùi,...
- Ngưỡng đáp ứng θ : xác định xu hướng 1 cá thể phản ứng với kích thích
 - Là xác suất phản hồi thấp với $s \ll \theta$
 - Là xác suất phản hồi cao với $s \gg \theta$
- Họ các **hàm phản ứng** $T_\theta(s)$ với ngưỡng θ

$$\text{Loại 1: } T_\theta(s) = \frac{s^n}{s^n + \theta^n} \quad n > 1 \text{ là độ dốc của ngưỡng.}$$

$$\text{Loại 2: } T_\theta(s) = 1 - s^{-s/\theta}$$

Hàm đáp ứng ngưỡng

$$T_\theta(s) = \frac{s^n}{s^n + \theta^n} \quad n=2$$



- ✓ $s \ll \theta$: xác suất thực hiện nhiệm vụ gần bằng 0
- ✓ $s \gg \theta$: xác suất thực hiện nhiệm vụ gần bằng 1
- ✓ $s = \theta$: xác suất bằng 1/2.

Ví dụ:

- Ví dụ 1: Kích thích là một chuỗi các lần thấy hàng hóa cần xử lý. Nếu mỗi lần thấy một hàng hóa, cá thể có một xác suất cố định xử lý hàng hóa đó là ρ , thì xác suất để cá thể đó không đáp ứng với các mặt hàng đã tiếp xúc N lần đầu tiên là $(1 - \rho)^N$. Do đó xác suất $P(N)$ để có đáp ứng với N lần gấp là: $P(N) = 1 - (1 - \rho)^N = 1 - e^{N \ln(1 - \rho)}$.

=> CÓ DẠNG PT2 với $s=N$ và $\theta = -1/\ln(1 - \rho)$