

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 1

Di chuyển theo bầy trong các hệ thống multi-agent systems

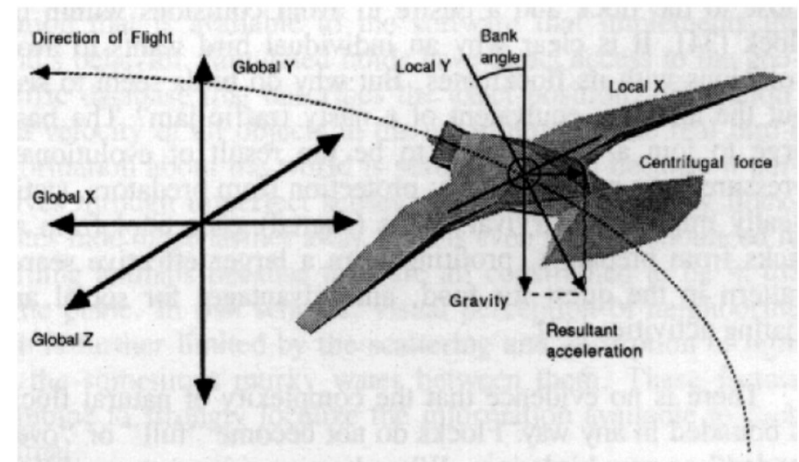
Đọc: [1] Reynolds, Craig W. "Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model." In *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 25-34. 1987.

Mô hình boids của Craig Reynolds (1987)

- **Người làm hoạt hình máy tính muốn tìm cách làm hoạt cảnh bầy chim**
 - ✓ Giống với thực tế
 - ✓ Tính toán hiệu quả, với độ phức tạp mong muốn không tệ hơn tuyến tính theo số lượng thành viên bầy
 - ✓ Mô hình 3D
 - ✓ Thông tin thêm: <https://www.red3d.com/cwr/boids/>

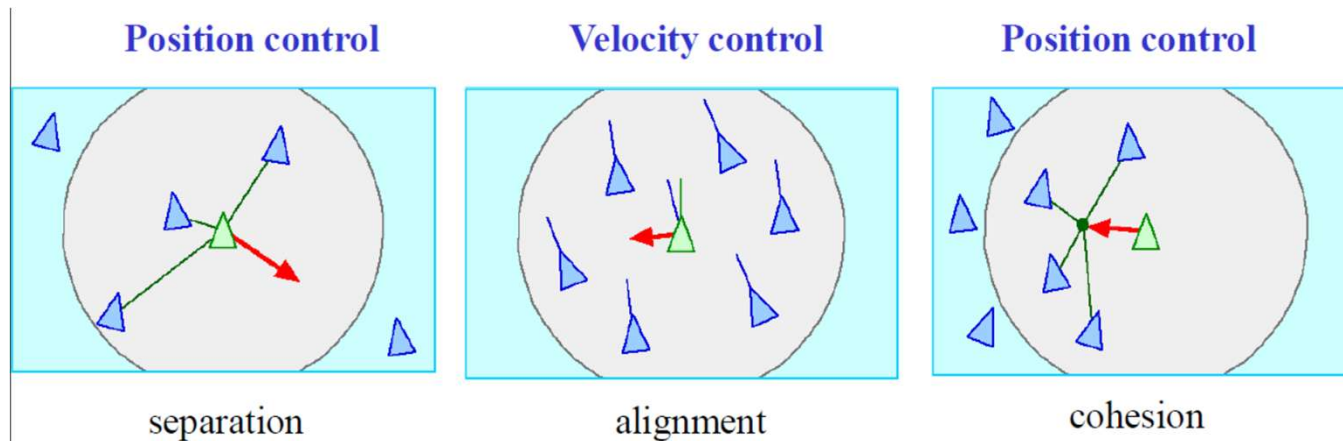
Mô hình bay của các Boid

- Mô hình 3D đơn giản
 - ✓ Có hướng
 - ✓ Có bảo toàn động lượng
 - ✓ Có tính đến trọng lực + lực nâng khí động học (lên chậm, xuống nhanh)
 - ✓ Cánh vỗ độc lập, nhằm làm cho nó thực tế hơn



Các quy tắc của Reynolds cho flocking

- **Separation:** tránh va chạm với các flockmates ở gần
- **Alignment:** cố gắng phù hợp vận tốc (tốc độ và hướng) với các flockmates ở gần.
- **Cohesion:** cố gắng gần với các flockmates ở gần.



Các quy tắc của Reynolds cho flocking

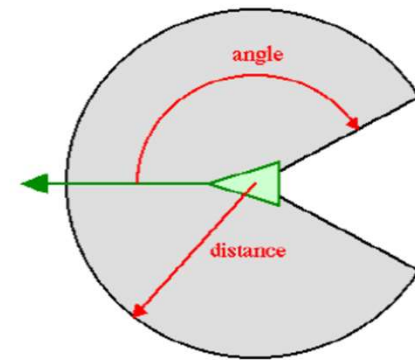
- Bộ điều khiển Boids hoạt động dựa trên các quy tắc => gọi là hành vi
- Tổng có trọng số tuyến tính không đổi theo thời gian **không hoạt động hiệu quả khi gặp chướng ngại vật**.
- Tổng có trọng số phi tuyến theo thời gian **hoạt động tốt hơn**: tạo gia tốc cực đại cho hành vi có mức ưu tiên cao nhất, phần còn lại cho các hành vi khác.
- Separation>alignment>cohesion có thể làm tách (split) nhóm khi gặp chướng ngại vật

Ví dụ tuyệt vời của nguyên tắc kết hợp giữa giải đồ chuyển động (motor schemas) của Arkin và kiến trúc gộp/phân cấp của Brooks.

Hệ thống cảm biến để phát hiện flockmates

Một hệ thống lý tưởng (nhưng phân tán và cục bộ)

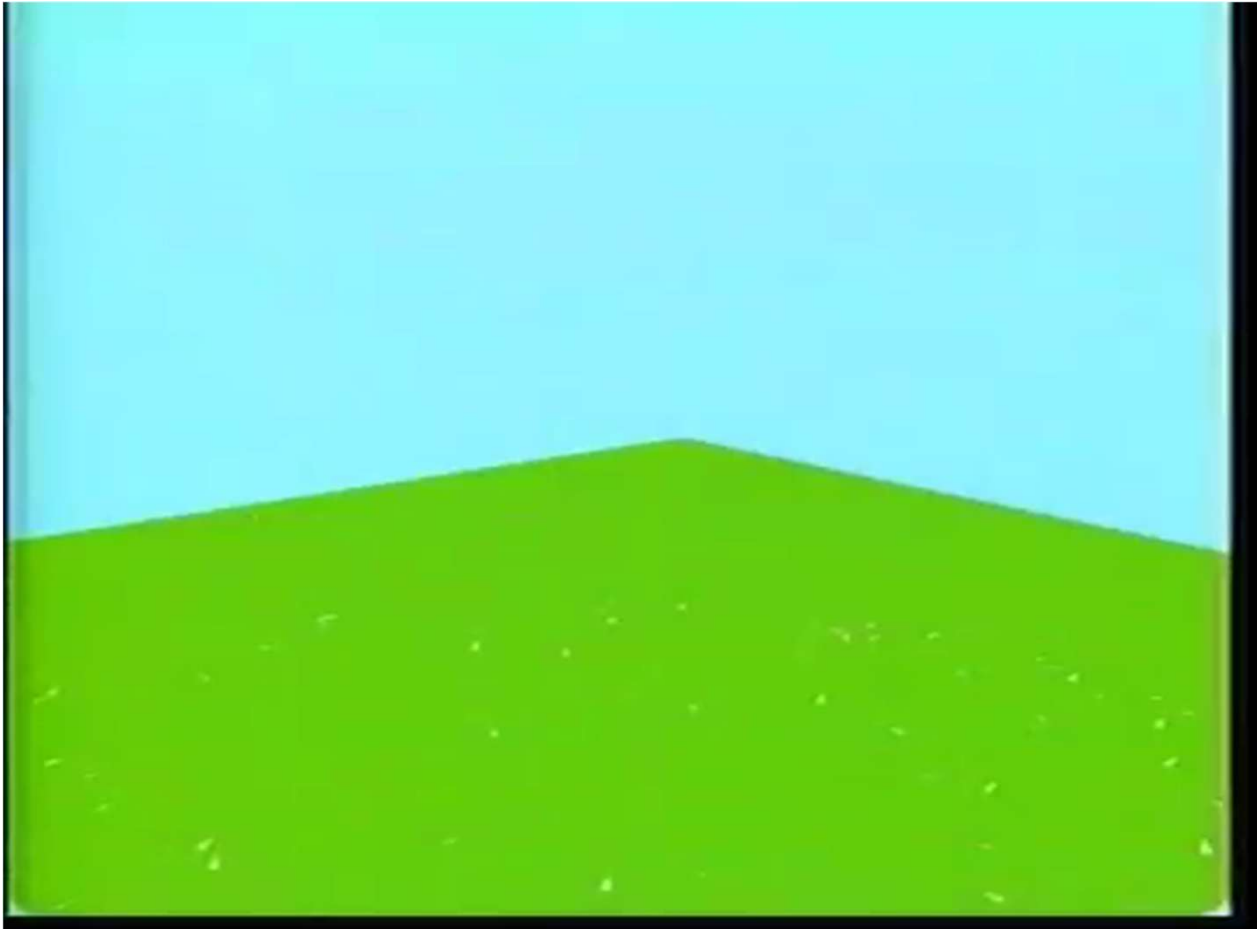
- Hệ thống cảm biến cục bộ gần như toàn phương.
- Hệ thống **đo khoảng cách (range)** và **góc (bearing)** tương đối hoàn hảo: không bị che khuất, không bị nhiễu, tất cả flockmate được **nhận diện** chính xác trong phạm vi phát hiện.
- Đáp ứng tức thời: vòng perception-to-action (không tính đến đến giới hạn cảm biến hay năng lực tính toán)
- Hệ thống đồng nhất (tất cả các boids có cấu trúc như nhau)
- Phi tuyến “Tự nhiên”: hàm mũ âm của khoảng cách. Ngoài ra đáp ứng tuyến tính cũng được thử nghiệm.



Vùng cảm nhận
trong mô hình 2D

Flocking without obstacles

- Nó có tạo ra hiện tượng bay theo bầy đàn thực tế không? Hãy tự bình xét.

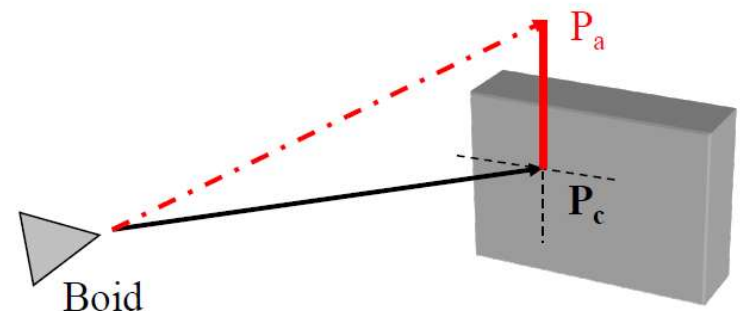


Di chuyển từ A đến B (di cư)

- Reynolds muốn điều hướng đàn chim theo các quỹ đạo cụ thể và lập trình các chuyển động có kịch bản.
- Thêm yêu cầu tăng tốc tới một điểm hoặc theo một hướng nhất định.
- Bằng cách di chuyển điểm mục tiêu, có thể điều khiển đàn di chuyển quanh môi trường.
- Luân phiên hướng tới vị trí các điểm waypoints dẫn đến sự đổi hướng mượt mà.

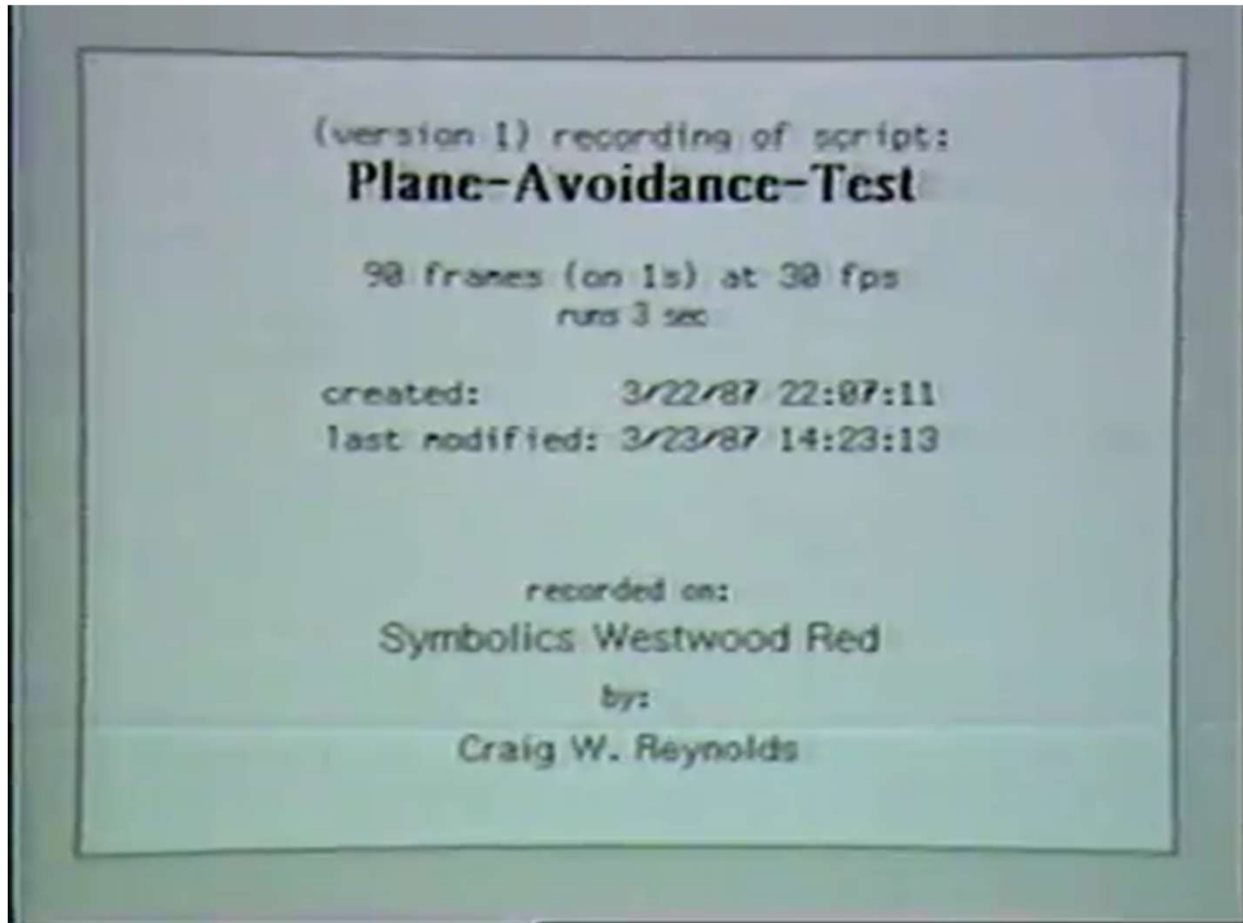
Với chương ngại vật

- Hệ thống cảm biến phát hiện chương ngại vật trong môi trường: khác với hệ thống cảm biến được sử dụng để nhận biết flockmate.
- Tiếp cận 1: trường thế
 - ✓ Trường lực đẩy xung quanh chương ngại vật
 - ✓ Sử dụng lược đồ chuyển động của Arkin
 - ✓ Kết quả kém trong boids
- Tiếp cận 2: lái để tránh
 - ✓ Chỉ xem xét các chương ngại vật ngay phía trước
 - ✓ Tìm cạnh mép gần nhất với điểm va chạm (P_c)
 - ✓ Cộng chiều dài thân của Boid ra ngoài cạnh đó (P_a)
 - ✓ Hoạt động tốt hơn và cũng tự nhiên hơn



Flocking with obstacles

- Nó có tạo ra bầy đàn thực tế không? Hãy tự bình xét



Mô hình hóa như thế nào?

- $G(V, E)$

- ✓ V : tập robots

- ✓ E : tập các cạnh kết nối

- Mô hình boids $\vec{\mathbf{v}}_i = \alpha \vec{\mathbf{v}}_i^c + \beta \vec{\mathbf{v}}_i^s + \gamma \vec{\mathbf{v}}_i^a$

$$\vec{\mathbf{v}}_i^s = - \sum_{j \in N_i^a} w_{ij} e^{-\zeta(r_{ij} - r_a)} \hat{\mathbf{r}}_{ij} \quad \vec{\mathbf{v}}_i^c = \sum_{j \in N_i^{\bar{a}}} \vec{\mathbf{r}}_{ij} \quad \vec{\mathbf{v}}_i^a = \hat{\mathbf{r}}_{id_i}$$

$$w_{ij} = \sigma + (1 - \sigma)[(1 + \cos(\varphi_i^j))/2]$$

[2] Pham Duy Hung, Tran Quang Vinh, and Trung Dung Ngo. "Hierarchical distributed control for global network integrity preservation in multirobot systems." *IEEE transactions on cybernetics* 50, no. 3 (2019): 1278-1291.

Flocking và các vấn đề đang được giải quyết

- **Heading alignment control:** tập trung vào việc duy trì cấu trúc bầy đàn ổn định dựa trên các cơ chế đồng thuận hướng.
- **Behavioral parameter control:** tập trung vào việc điều chỉnh động các tham số hành vi, cho phép bầy phản ứng hiệu quả với các điều kiện môi trường thay đổi.

Metrics for flocking behavior

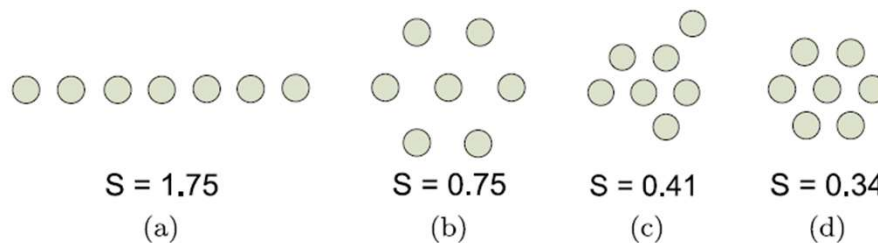
- Order: đo góc hướng trung bình của bầy robot (Vicsek 1995)

$$\psi(t) = \frac{1}{N} \left| \sum_{k=1}^N e^{i\theta_k} \right|,$$

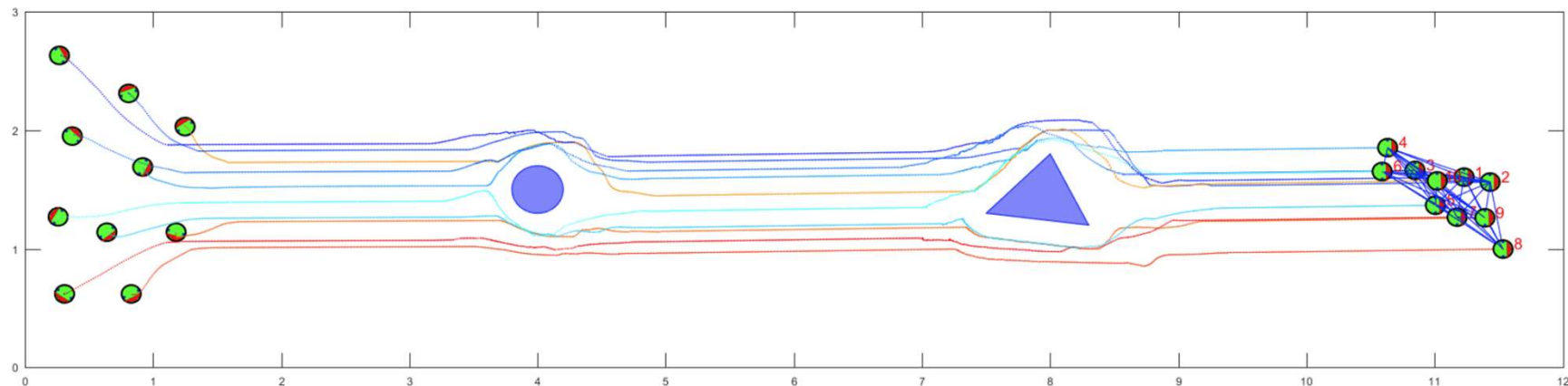
- Entropy: đo sự nhiễu loạn vị trí của bầy robot (Balch 2000)

✓ Entropy thông tin của một cụm với khoảng cách max h: $H(h) = \sum_{k=1}^M p_k \log_2(p_k),$

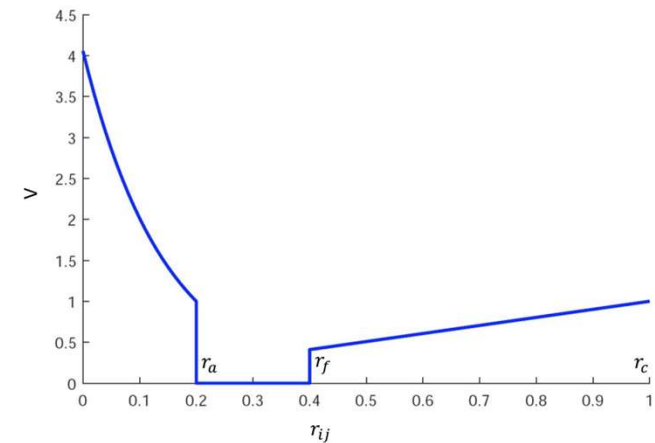
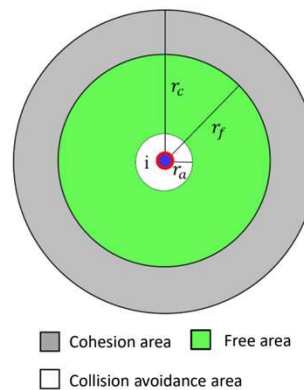
✓ Tổng entropy trong toàn dải (từ 0 đến ∞): $S = \int_0^\infty H(h) dh.$



Một số nghiên cứu của lab



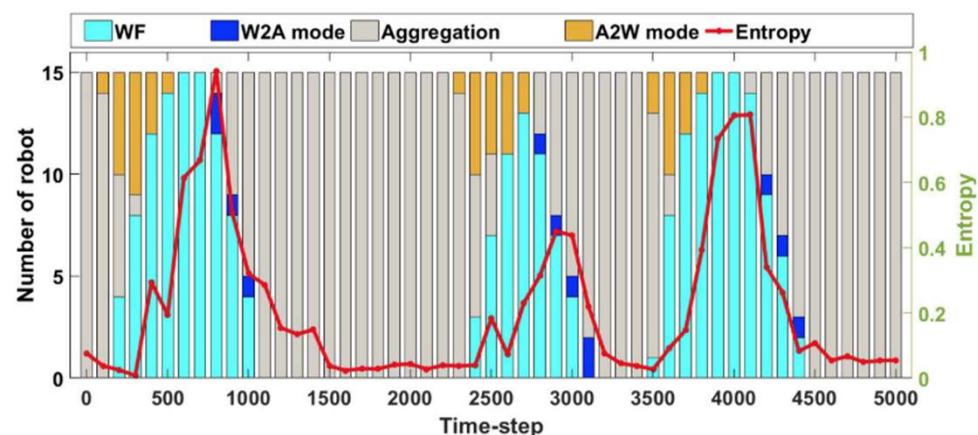
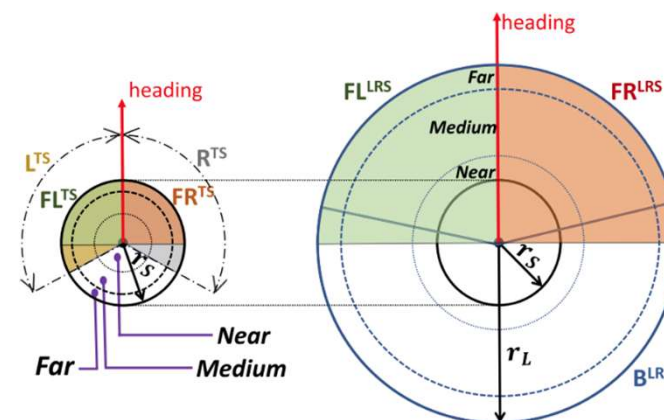
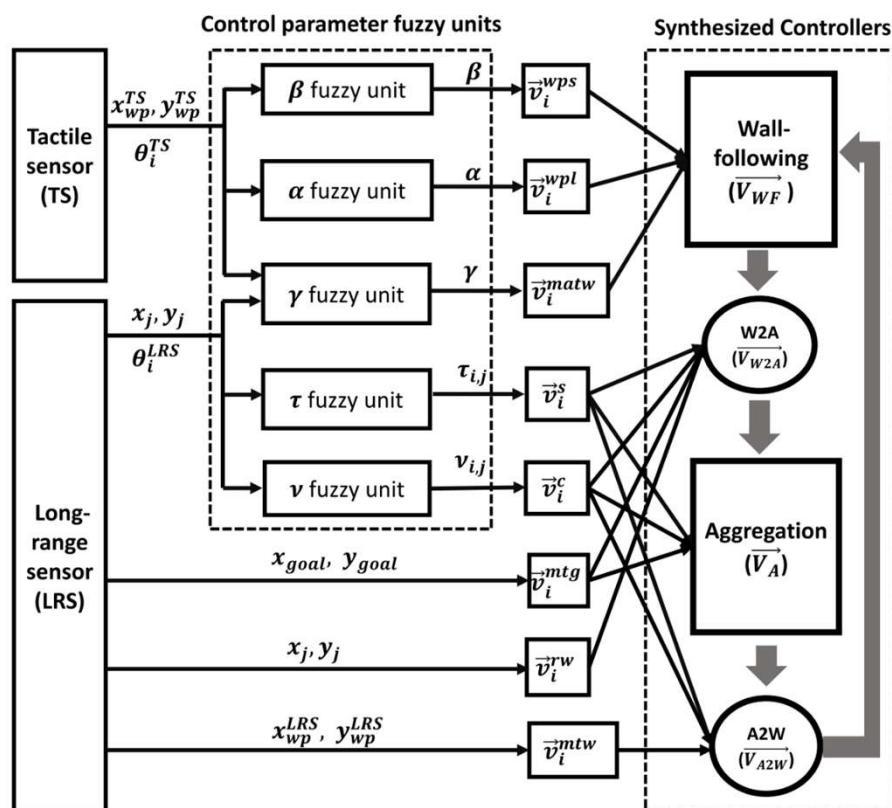
$$\vec{v}_i = \begin{cases} \alpha \vec{v}_i^c + \vec{v}_i^a & r_f \leq r_{ij} \leq r_c \\ \vec{v}_i^a & r_a < r_{ij} < r_f \\ \beta \vec{v}_i^s + \vec{v}_i^a & r_{ij} \leq r_a \end{cases}$$



Video thí nghiệm: [collective motion](#)

[L1.1] Hung, Pham Duy, and Trung Dung Ngo. "A Variant of Boids Rules: Reducing Jerky Motion through Eliminating Heading Disturbance." In *2021 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, pp. 1-5. IEEE, 2021.

Một số nghiên cứu của lab

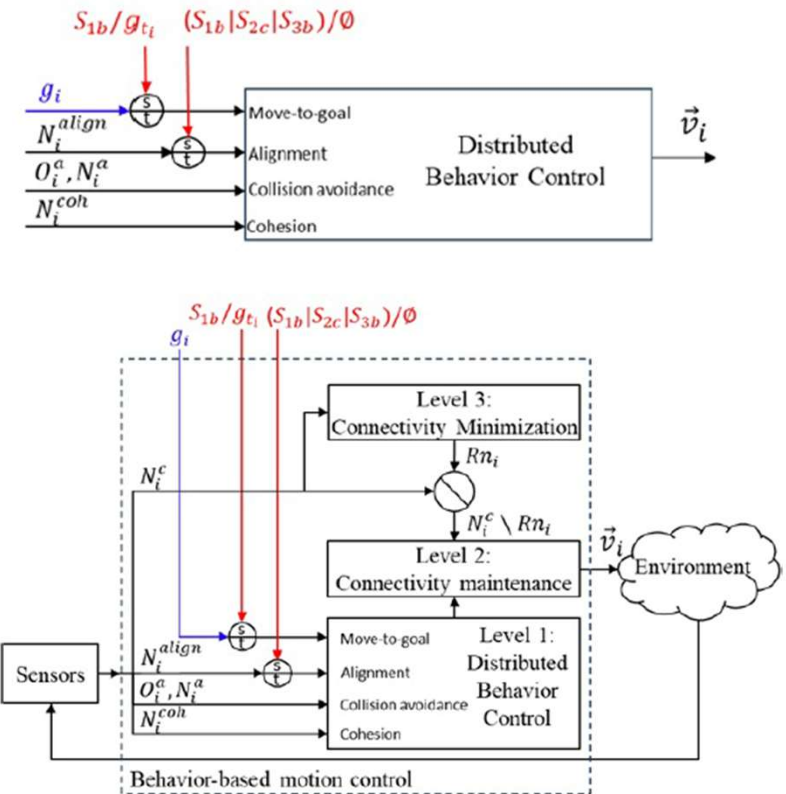
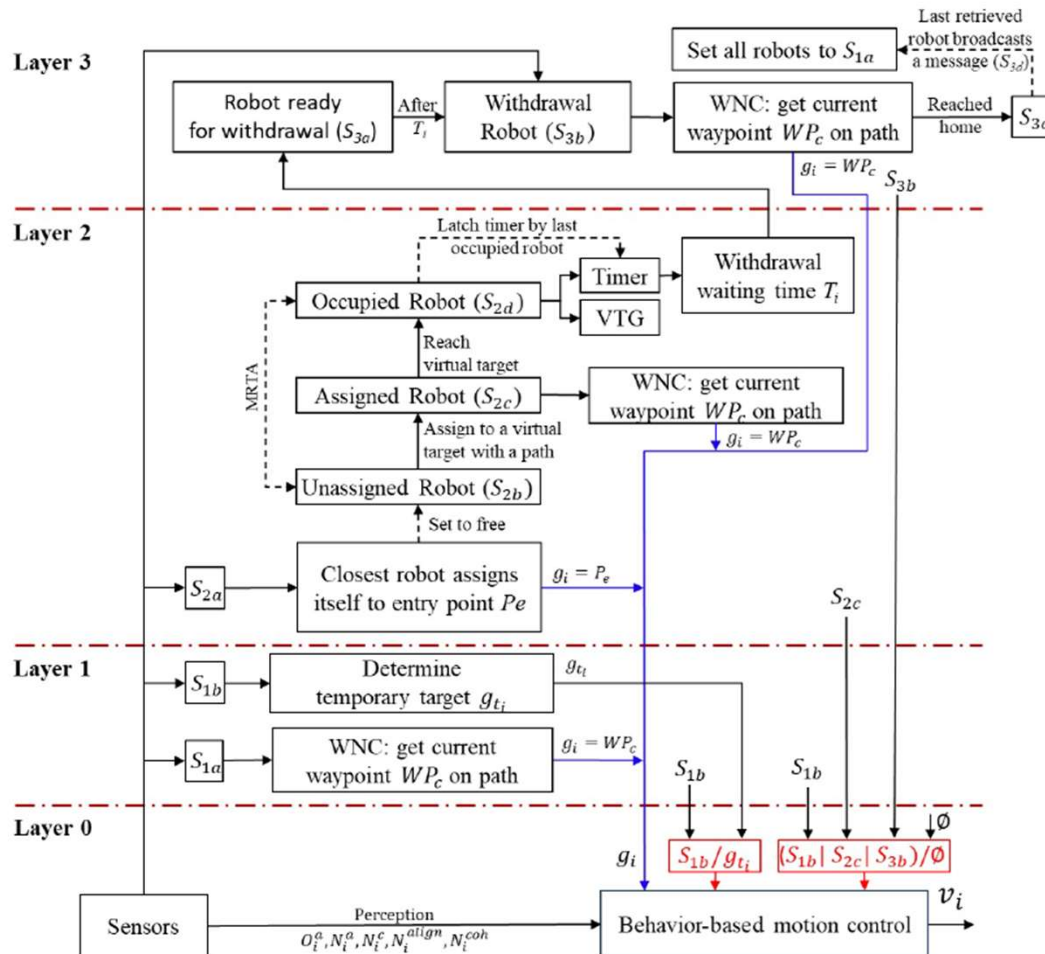


[L1.2] Nhu, Truong, Pham Duy Hung, and Trung Dung Ngo. "Fuzzy-based distributed behavioral control with wall-following strategy for swarm navigation in arbitrary-shaped environments." *IEEE Access* 9 (2021): 139176-139185.

Video thí nghiệm:

1. Mô phỏng: <https://www.youtube.com/watch?v=L75EBAfDrVM&feature=youtu.be>
2. Thực nghiệm: <https://www.youtube.com/watch?v=NLSUcJrdHdk>

Một số nghiên cứu của lab



[L1.3] Pham Duy Hung and Ngo Trung Dung, *Multi-layered distributed control for collective movement and coverage of Robot swarms in Unknown Structured Environments*, IEEE Access, 2025.

Video thí nghiệm:

- Mô phỏng: <https://www.youtube.com/watch?v=DmW-AhAmy24>
- Thực nghiệm: <https://www.youtube.com/watch?v=gumPXuuo88M>

Phần 2

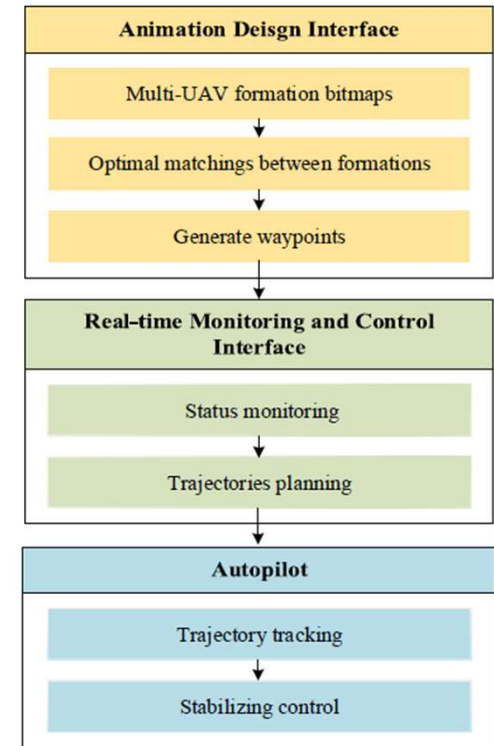
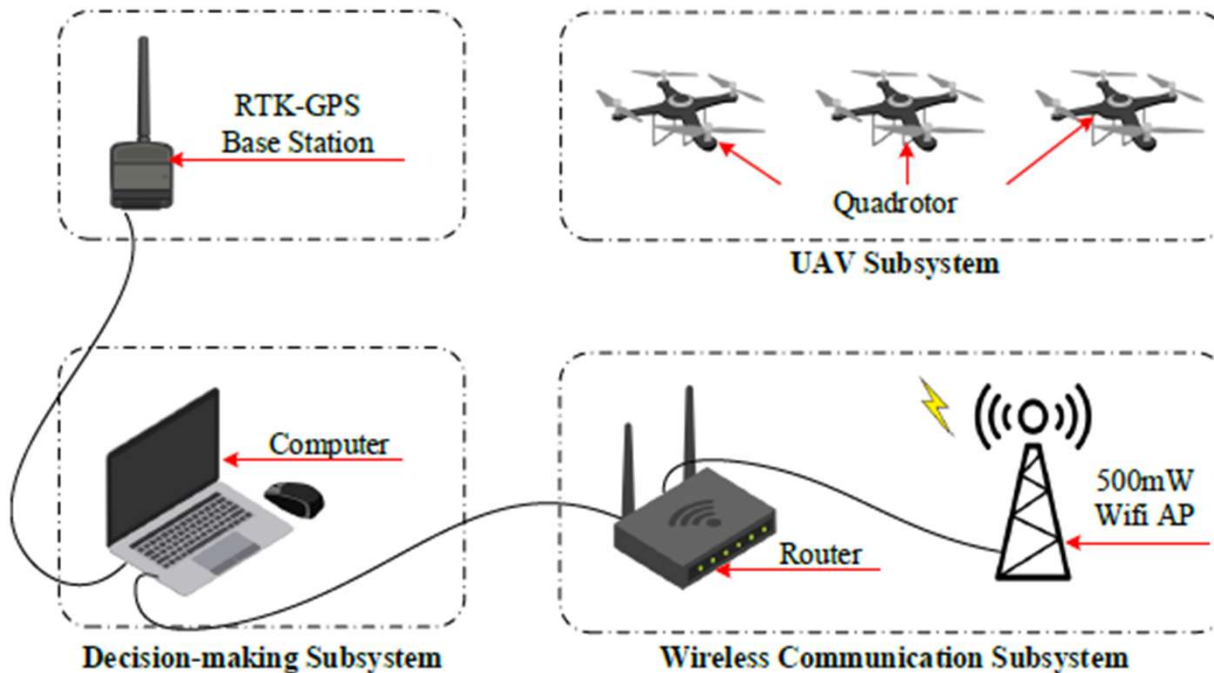
Điều khiển đội hình (Formation Control)

Formation with graph-based control

- Điều khiển đội hình (formation control): điều khiển các robot tạo thành các cấu trúc hình học cụ thể.
 - ✓ Tạo đội hình
 - ✓ Duy trì đội hình
 - ✓ Thay đổi đội hình
- Ứng dụng:
 - ✓ Trình diễn
 - ✓ Quân sự: đội hình trinh sát
 - ✓ Giám sát môi trường
 - ✓ Đội hình vận tải

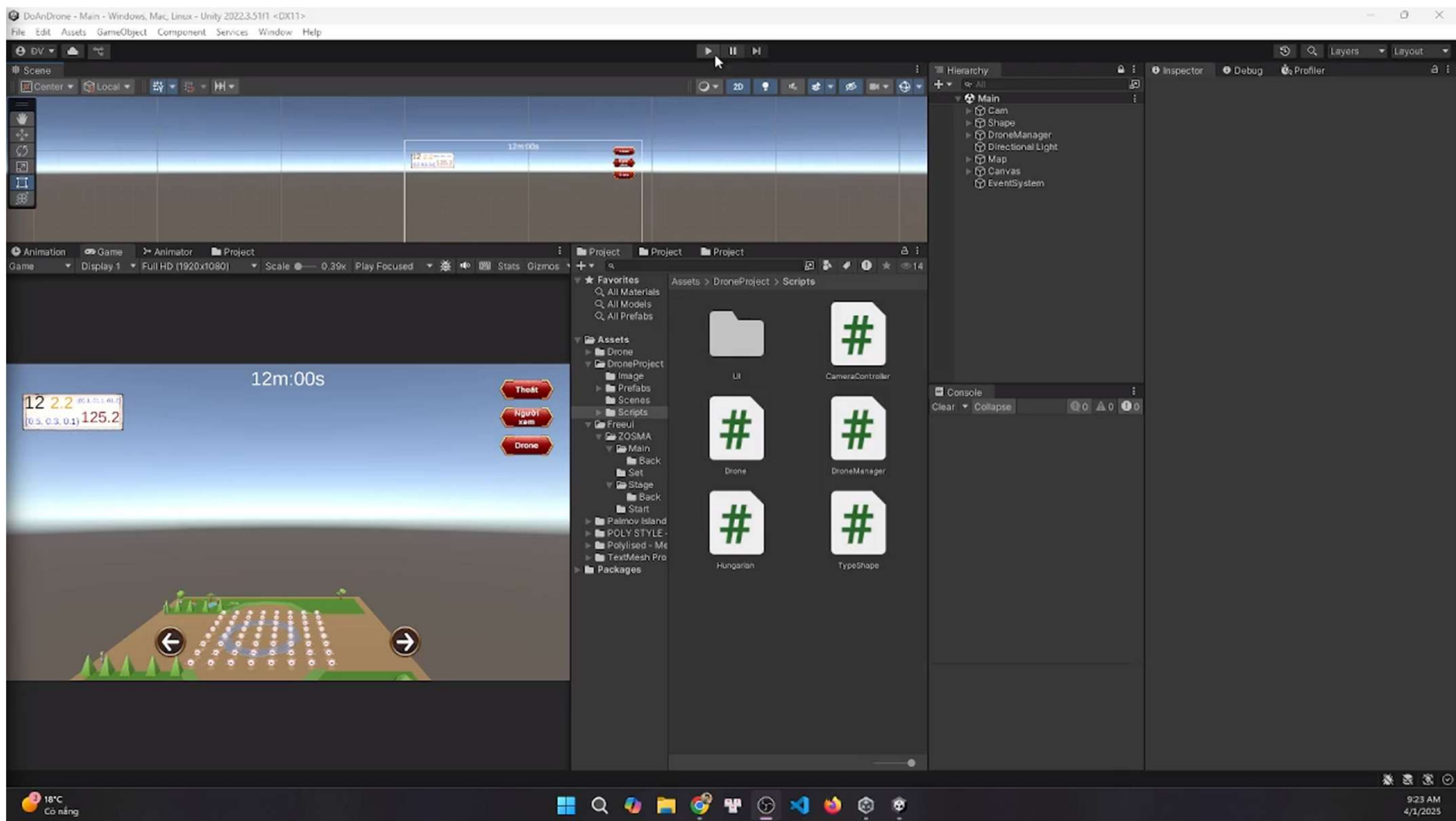


Drone Light Show Systems



Độc: [2] Huang, Jie, Guoqing Tian, Jiancheng Zhang, and Yutao Chen. "On unmanned aerial vehicles light show systems: Algorithms, software and hardware." *Applied Sciences* 11, no. 16 (2021): 7687.

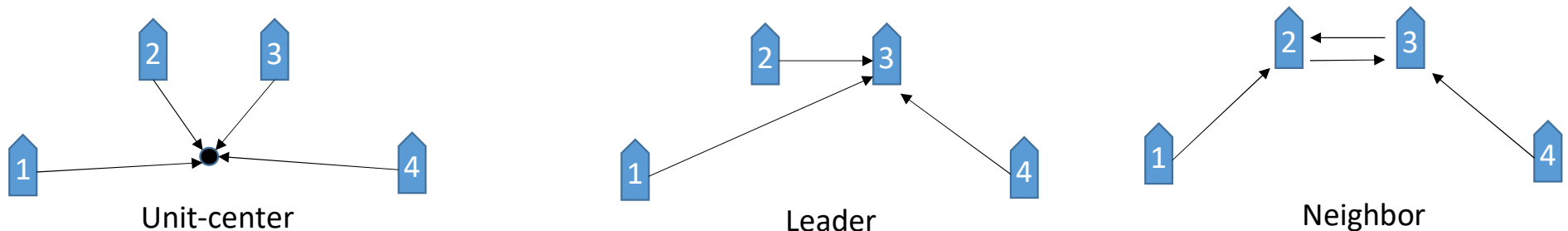
Lon	Lat	H	R	G	B	T
Longitude	Latitude	Relative height	Red (0-255)	Green (0-255)	Blue (0-255)	Maintnace time



Formation control

- Cơ chế tham chiếu:

- ✓ **Tham chiếu tâm (Unit-center referenced):** tâm được tính toán độc lập bởi mỗi robot bằng việc lấy trung bình vị trí của tất cả các robots tham gia đội hình. Các robot xác định vị trí tương đối của nó so với điểm tâm này.
- ✓ **Tham chiếu chỉ huy (Leader-referenced):** mỗi robot xác định vị trí tương đối với robot chỉ huy (leader). Robot chỉ huy không phải cố gắng duy trì đội hình mà trách nhiệm đó thuộc về các robot khác.
- ✓ **Tham chiếu hàng xóm (neighbor-referenced):** các robot cố gắng duy trì vị trí tương đối với một (hoặc một nhóm được chọn) các robot hàng xóm được xác định trước.



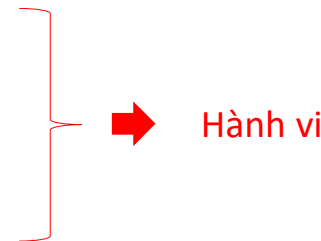
- Thông tin vị trí được thu thập như thế nào?

- ✓ Mỗi robot ước lượng pose của nó và truyền thông với các robot khác.
- ✓ Hoặc các robot ước lượng vị trí tương đối của chúng dựa trên quan sát của cảm biến

Điều khiển đội hình dựa trên hành vi

Behavior-based formation control

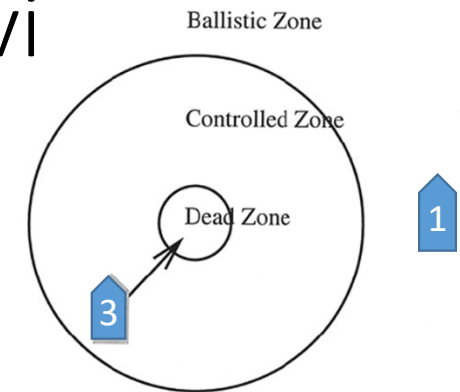
- Dựa trên **“LƯỢC ĐỒ CHUYỂN ĐỘNG”** (Motor-schema) [Balch, Arkin 1998]
- Định nghĩa các lược đồ chuyển động:
 - ✓ Move-to-goal
 - ✓ Avoid-Static-Obstacle
 - ✓ Avoid-Robot
 - ✓ Noise: di chuyển ngẫu nhiên để tránh local minima.
 - ✓ Maintain-formation
- Mỗi lược đồ được biểu diễn bởi **một véctor** đại diện cho đáp ứng hành vi mong muốn (gồm hướng và độ lớn chuyển động) dựa trên các kích thích cảm biến hiện tại gây ra bởi thay đổi của môi trường.
- Hành vi tổng hợp (mức cao) là tổng có trọng số các hành vi/lược đồ thành phần. Trọng số được sử dụng để xác định mức độ quan trọng của hành vi/lược đồ.



Điều khiển đội hình dựa trên hành vi

Behavior-based formation control

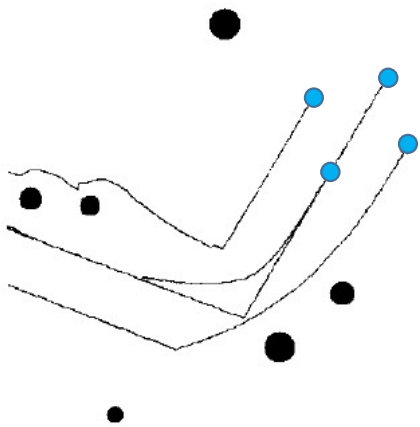
- Lược đồ duy trì đội hình (maintain-formation)
 - ✓ Tạo véc tơ chuyển động về phía điểm ảo (Virtual point)
 - ✓ Độ lớn phụ thuộc vào khoảng cách robot tới điểm ảo.
 - ✓ Ba vùng tham số:
 - Ballistic zone: biên độ có giá trị cực đại
 - Controlled zone: biên độ thay đổi tuyến tính từ giá trị cực đại (ứng với biên ngoài) đến 0 (ứng với biên trong).
 - Dead zone: độ lớn luôn bằng 0. Bán kính dead zone lớn hơn 0 để tránh dao động.



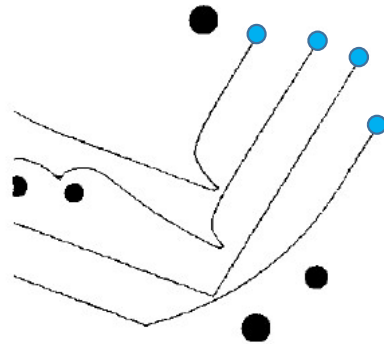
Parameter	Value	Units
avoid-static-obstacle		
gain	1.5	
sphere of influence	50	meters
minimum range	5	meters
avoid-robot		
gain	2.0	
sphere of influence	20	meters
minimum range	5	meters
move-to-goal		
gain	0.8	
noise		
gain	0.1	
persistence	6	time steps
maintain-formation		
gain	1.0	
desired spacing	50	meters
controlled zone radius	25	meters
dead zone radius	0	meters

Điều khiển đội hình dựa trên hành vi

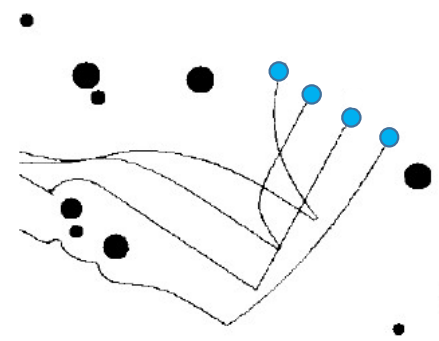
Behavior-based formation control



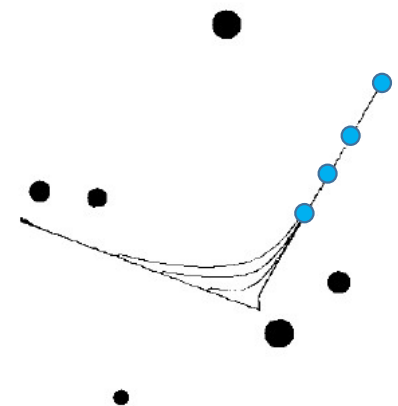
Hình thoi (diamond)



Chữ V (wedge)



Đường thẳng (line)



Cột (column)

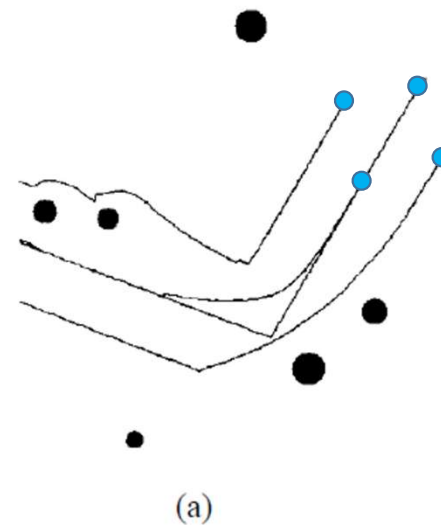
- Các giả thiết:

- ✓ Hệ thống được nối mạng đầy đủ (full networked system)
- ✓ Robot có khả năng tự định vị và trao đổi thông tin vị trí
- ✓ Mô hình robot chất điểm có thể **di chuyển đa hướng (holonomic robots)**

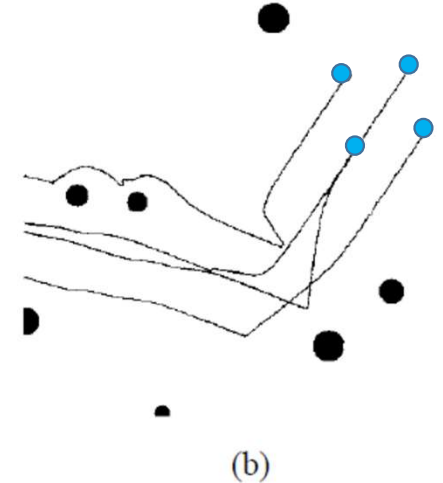
Điều khiển đội hình dựa trên hành vi

Behavior-based formation control

- Mô hình tham chiếu chỉ huy: bất kỳ hoạt động rẽ (turn) nào của chỉ huy đều khiến toàn bộ đội hình thay đổi. Các followers rẽ không ảnh hưởng tới các robot khác. => Có thể bị tách đội hình.
- Mô hình tham chiếu tâm: việc di chuyển/ rẽ của robot bất kỳ tác động đến toàn bộ đội hình. => Không bị tách đội hình (vì các robot có thể đờn nhau)



Tham chiếu chỉ huy



Tham chiếu tâm

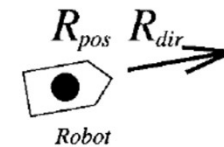
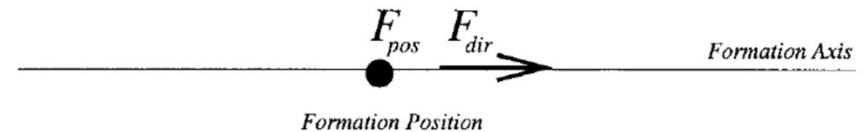
Điều khiển đội hình dựa trên hành vi

Behavior-based formation control

- Mô hình nonholonomic robots: Lược đồ duy trì đội hình (Maintain-formation) bao gồm 2 thành phần:
 - ✓ Duy trì tốc độ đội hình (maintain-formation-speed):
 - Nếu robot đang trong đội hình, tốc độ tốt nhất để duy trì đội hình là tốc độ hiện tại.
 - Nếu robot ở phía sau vị trí đội hình (điểm ảo), nó phải tăng tốc độ.
 - Nếu robot ở phía trước vị trí đội hình, nó phải giảm tốc độ.
 - Thay đổi tốc độ phụ thuộc vào khoảng cách robot so với vị trí đội hình.

$$V_{speed} = R_{mag} + K \times \delta_{speed}$$

Với K là tham số đặt trước [-1,1].



R_{pos}, R_{dir} : vị trí và hướng hiện tại của robot

R_{mag} : tốc độ hiện tại của robot

F_{pos} : vị trí thích hợp của robot trong đội hình

F_{dir} : hướng chuyển động của đội hình, tới điểm tham chiếu tiếp theo.

F_{axis} : trục đội hình, tia đi qua F_{pos} theo hướng F_{dir}

$H_{desired}$: hướng mong muốn

δ_{headi} : hiệu chỉnh hướng được tính

δ_{speed} : hiệu chỉnh tốc độ được tính

V_{steer} : phiếu lái (steer vote) biểu diễn lỗi ra hướng của các hành vi động cơ, được gửi cho bộ điều khiển;

$V_{rmspeed}$: phiếu tốc độ (speed vote), lỗi ra tốc độ của hành vi động cơ, được gửi đến bộ điều khiển.

Điều khiển đội hình dựa trên hành vi

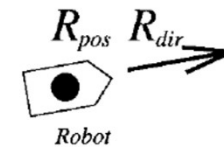
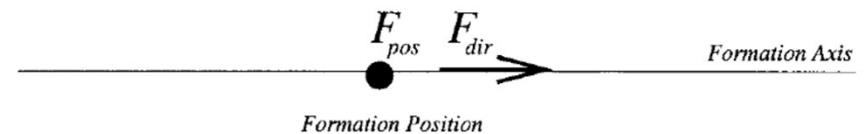
Behavior-based formation control

- Mô hình nonholonomic robots: Lược đồ duy trì đội hình (Maintain-formation) bao gồm 2 thành phần:
 - ✓ Duy trì hướng đội hình (maintain-formation-steer):
 - Nếu robot đang trong đội hình, hướng tốt nhất để duy trì vị trí là trục đội hình.
 - Nếu robot lệch khỏi vị trí theo phương ngang và đội hình đang di chuyển, robot phải quay về phía trục đội hình với một góc phụ thuộc vào độ lệch.
 - Nếu robot đã ra khỏi vị trí và đội hình ngừng di chuyển, thì robot phải hướng thẳng về vị trí đội hình

$$H_{desired} = F_{dir} - \delta_{heading}$$

Với $\delta_{heading}$ có giá trị $[90^\circ, 0] [-90^\circ, 0]$

$$\rightarrow V_{steer} = H_{desired} - R_{dir}$$



R_{pos}, R_{dir} : vị trí và hướng hiện tại của robot

R_{mag} : tốc độ hiện tại của robot

F_{pos} : vị trí thích hợp của robot trong đội hình

F_{dir} : hướng chuyển động của đội hình, tới điểm tham chiếu tiếp theo.

F_{axis} : trục đội hình, tia đi qua F_{pos} theo hướng F_{dir}

$H_{desired}$: hướng mong muốn

$\delta_{heading}$: hiệu chỉnh hướng được tính

δ_{speed} : hiệu chỉnh tốc độ được tính

V_{steer} : phiếu lái (steer vote), biểu diễn lỗi ra hướng của các hành vi động cơ, được gửi đến bộ điều khiển;

$V_{rmspeed}$: phiếu tốc độ (speed vote), lỗi ra tốc độ của hành vi động cơ, được gửi đến bộ điều khiển.

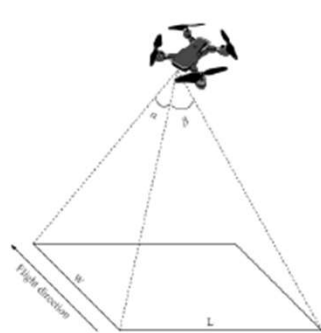
Điều khiển đội hình dựa trên hành vi

Behavior-based formation control

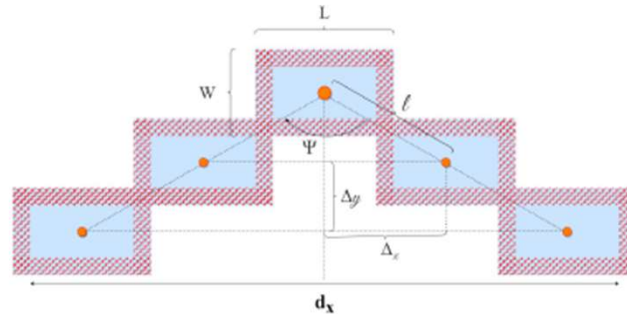
- Các vấn đề: Phương pháp dựa trên hành vi không chứng minh việc đảm bảo hội tụ tới đội hình mong muốn, Sự ổn định của đội hình?
- Mô hình điều khiển vòng kín (closed-loop control) của Das, 2002.

[2] Das, Aveek K., et al. "A vision-based formation control framework." *IEEE transactions on robotics and automation* 18.5 (2002): 813-825.

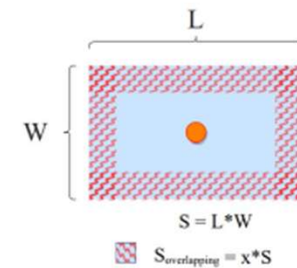
Một số nghiên cứu của Labs



(a) Camera's FOV



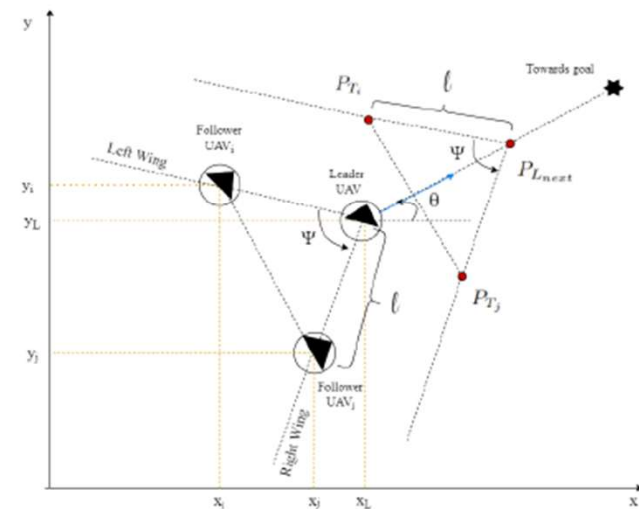
(b) V-shaped formation



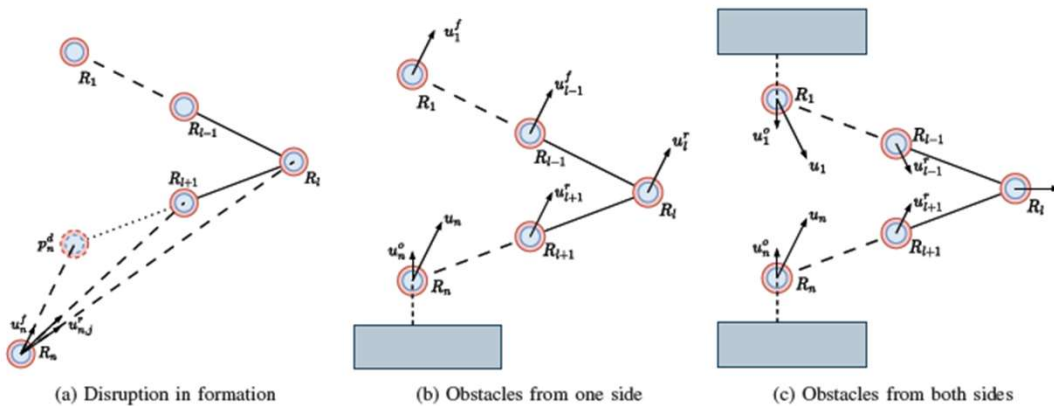
(c) Overlapping rate

[L2.1] Quang, Hung Pham, et al. "Multi-UAV coverage strategy with v-shaped formation for patrol and surveillance." *2022 11th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*. IEEE, 2022.

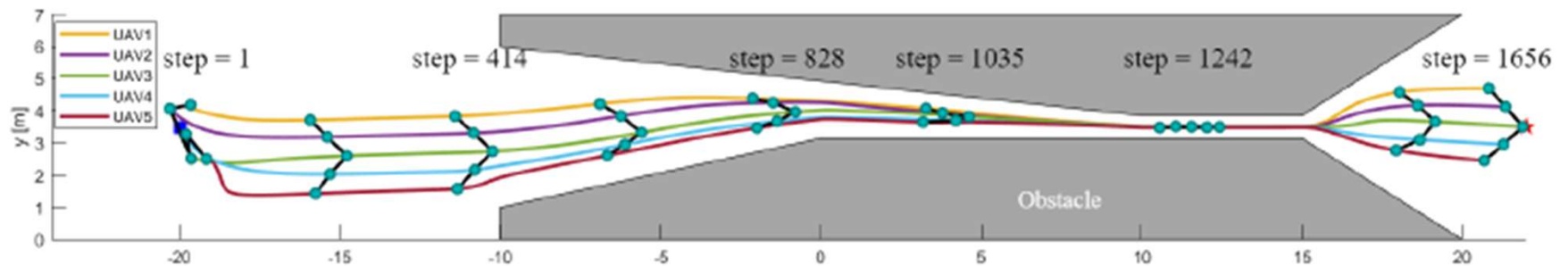
Video thí nghiệm: <https://www.youtube.com/watch?v=A5u8xT-GqYQ>



Một số nghiên cứu của Labs

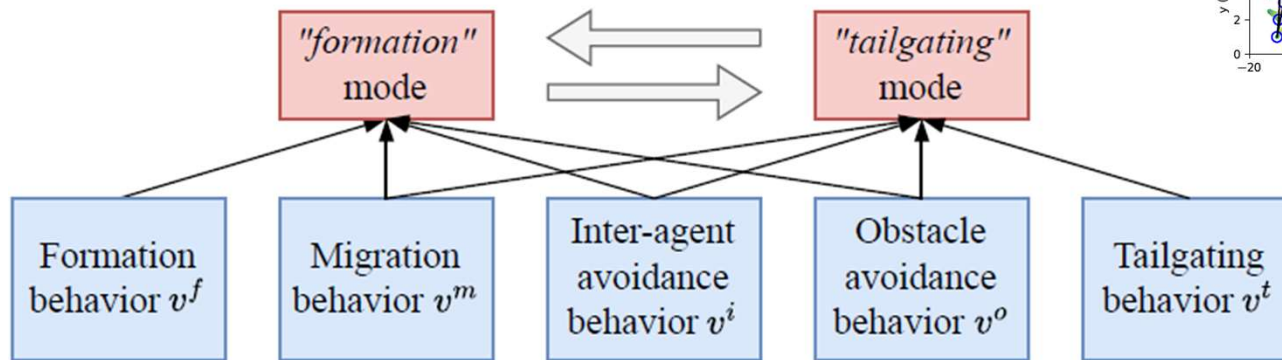


[L2.2] Bui, Duy Nam, Manh Duong Phung, and Hung Pham Duy. "Self-Reconfigurable V-shape Formation of Multiple UAVs in Narrow Space Environments." *2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE, 2024.



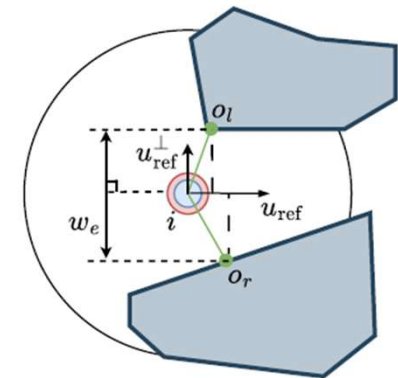
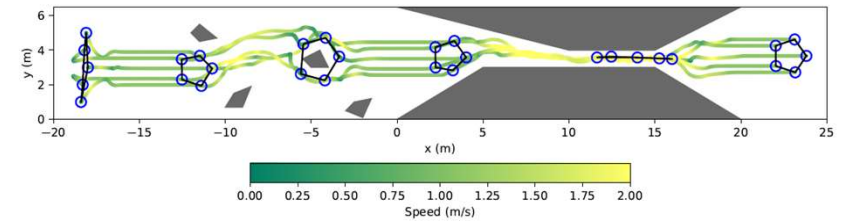
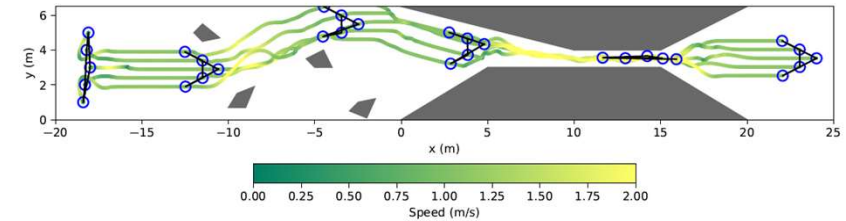
Video thí nghiệm: <https://www.youtube.com/watch?v= 6u7yMNOySc>

Một số nghiên cứu của Labs



Formation scaling factor

$$\kappa = \begin{cases} \frac{w_e - 2r}{w_f} & \text{if } w_e \geq \lambda r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



Video thí nghiệm: <https://www.youtube.com/watch?v=XmZQlztNjn8&feature=youtu.be>

[L2.3] Bui Duy Nam, Phung Manh Duong, and Phạm Duy Hung, *Event-based reconfiguration control for time-varying formation of robot swarms in narrow spaces*, Intelligent Service Robotics, **2025**.