

Chương 2. Robot di động

Các phương pháp định vị

TS. Phạm Duy Hưng

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

hungpd@vnu.edu.vn

Nội dung bài giảng

- Hệ thống định vị
 - Trong nhà
 - Ngoài trời
- Định vị sử dụng phương pháp Odometry
 - Mô hình động học robot 2 bánh vi sai
 - Phương pháp Odometry

Định vị robot

- Nhiệm vụ chính:
 - Path planning
 - Mapping
 - Referencing
 - Coordination
- Các loại định vị
 - Tọa độ tuyệt đối (Absolute coordinates)
 - Tọa độ cục bộ (Local coordinates)
 - Thông tin cấu trúc hình học (Topological information)



Các hệ thống định vị

Phân loại

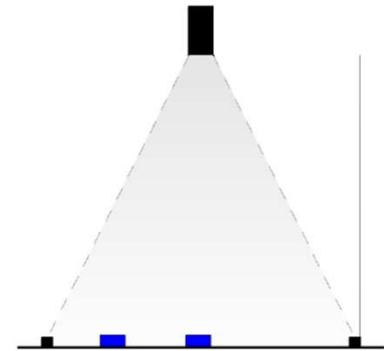
- Kỹ thuật trong nhà và ngoài trời
- Hệ thống định vị tương đối và tuyệt đối
- Line of sight và non-line of sight
- Nguyên tắc vật lý cơ bản và kênh
- Định vị trực tiếp (on-board) và off-board
- Khả năng mở rộng theo số lượng nút

Hệ thống định vị indoor

- Overhead cameras and motion capture systems (MCSs)
- Băng siêu rộng sóng vô tuyến dạng xung IR-UWB (Impulse Radio Ultra Wide Band): Mô đun DWB1000 của Decawave
- Infrared (IR) + RF technology

2D single – or Multi-Camera Systems

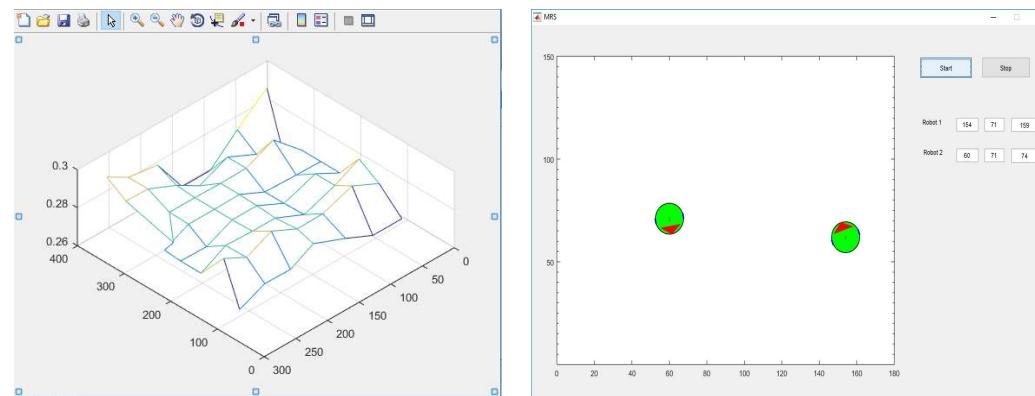
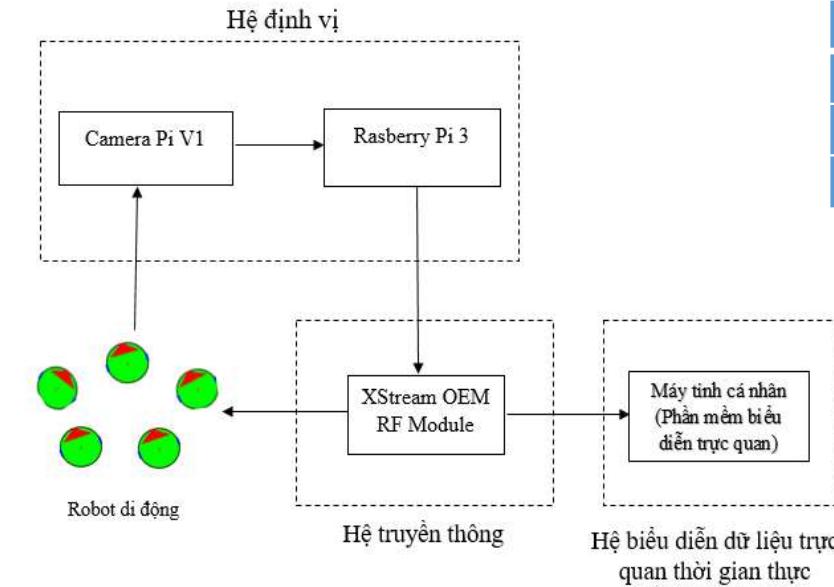
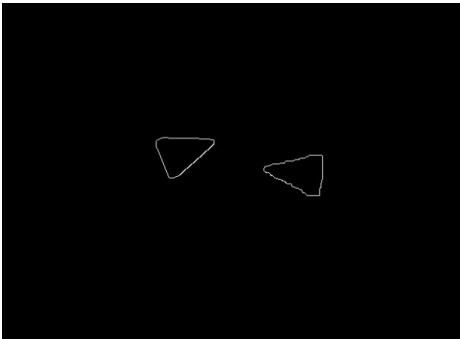
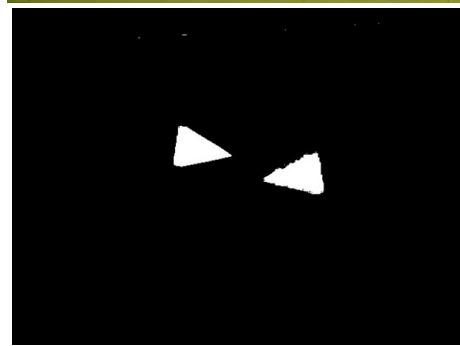
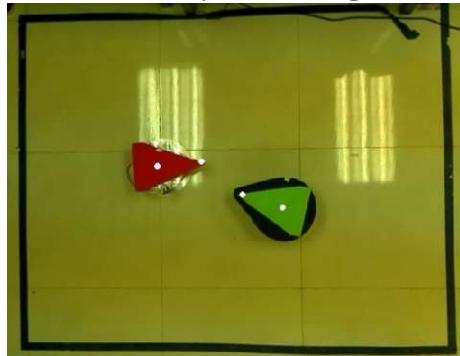
- Tracking objects với 1 hoặc nhiều overhead cameras.
- Cung cấp vị trí/pose tuyệt đối
- Có hoặc không có markers
- Có một số phần mềm nguồn mở (ví dụ: SwisTrack được phát triển bởi PTN DISAL của EPFL, Thụy Sĩ)
- Vấn đề chính: ánh sáng, hiệu chuẩn (calibration)



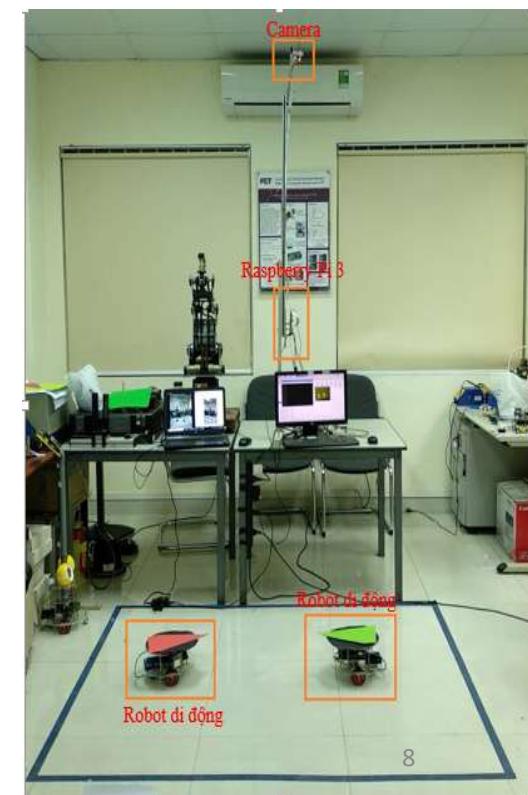
Performance 1 camera system	
Accuracy	~ 1 cm (2D)
Update rate	~ 20-100 Hz
# agents	~ 100
Area	~ 10 m ²

2D single – or Multi-Camera Systems

Một ví dụ (KLTN: Nghiên cứu phát triển hệ thí nghiệm trực quan cho robot di động – Nguyễn Mỹ Duyên K59Đ)

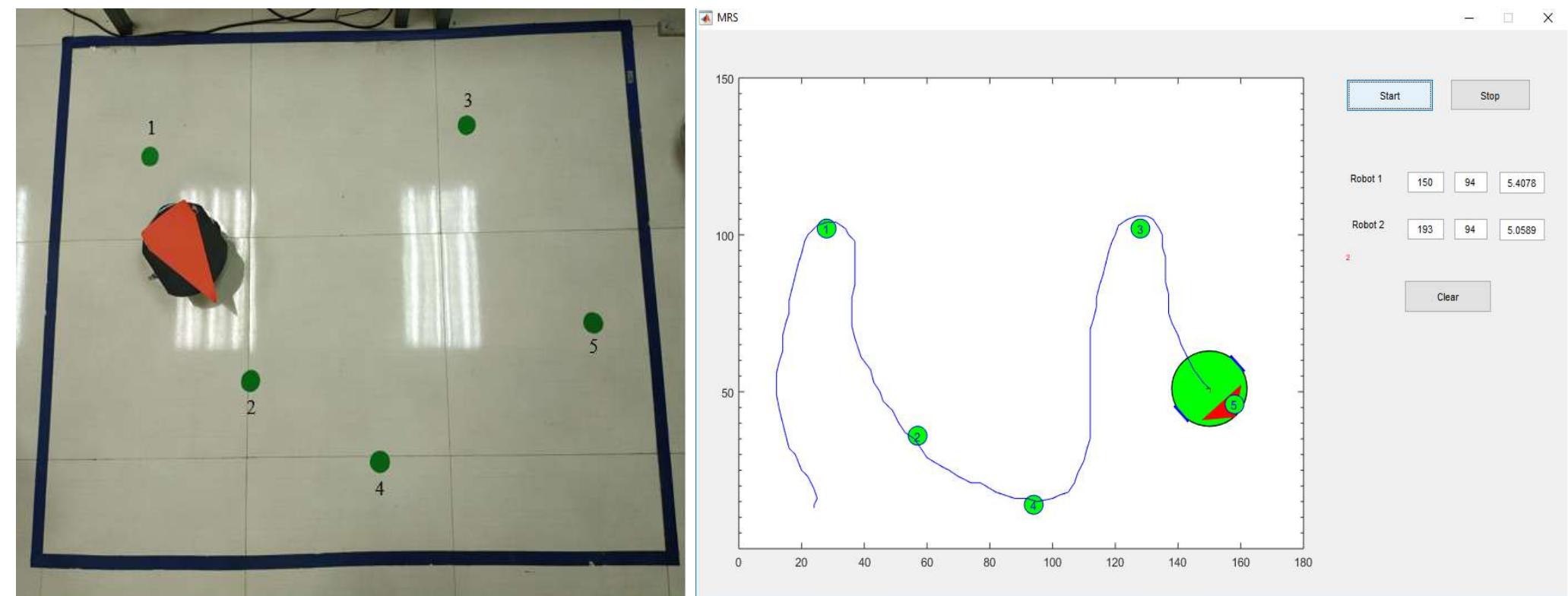


	1 Robot	2 Robot	3 Robot
(320×240)	23 (0.04348s)	14 (0.0714s)	7 (0.1428s)
(640×480)	12 (0.0833s)	7.5 (0.1333s)	3 (0.3333s)
(1080×810)	7 (0.1429s)	3.5 (0.2857s)	1 (1s)



2D single – or Multi-Camera Systems

Một ví dụ (KLTN: Nghiên cứu phát triển hệ thí nghiệm trực quan cho robot di động – Nguyễn Mỹ Duyên K59Đ)



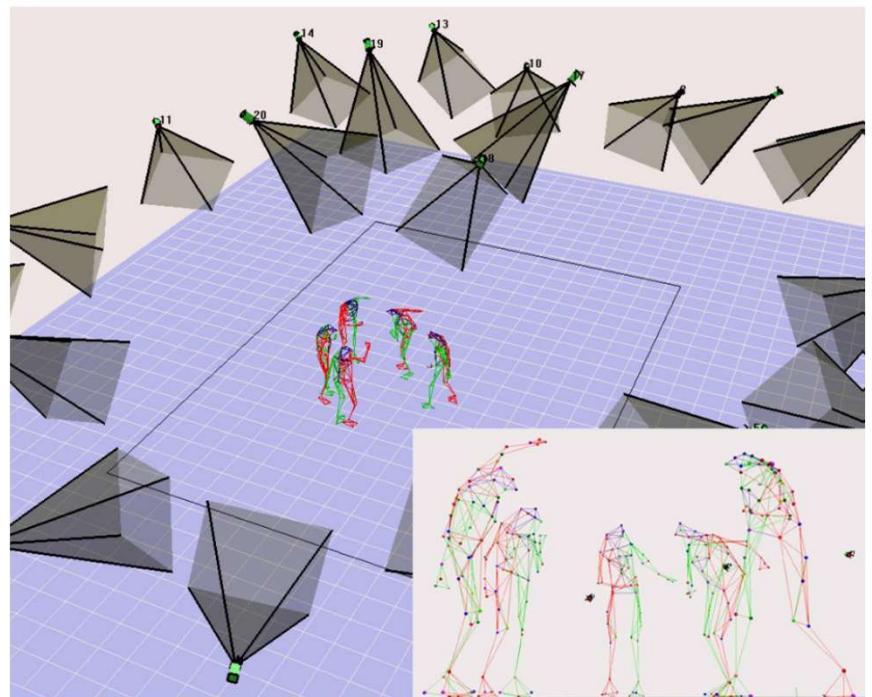
ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP RVO ĐỂ TRÁNH VẬT CẨN VÀ VA CHẠM GIỮA CÁC ROBOT

Thí nghiệm 1: Hai robot đối đầu trực diện

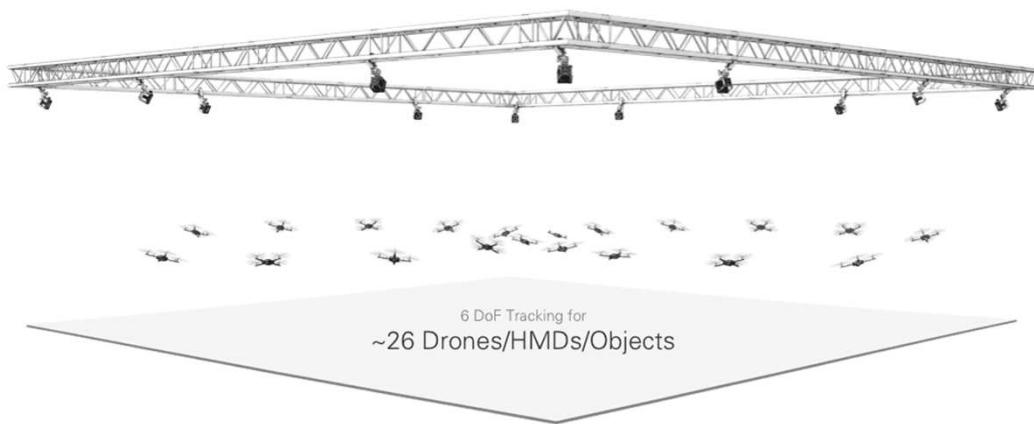
KLTN: Áp dụng phương pháp RVO để tránh vật cản và va chạm giữa các robot (Nguyễn Văn Chung – K59Đ) ¹⁰

3D Multi-Camera Systems

- Được gọi là hệ thống bắt chuyển động Motion Capture System (MCS)
- 10-50 cameras
- Độ chính xác mm
- Tần số cập nhật vài Hz, độ trễ vài ms
- Vật thể 6D
- 4-5 markers/vật thể
- Vùng chuyển động vài trăm m³
- Một số sản phẩm thương mại
 - ✓ VICON: <https://www.vicon.com/>
 - ✓ Optitrack: <https://optitrack.com/>
 - ✓ Qualisys: <https://www.qualisys.com/>

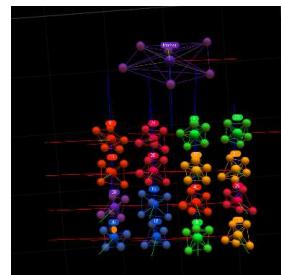
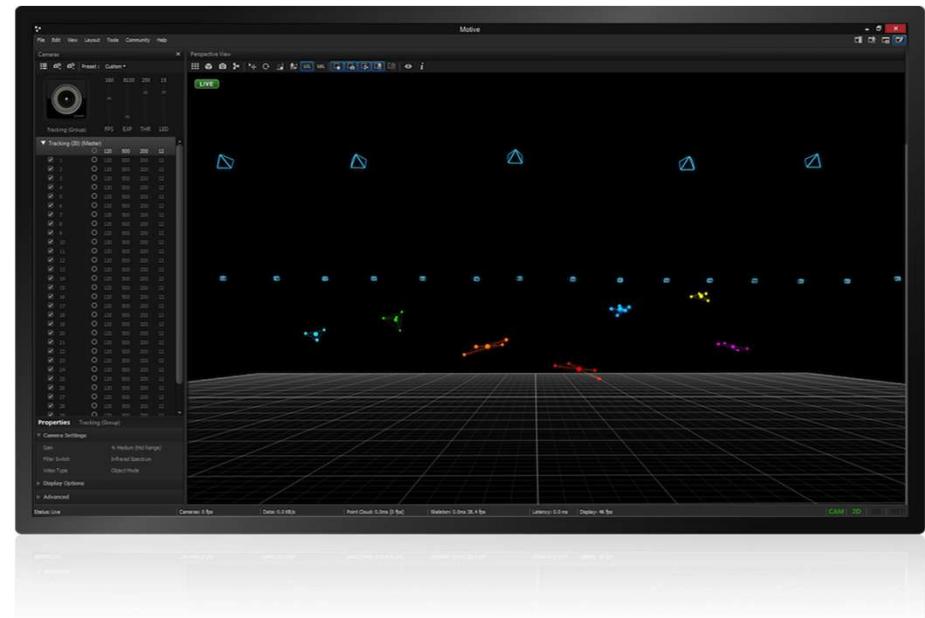
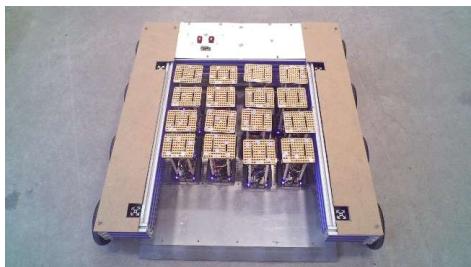


Một ví dụ về MCS của Optitrack



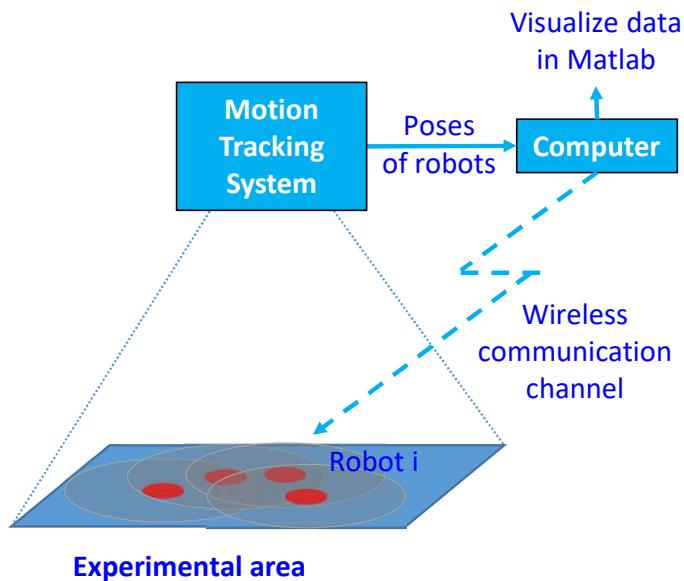
Hệ thống Optitrack với 12 cams:

- Khu vực thí nghiệm 12mx12mx4m
- Số lượng Drone/Robot/Object: 26

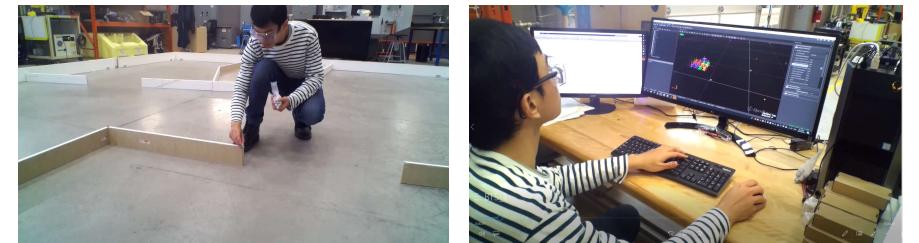


Một ví dụ về MCS của Optitrack

Our system for a indoor robot swarm



Hiệu chuẩn hệ thống



Thiết lập thí nghiệm

Thí nghiệm trên hệ thống Optictrack

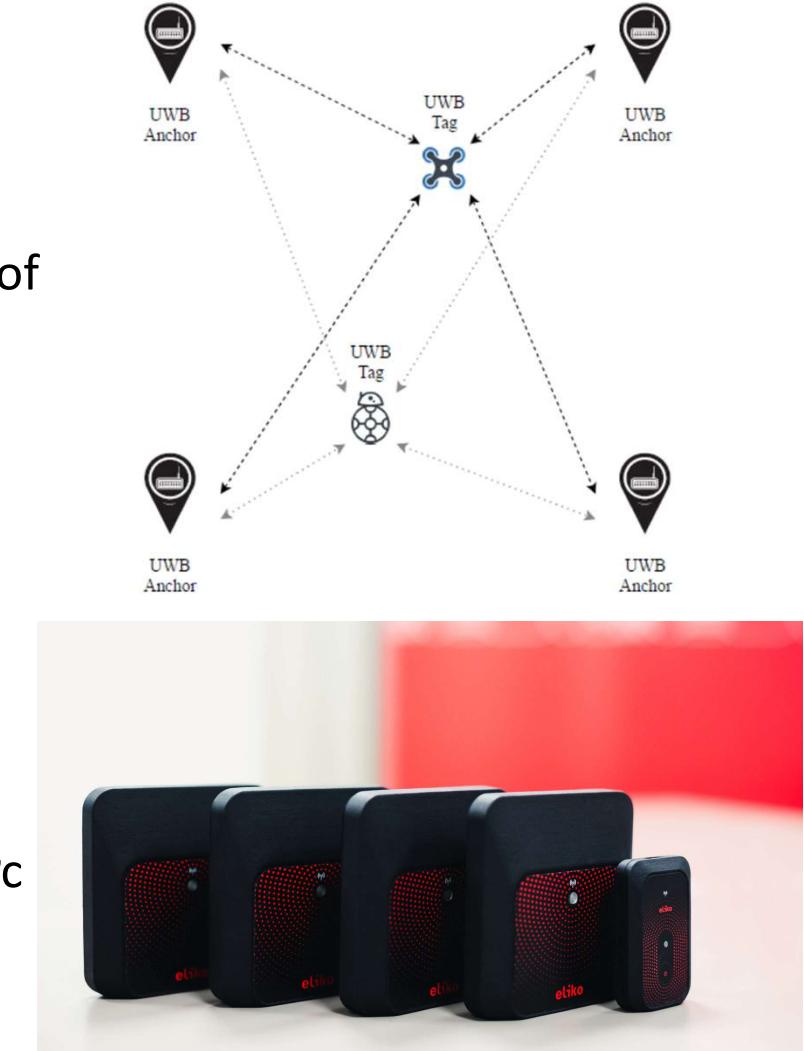
**ROROT SWARM DEPLOYMENT
FOR EXPLORATION AND COVERAGE**



<https://www.youtube.com/watch?v=w2itwFJCgFQ>

Hệ thống IR-UWB

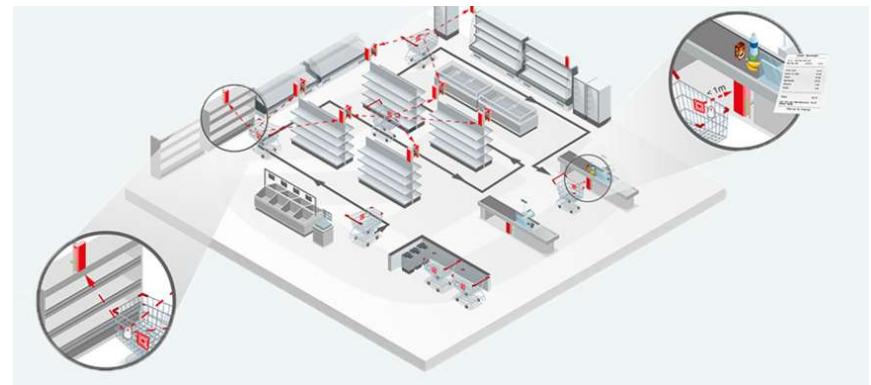
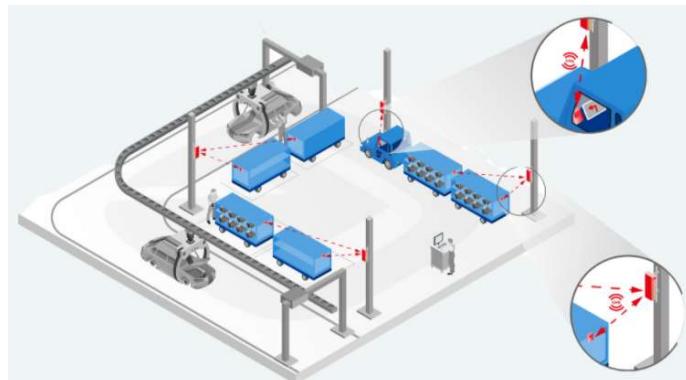
- Công nghệ băng siêu rộng sóng vô tuyến dạng xung
- Dựa vào thời gian truyền sóng (TDOA-Time difference of Arrival)
- Tần số trung tâm 6-8 Ghz
- Băng rất rộng (>0.5GHz) -> khả năng xuyên vật liệu
- Độ phân giải thời gian tốt -> độ chính xác cao (cỡ cm)
- UWB tags (bộ phát, kích thước nhỏ, công suất thấp) và nhiều bộ nhận (anchors) được đồng bộ.
- Bộ phát có thể không được đồng bộ nhưng phải xử lý các nhiễu.
- Vị trí tuyệt đối có trên hệ thống nhận.
- Thông tin vị trí có thể được đưa trở lại các thiết bị được theo dõi sử dụng kênh băng hẹp chuẩn.
- Sản phẩm thương mại: Eliko UWB RTLS system:
<https://eliko.tech/>



Hệ thống IR-UWB

- Độ chính xác giảm nếu:
 - ✓ Can nhiễu giữa các bộ phát
 - ✓ Thiên về non-Line-of-Sight (NLOS)
 - ✓ Đa đường (multi-path)

Accuracy	15 cm (3D)
Update rate	34 Hz / tag
# agents	~ 10000
Area	~ 1000 m ²



Eliko UWB RTLS system

<https://www.youtube.com/watch?v= pU76BmbARM>



The K10 real time location system
uses Ultra Wideband technology

Công nghệ Infrared+Radio

- Vòng LED IR phát và nhận (photodiode)
- LED IR sử dụng như ăng ten: ánh sáng được điều chế (sóng mang 10.7MHz).
- Range: đo Cường độ tín hiệu nhận RSSI (Received Signal Strength Intensity)
- Hướng (Bearing): tương quan tín hiệu trên các bộ thu
- Đo dải và hướng (range and bearing) có thể được kết hợp với kênh RF chuẩn.
- Cũng có thể sử dụng kênh truyền IR 20kbits/s
- ID của robot được truyền theo kênh IR (ad hoc protocols).



J. Pugh, X. Raemy, C. Favre, R. Falconi and A. Martinoli, "A Fast Onboard Relative Positioning Module for Multirobot Systems," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 14, no. 2, pp. 151-162, April 2009, doi: 10.1109/TMECH.2008.2011810. 19

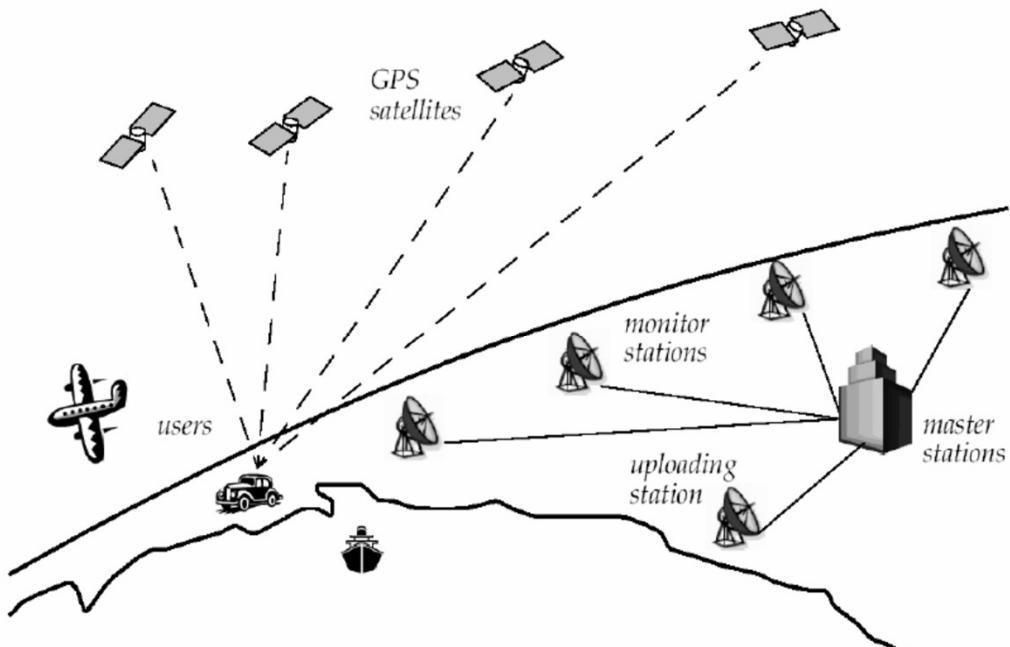
Công nghệ Infrared+Radio

- Dải: 3.5m (có thể mở rộng vài m)
- Tần số cập nhật 25Hz với khoảng 10 robot hàng xóm (250Hz với 2); Có thể mở rộng tới vài trăm Hz với công nghệ TDMA.
- Độ chính xác khoảng cách: <10%, giảm theo $1/d$
- Độ chính xác góc: <10°.
- Phương pháp LoS
- Có thể mở rộng mô hình 3D
- Phạm vi lớn hơn yêu cầu tiêu thụ năng lượng nhiều hơn và phải có các thấu kính quang học chuyên dụng; độ chính xác góc (bearing) tốt hơn khi dùng nhiều photodioes.

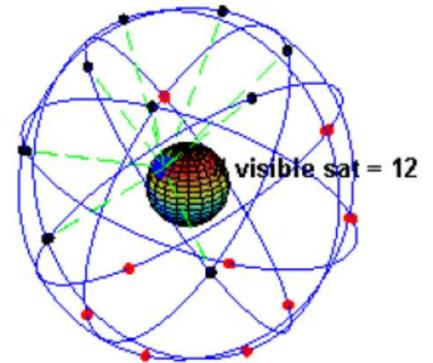
Công nghệ định vị Outdoor

- GPS
- GPS vi sai (dGPS-differential GPS)

Hệ thống định vị toàn cầu



© R. Siegwart, ETH Zurich - ASL



Hệ thống GPS gồm 3 phân đoạn:

- ✓ Phân đoạn điều khiển (control segment)
- ✓ Phân đoạn không gian (space segment)
- ✓ Phân đoạn người dùng (user segment)

- GNSS (Global Navigation Satellite System): hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu.

Hệ thống định vị toàn cầu

- **Phân đoạn điều khiển:**

- ✓ Trung tâm điều khiển đặt ở căn cứ không quân Falcon, Colorado, Mỹ; và một số trạm giám sát, điều khiển đặt khắp nơi trên thế giới với nhiệm vụ giám sát vệ tinh, báo cáo kết quả tới trung tâm điều khiển và chuyển tiếp tín hiệu điều khiển được tạo bởi trạm trung tâm trở lại vệ tinh.
- ✓ Các trạm phân đoạn điều khiển là những trạm duy nhất truyền thông tin tới vệ tinh, cung cấp cho việc định vị vệ tinh trên quỹ đạo,...

- **Phân đoạn không gian:**

- ✓ Chòm sao vệ tinh gồm 24 vệ tinh, từ tháng 12/2012 là 32, quay quanh trái đất 12 giờ một lần ở độ cao 20,190 km, dàn thành 6 quỹ đạo riêng biệt.
- ✓ Với một chòm sao đầy đủ (gồm 24 vệ tinh), các máy thu tại hầu hết các điểm có thể nhìn thấy ít nhất 6, đôi khi có 12 vệ tinh cùng lúc.

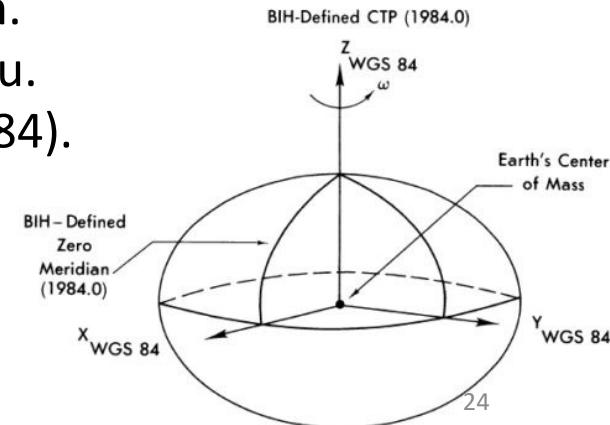
Hệ thống định vị toàn cầu

- **Phân đoạn người dùng:**

- ✓ Ám chỉ các máy thu, nghe các tín hiệu vệ tinh-> **Thụ động**
- ✓ **Không có sự tổ chức** với phân đoạn người dùng: ai cũng có thể dùng chỉ cần máy thu + ăng ten.
- ✓ Máy thu của người dùng: chỉ nghe tín hiệu phân đoạn không gian, không phát bất kỳ tín hiệu gì -> hệ thống có thể truy cập cho **bất kỳ số lượng người** dùng nào.

- **Nguyên lý hoạt động:**

- ✓ Các vệ tinh quay quanh trái đất chỉ đơn giản là **phát vị trí** của chúng và **thời gian hiện tại**.
- ✓ Máy thu lắng nghe một số vệ tinh, xác định chính xác mất bao lâu để tín hiệu từ vệ tinh đến máy thu, từ đó biết khoảng cách giữa máy thu và vệ tinh.
- ✓ Sử dụng biến đổi hình học đơn giản để xác định vị trí máy thu.
- ✓ Tọa độ x, y, z tính theo hệ thống trắc địa thế giới 1984 (WGS84).
 - Điểm gốc nằm gần tâm trái đất;
 - Trục z khớp với trục quay trái đất (+z) hướng về cực bắc;
 - Trục +x xuất hiện từ trái đất trên kinh tuyến Greenwich;
 - Trục +y tại đường xích đạo trên 90 độ kinh tuyến đông;



Hệ thống định vị toàn cầu

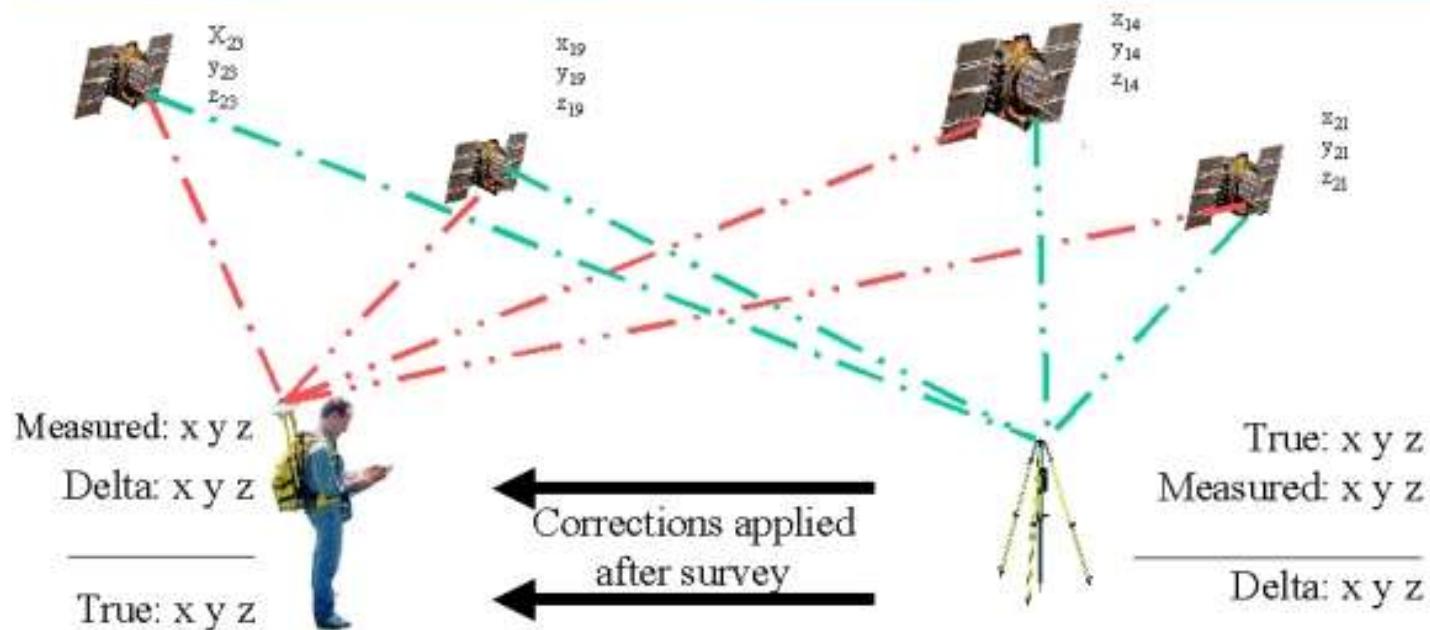
- **Nguyên lý hoạt động:**

- ✓ Các vệ tinh đồng bộ hóa tín hiệu truyền (vị trí và bước thời gian) sao cho các tín hiệu được phát quảng bá ở cùng thời điểm (các trạm mặt đất cập nhật + đồng hồ nguyên tử trên vệ tinh).
- ✓ Vị trí của bất kỳ bộ nhận GPS nào được xác định thông qua thời gian truyền của phép đo (độ chính xác ns)
- ✓ Cần ít nhất **4 vệ tinh** để xác định 3 giá trị tọa độ (x,y,z).

- **Lưu ý:**

- ✓ Các thiết bị thu GPS thương mại gần đây cho phép **độ chính xác vị trí đến vài mét** với điều kiện quan sát vệ tinh tốt nhất.
- ✓ Độ trễ 200-300ms do đo cập nhật GPS **tối đa 5Hz**.

GPS vi sai (dGPS) *Differential GPS*



NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION
National Ocean Service
National Geodetic Survey



Positioning America for the Future

Luyện tập

- BT1: Phương pháp định vị trong nhà sử dụng overhead camera?
- BT2: Phương pháp định vị trong nhà sử dụng hệ thống bắt chuyển động MCS?
- BT3: Phương pháp định vị trong nhà với công nghệ UWB?
- BT4: Phương pháp định vị trong nhà sử dụng IR kết hợp RF?
- BT5: Nguyên lý hoạt động GPS?
- BT6: DGPS là gì? khác so với GPS ntn?

Odometry

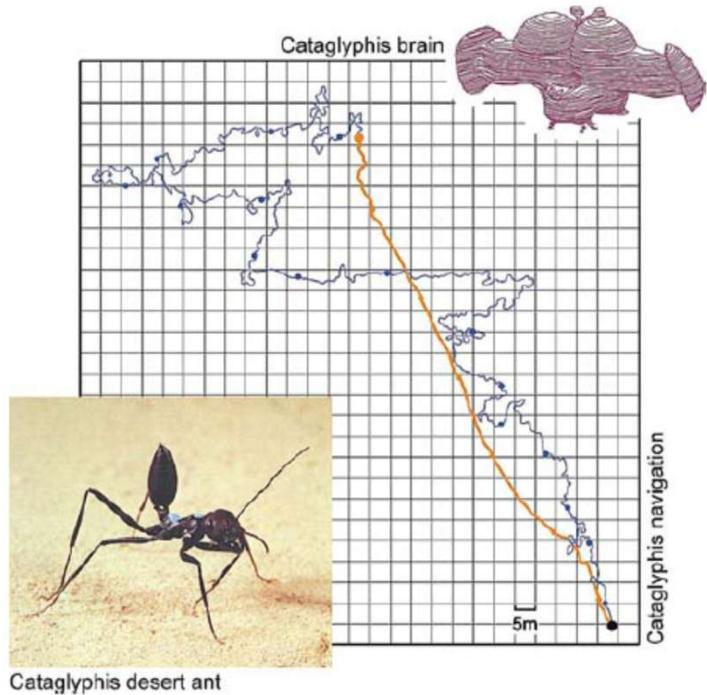
Định nghĩa

Sử dụng dữ liệu cảm biến nội tạo ra bởi chuyển động của cơ cấu chấp hành để ước lượng sự thay đổi pose theo thời gian

- Cảm biến nội (proprioceptive)
 - Bánh xe có encoders (mô tơ DC), bộ đếm bước (mô tơ bước)
 - IMU (inertial measurement units), accelerometers
- Cơ cấu chấp hành
 - Chân
 - Bánh xe
 - Cánh quạt
- Start: vị trí ban đầu

Ví dụ về dẫn đường dùng Odometry

- Loài kiến Cataglyphis ở xa mạc.
- Chiến lược kiếm mồi cá thể.
- Cơ chế cơ bản:
 - Dead-reckoning (tích hợp đường đi vào chuỗi thần kinh để điều khiển chân)
 - Internal compass (phân cực ánh mặt trời).
 - Local search (phạm vi khoảng 1-2m từ tổ).
- Dẫn đường cực kỳ chính xác: lỗi trung bình trực cm trên đường đi khoảng 500m.

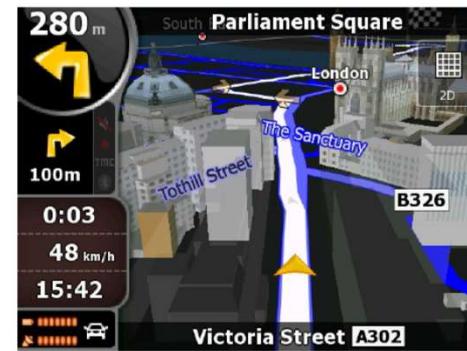


Ví dụ về dẫn đường dùng Odometry

- Con người trong đêm
 - Cảm biến odometry rất kém
 - $d_{\text{Odometry}} = O(1/\text{m})$
- Tàu ngầm hạt nhân
 - Cảm biến Odometry rất tốt
 - $d_{\text{Odometry}} = O(1/10^3 \text{ km})$
- Hệ thống dẫn đường trong đường hầm sử dụng dead-reckoning dựa vào:
 - Vận tốc cuối được đo bởi GPS
 - Odometry của ô tô và compass.



Picture: Courtesy of US Navy

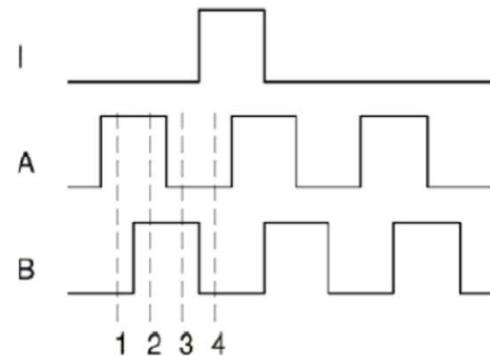
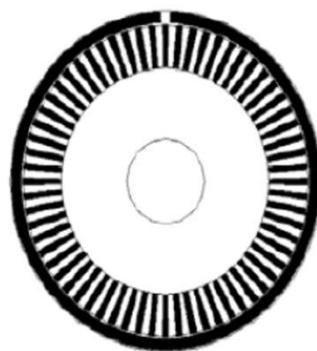


Picture: Courtesy of NavNGo

Odometry sử dụng Encoders
hoặc bộ đếm bước

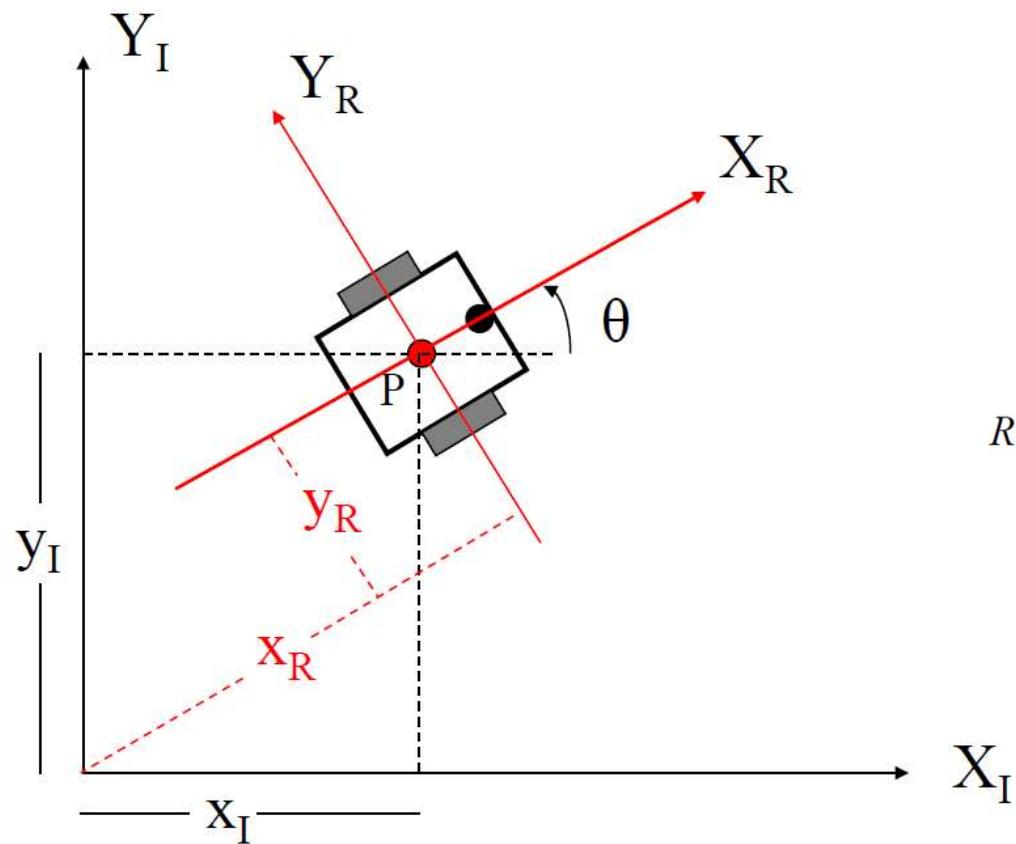
Optical Encoders

- Đo sự dịch chuyển (hoặc vận tốc) của bánh xe.
- Nguyên lý: đĩa chắn quang có các rãnh hẹp được gắn với trục động cơ, cắt ánh sáng của cặp thu và phát quang.
- Quadrature encoder: 2 encoders giống nhau nhưng lệch pha 90°, cho phép xác định hướng.
- Tích hợp chuyển động bánh xe để ước tính vị trí -> odometry (đo lường)
- Độ phân giải điển hình: 65-4092 rãnh/vòng quay



State	Ch A	Ch B
S ₁	High	Low
S ₂	High	High
S ₃	Low	High
S ₄	Low	Low

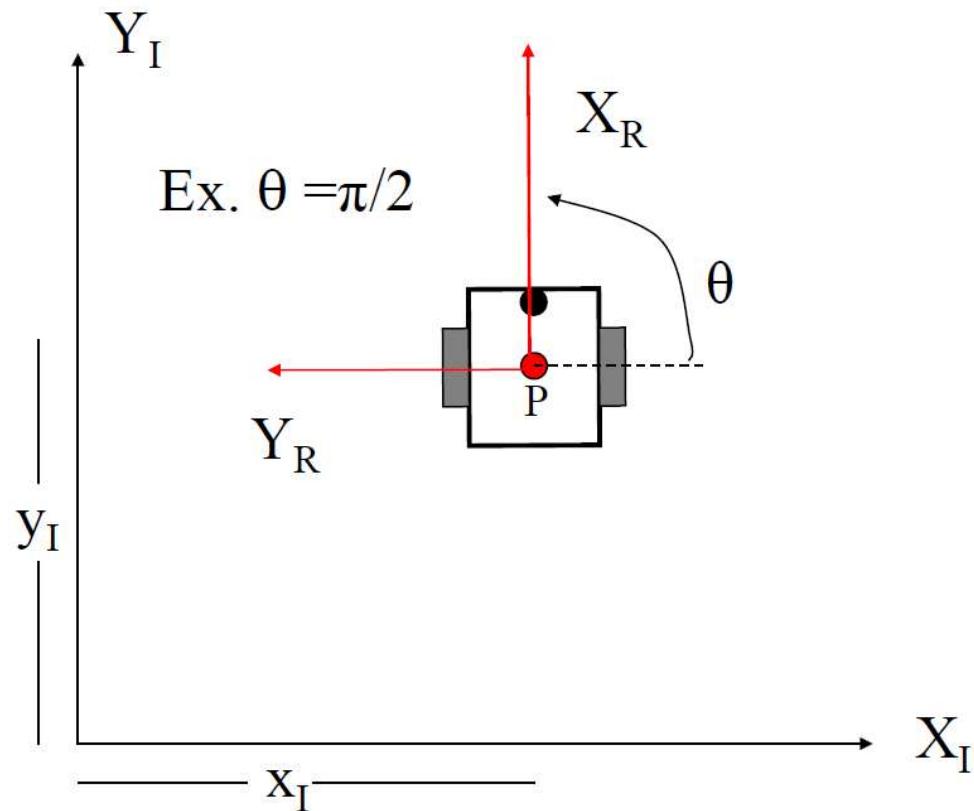
Pose (Vị trí và hướng) của robot 2 bánh vi sai



$$\xi_I = \begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ \theta \end{bmatrix} \quad \xi_R = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ \theta \end{bmatrix} = R(\theta)\xi_I$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Chuyển động tuyệt đối và tương đối của robot 2 bánh vi sai

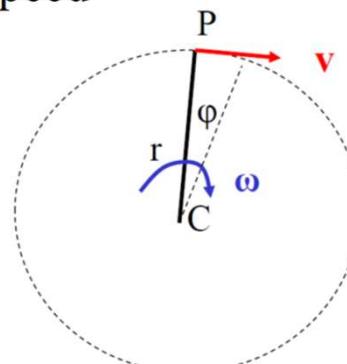
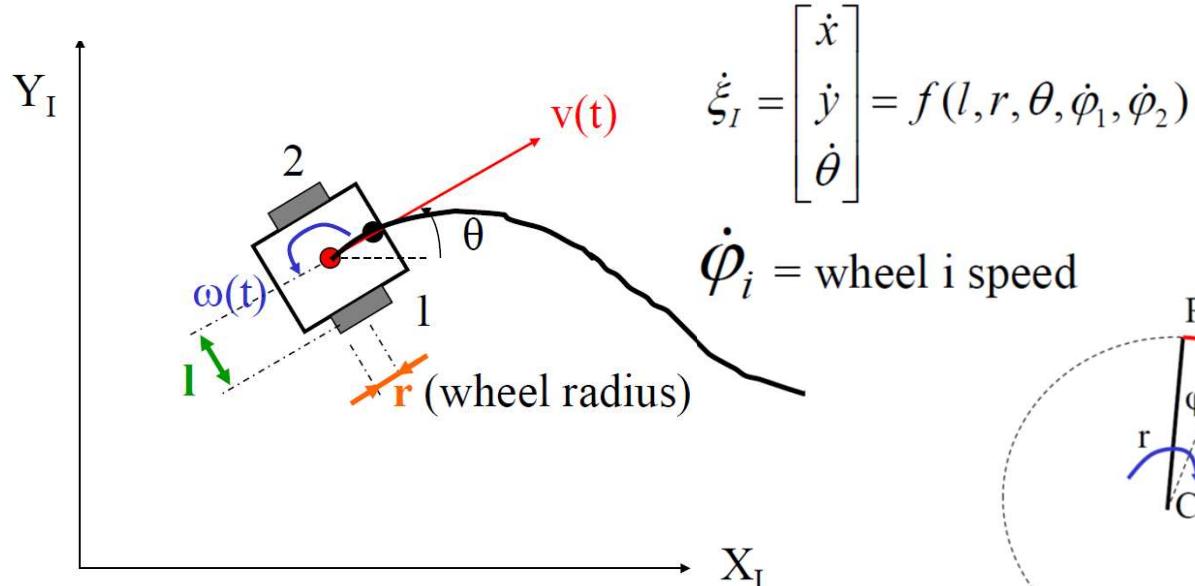


$$\dot{\xi}_R = R(\theta)\dot{\xi}_I$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{y}_I \\ \dot{\theta}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}_I \\ -\dot{x}_I \\ \dot{\theta}_I \end{bmatrix}$$

Mô hình động học thuận (Forward kinematic)

- Làm thế nào robot di chuyển với tốc độ và dạng đường đi cho trước?
 - ✓ Giả sử: bánh xe không bị trượt; không ảnh hưởng động lực học



$$v = \omega r = \dot{\phi} r$$

v = tangential speed
 ω = rotational speed
 r = rotation radius
 ϕ = rotation angle
 C = rotation center
 P = peripheral point

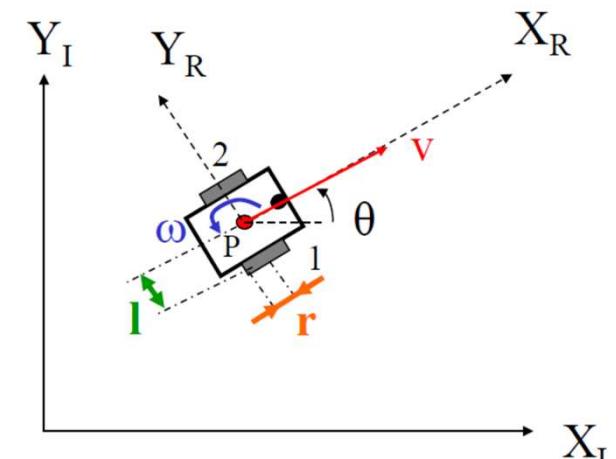
Mô hình động học thuận (Forward kinematic)

- Vận tốc tuyến tính=trung bình của vận tốc bánh xe 1 và 2:

$$v = \frac{r\dot{\phi}_1}{2} + \frac{r\dot{\phi}_2}{2}$$

- Vận tốc góc bằng tổng vận tốc góc (bánh xe 1: tiến -> quay ngược chiều kim đồng hồ; bánh xe hai tiến -> quay theo chiều kim đồng hồ)

$$\omega = \frac{r\dot{\phi}_1}{2l} + \frac{-r\dot{\phi}_2}{2l}$$



Mô hình động học thuận (Forward kinematic)

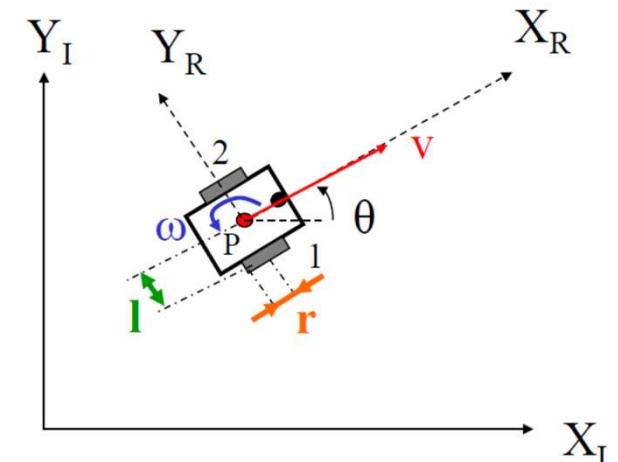
$$1. \dot{x}_R = v = \frac{r\dot{\phi}_1}{2} + \frac{r\dot{\phi}_2}{2}$$

$$2. \dot{y}_R = 0$$

$$3. \dot{\theta}_R = \omega = \frac{r\dot{\phi}_1}{2l} + \frac{-r\dot{\phi}_2}{2l}$$

$$4. \dot{\xi}_I = R^{-1}(\theta) \dot{\xi}_R$$

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{r\dot{\phi}_1}{2} + \frac{r\dot{\phi}_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\dot{\phi}_1}{2l} + \frac{-r\dot{\phi}_2}{2l} \end{bmatrix}$$



Odometry

- Cho trước pose tuyệt đối, có thể tính pose của robot sau thời gian t thông qua phép tích phân.

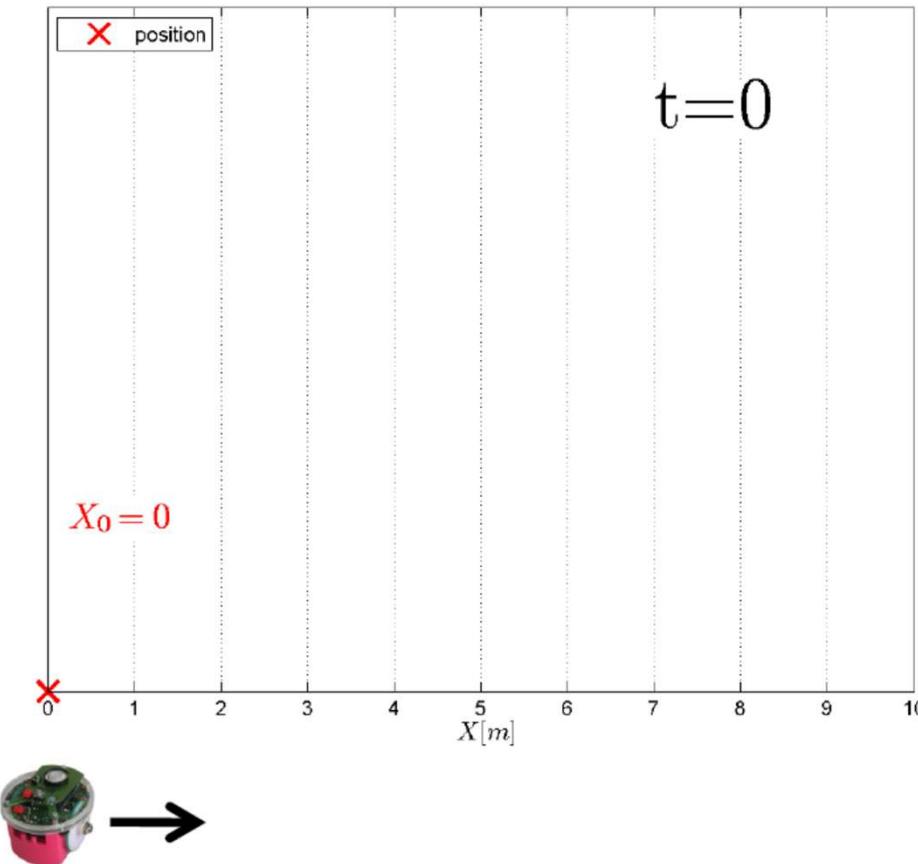
$$\xi_I(T) = \xi_{I_0} + \int_0^T \dot{\xi}_I dt = \xi_{I_0} + \int_0^T R^{-1}(\theta) \dot{\xi}_R dt$$

- Vị trí ban đầu ξ_{I_0} , sau thời gian T, vị trí của xe sẽ là $\xi_I(T)$. Trong đó $\xi_I(T)$ được tính với các tham số: tốc độ bánh xe 1, tốc độ bánh xe 2, bánh kính bánh xe r, và nửa độ dài trục bánh xe l.
- Tốc độ bánh xe được xác định bằng phương pháp Odometry.

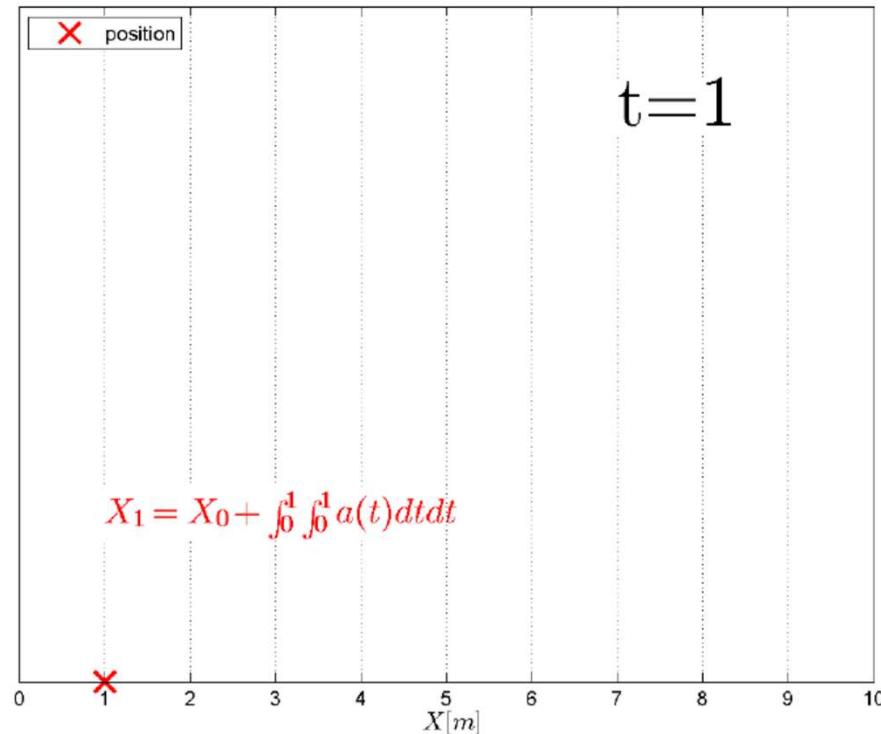
Sự không chắc chắn trong phép định vị Odometry

- Nguồn lỗi xác định
 - ✓ Độ phân giải encoder hạn chế
 - ✓ Bánh xe lệch trục và sự khác biệt nhỏ về đường kính bánh xe.
 - Có thể xử lý bằng cách hiệu chuẩn
- Nguồn lỗi không xác định
 - ✓ Có thể mô tả chúng theo xác suất

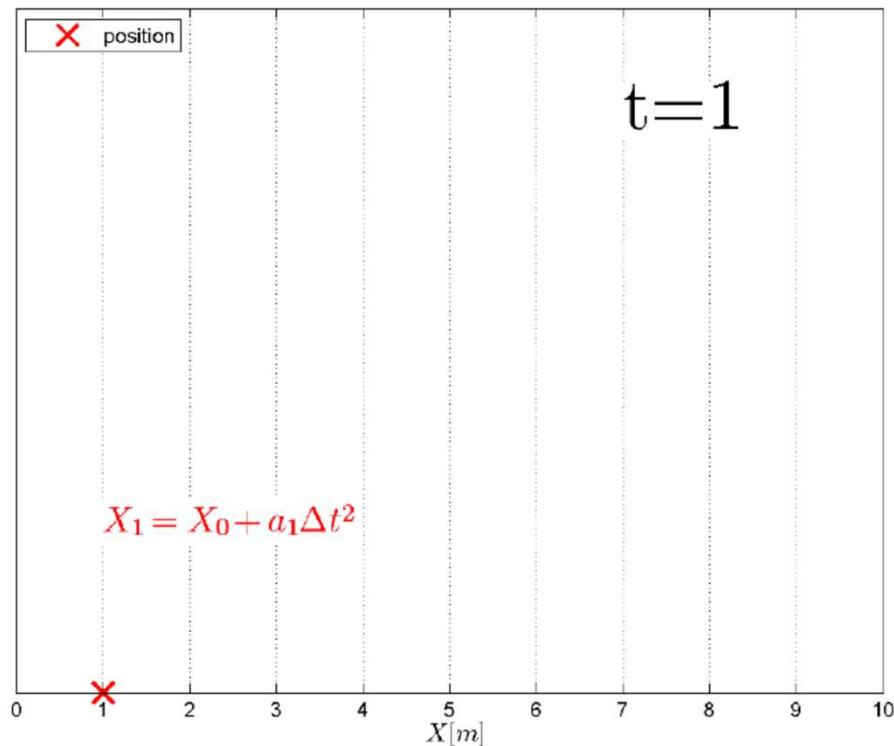
Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)



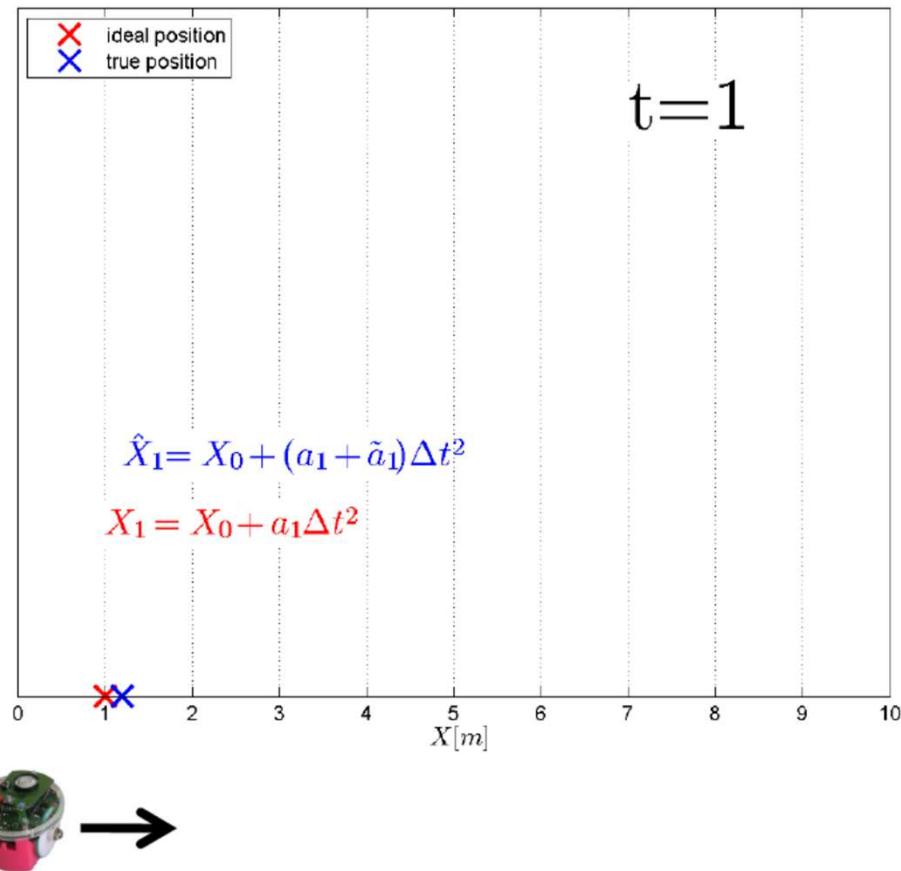
Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)



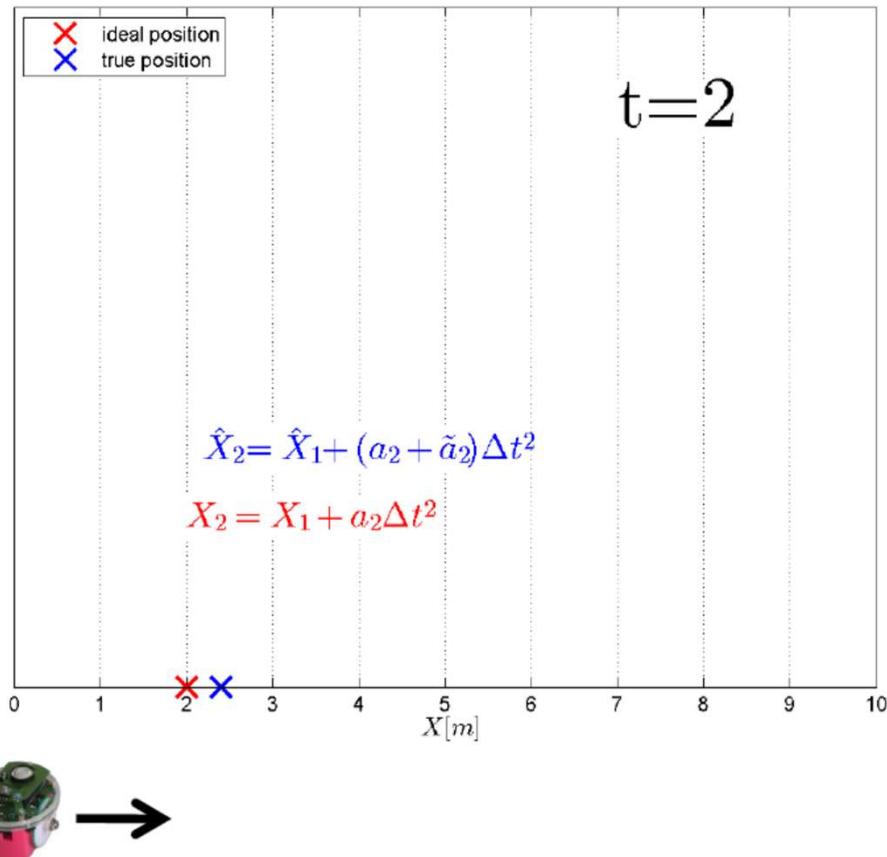
Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)



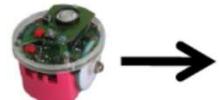
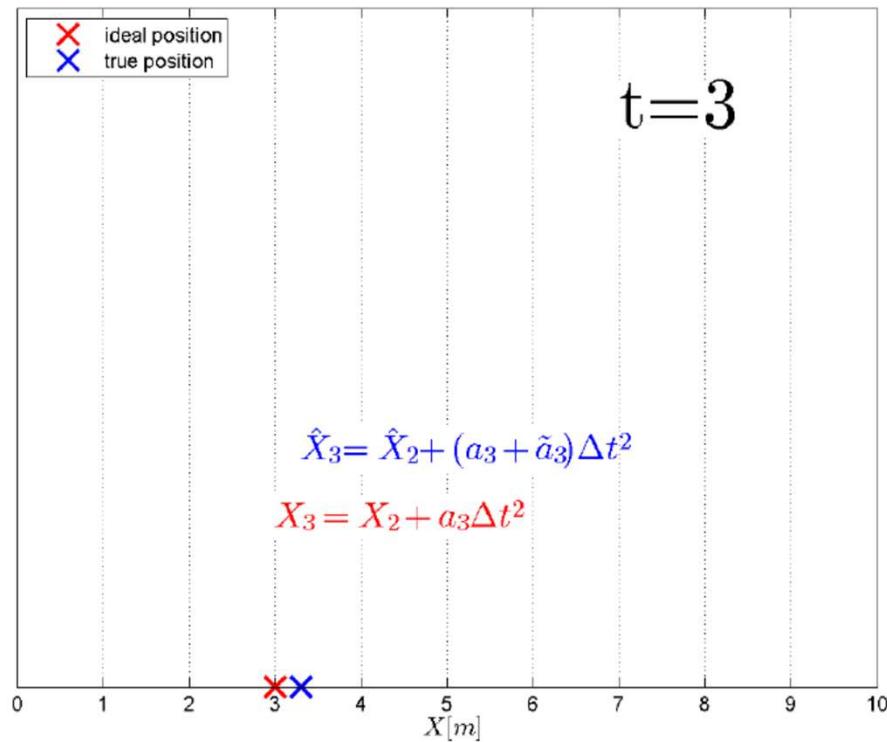
Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)



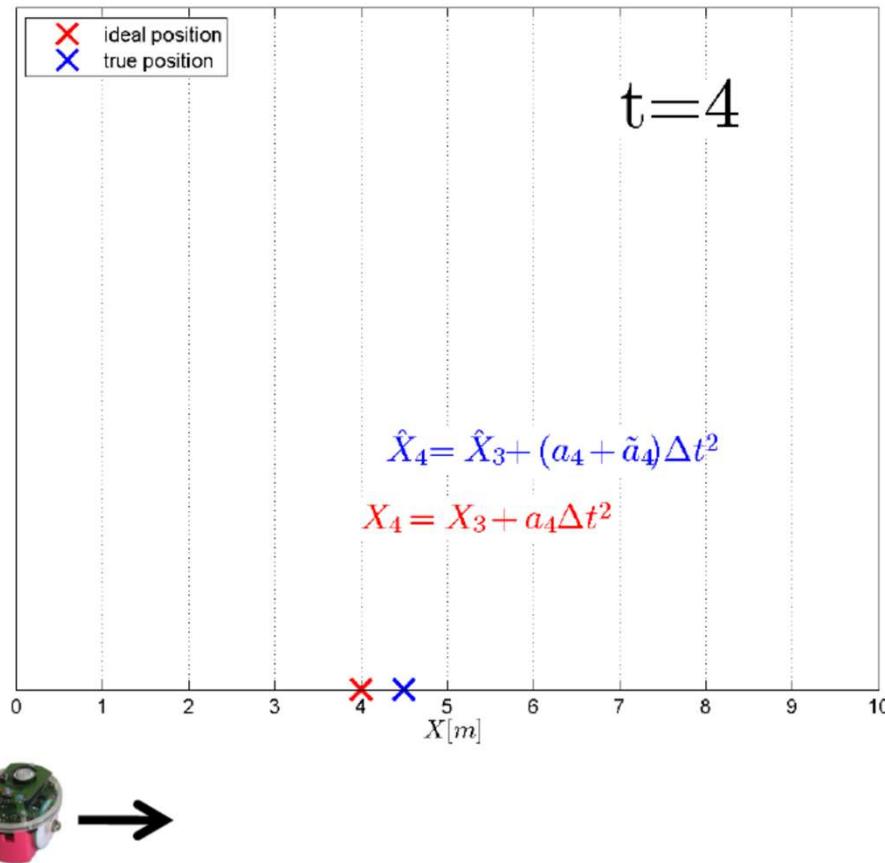
Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)



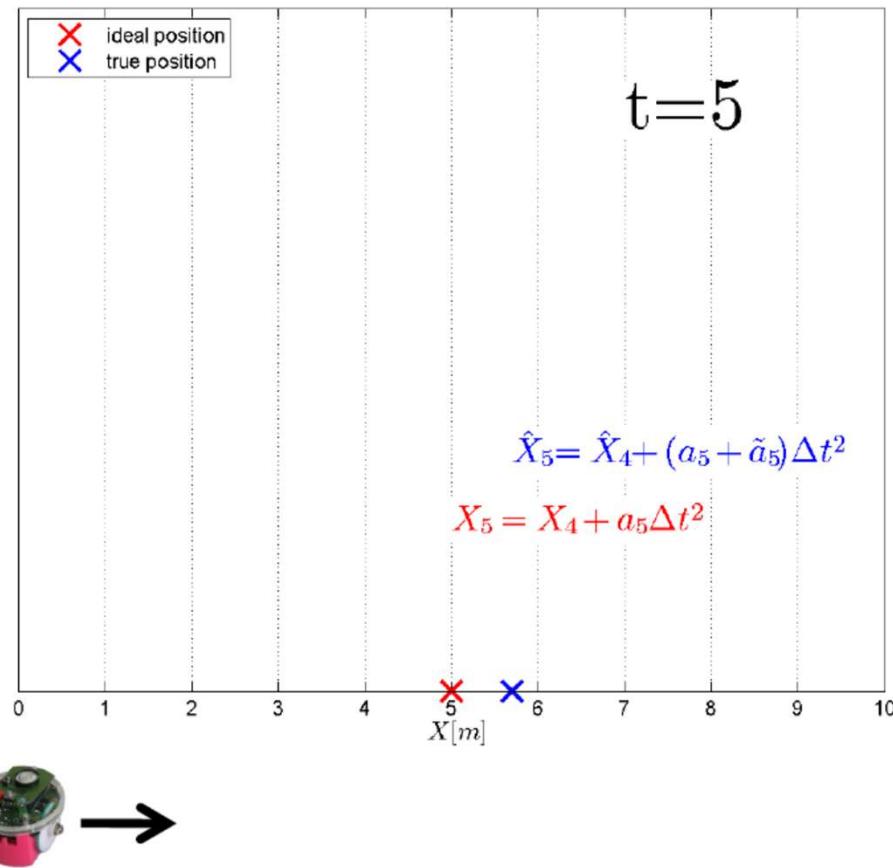
Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)



Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)

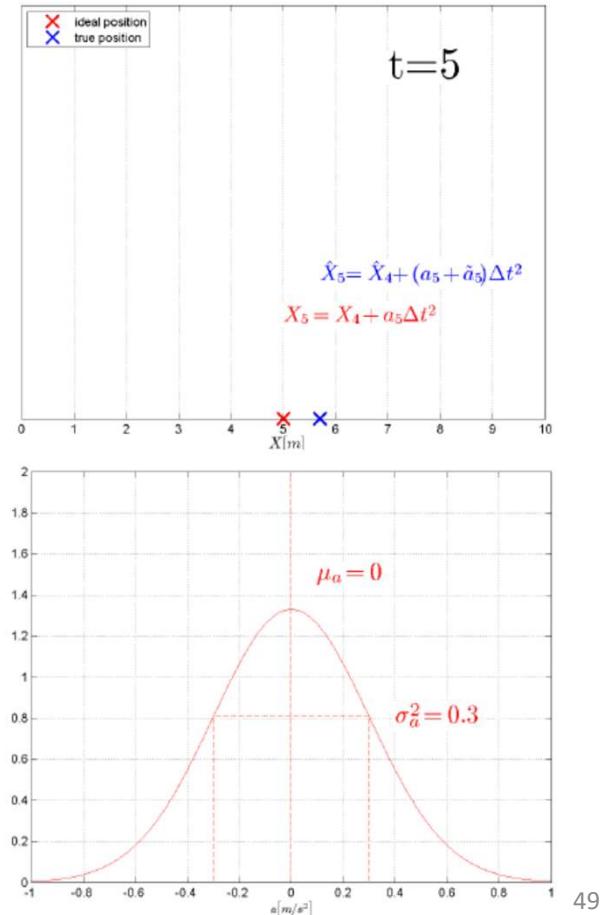


Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)

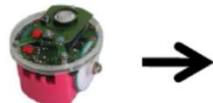
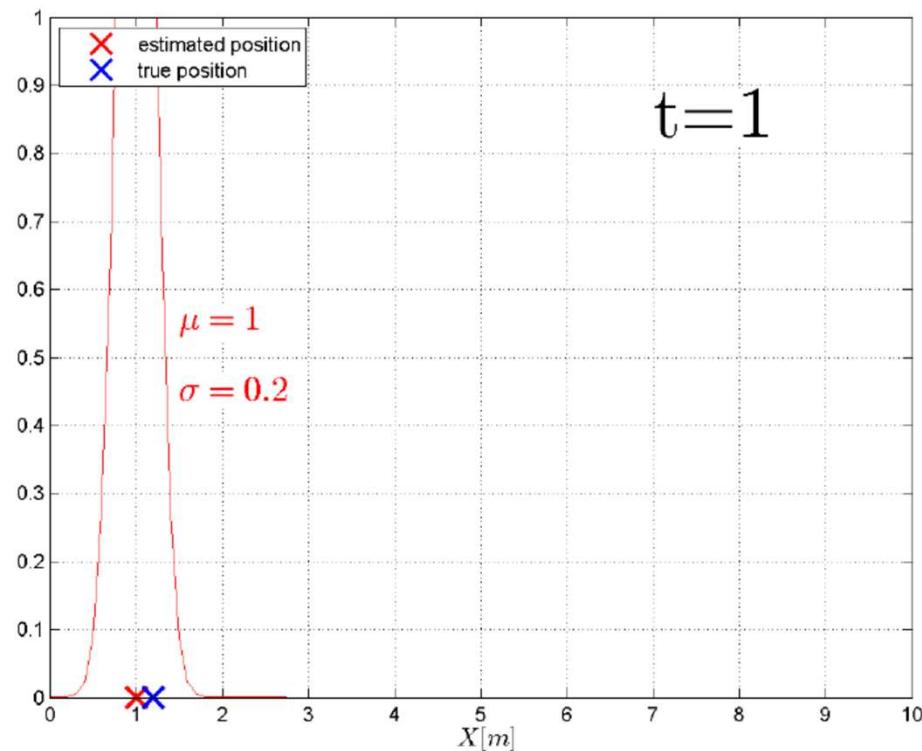


Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)

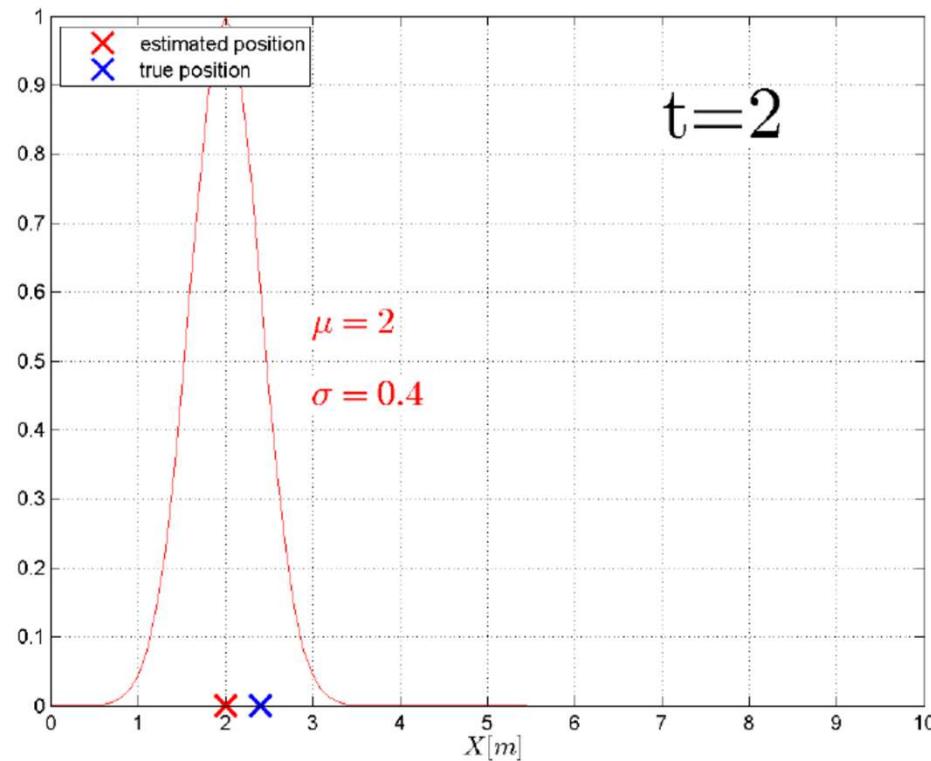
- Lỗi xảy ra
- Lỗi Odometry là lỗi tích lũy:
 - > tăng không có giới hạn
- Chúng ta cần biết về nó:
 - > Cần mô hình hóa lỗi odometry
 - > cần mô hình hóa lỗi cảm biến
- Kết hợp nhiều nguồn lỗi độc lập phân bố ngẫu nhiên -> Giả thiết Gaussian là hợp lý.
- Gia tốc là biến ngẫu nhiên A được rút ra từ phân bố Gauss. Vị trí X là biến ngẫu nhiên với phân bố Gauss.



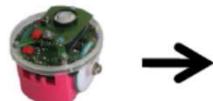
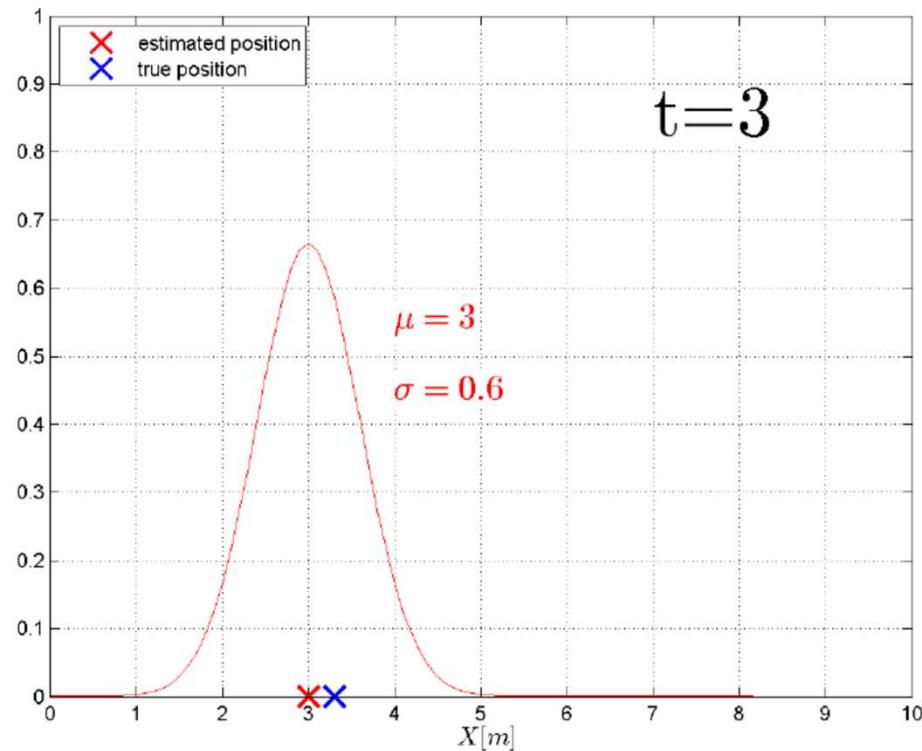
Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)



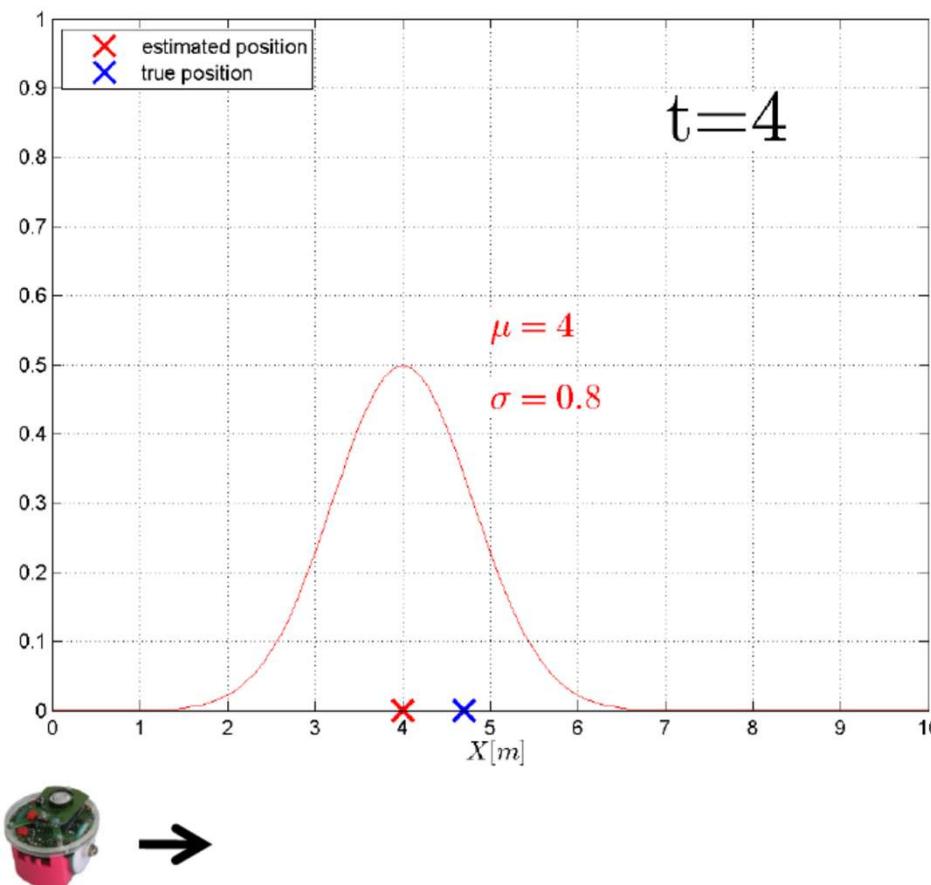
Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)



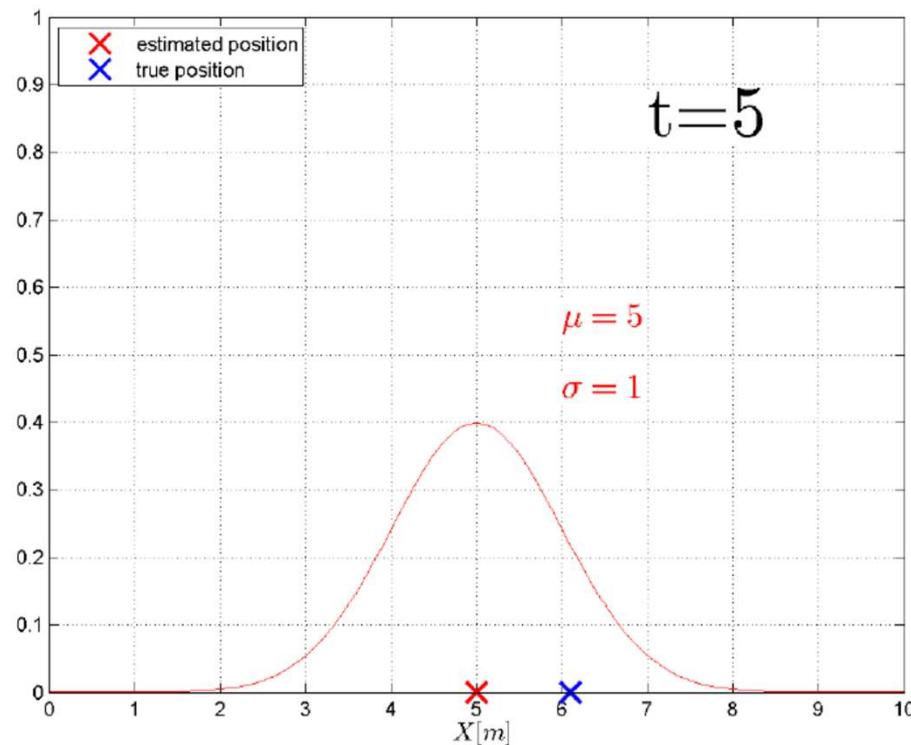
Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)



Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)



Ví dụ: Odometry dựa trên accelerometer (1D)

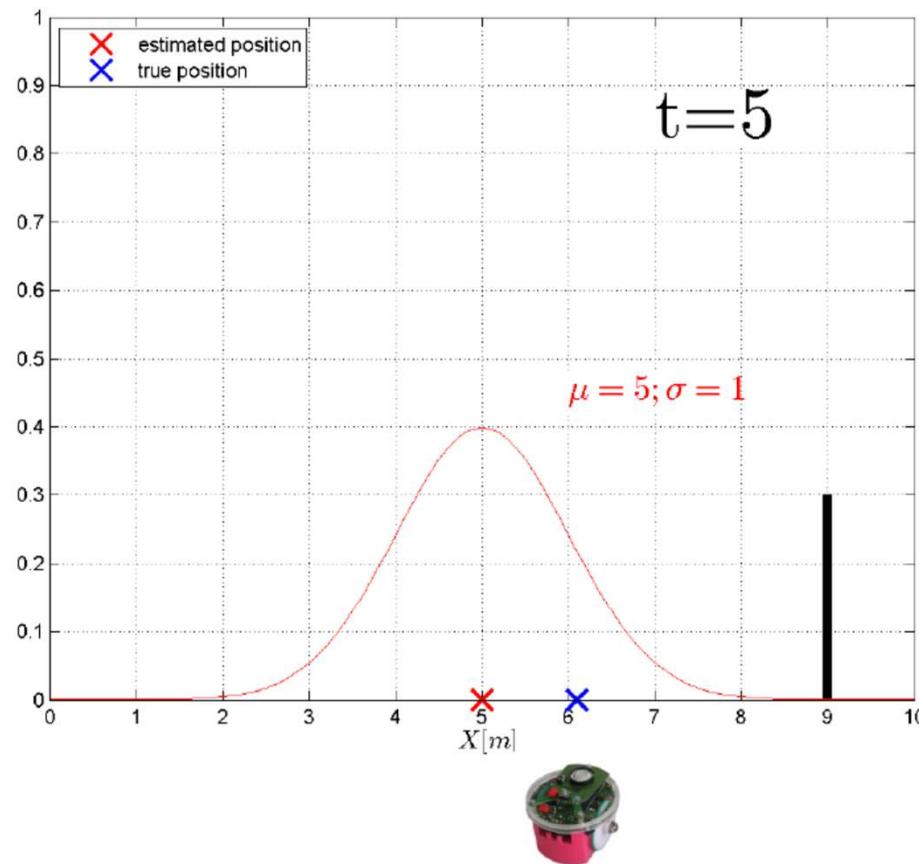


Giảm thiểu sự không chắc chắn trong định vị
odometry thông qua cảm biến ngoại

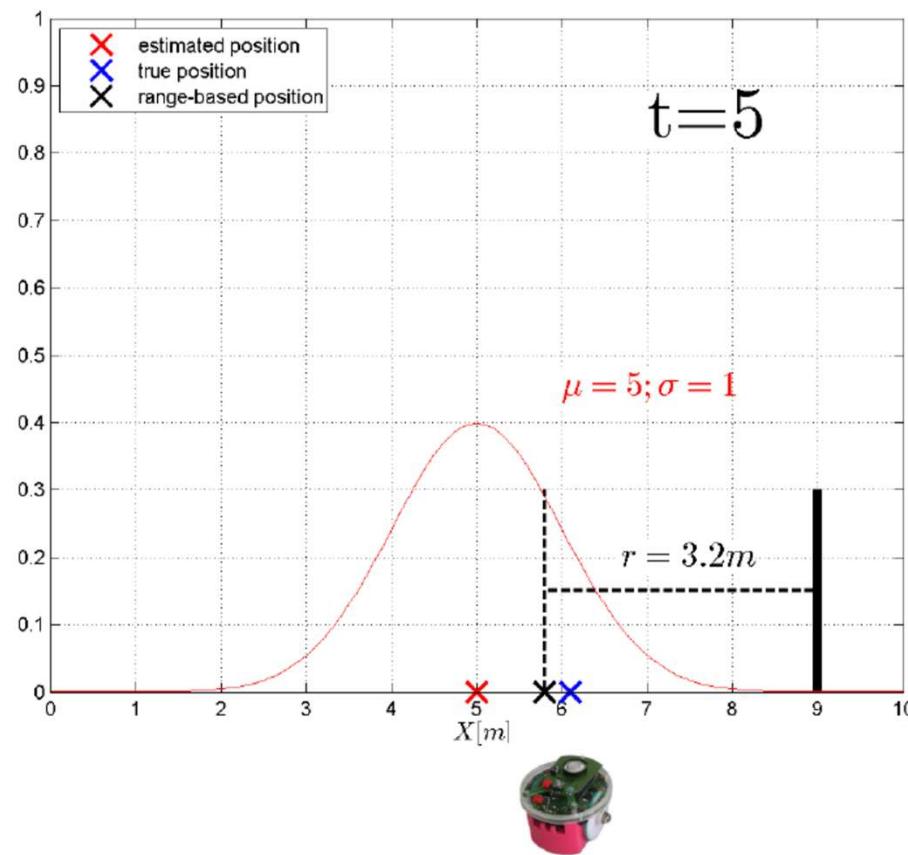
Các đối tượng địa lý

- Lỗi vị trí Odometry tăng không giới hạn
- Sử dụng phép đo tương đối với đối tượng địa lý như điểm mốc (landmark) để giảm độ không chắc chắn của vị trí.
- Các đối tượng địa lý:
 - ✓ Có thể nhận dạng duy nhất
 - ✓ Vị trí đã biết
 - ✓ Có thể thu được phép đo tương đối giữa robot và đối tượng địa lý (thường là góc hoặc khoảng cách).
- Ví dụ:
 - ✓ Cửa, tường, góc, ...
 - ✓ RFID, GPS

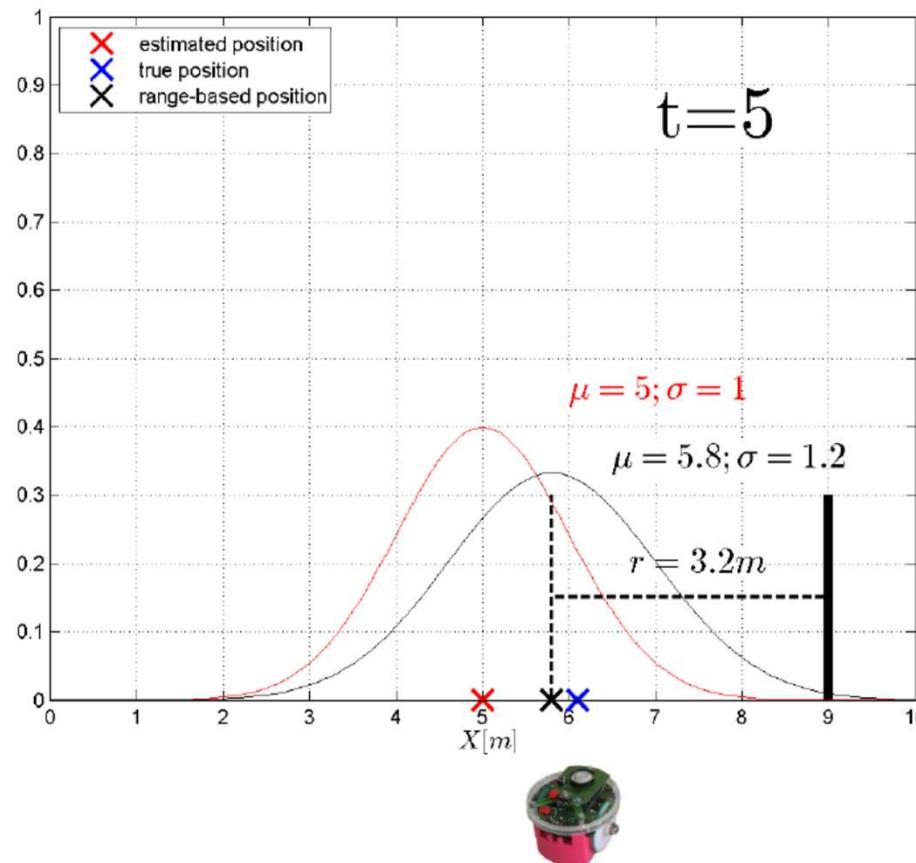
Định vị dựa trên đối tượng địa lý



Định vị dựa trên đối tượng địa lý

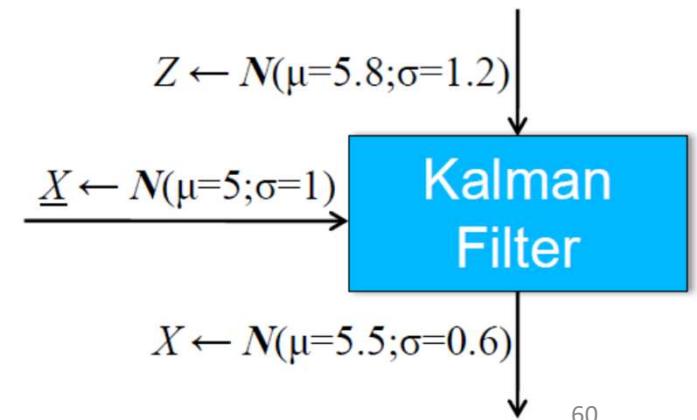
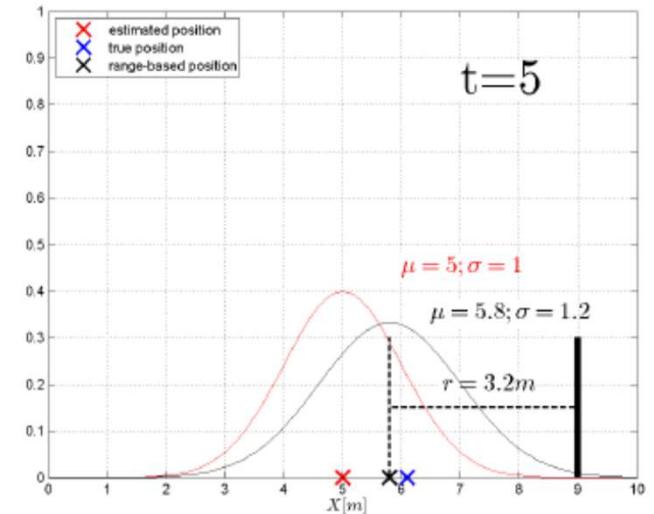


Định vị dựa trên đối tượng địa lý

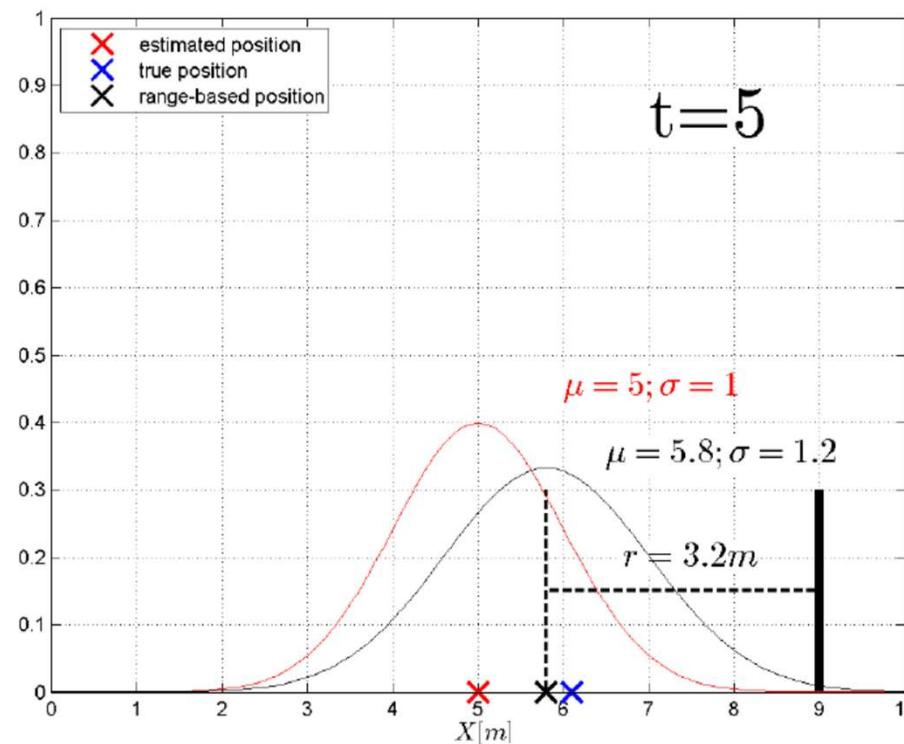


Kết hợp cảm biến

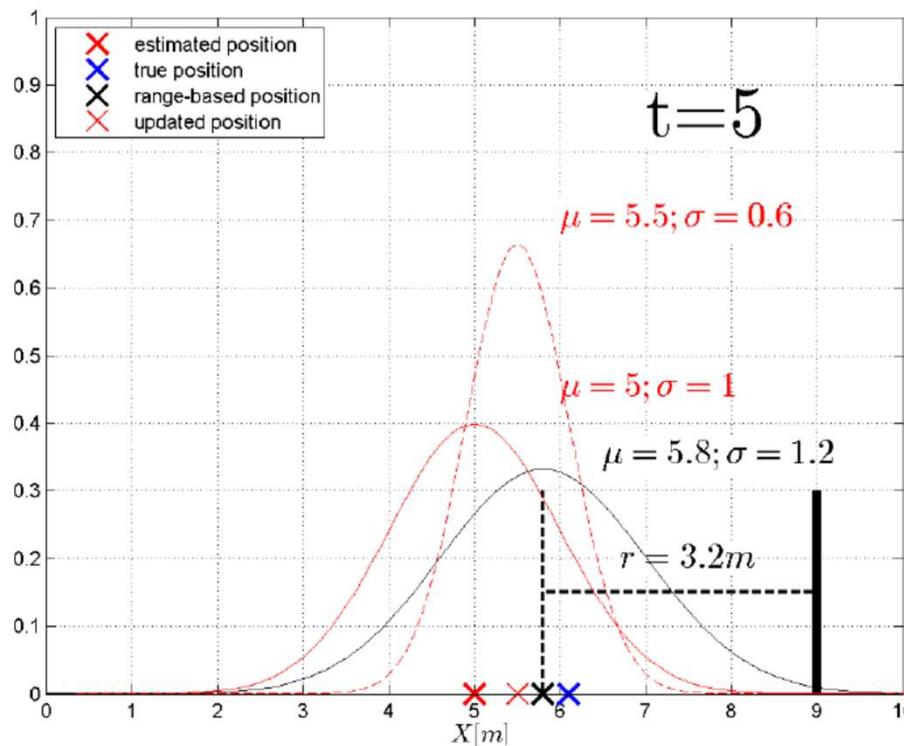
- Cho
 - ✓ Ước lượng vị trí $X \leftarrow N(\mu = 5, \sigma = 1)$
 - ✓ Ước lượng dài (k/c) $R \leftarrow N(\mu = 3.2, \sigma = 1.2)$
 - ✓ Biết vị trí mốc (9m)
- Có thể được chuyển thành:
 - ✓ Ước lượng dựa trên mô hình chuyển động $\underline{X} \leftarrow N(\mu = 5, \sigma = 1)$
 - ✓ Ước lượng dựa trên quan sát $Z \leftarrow N(\mu = 5.8, \sigma = 1.2)$
- Ước lượng tốt nhất là gì sau khi kết hợp quan sát
=> Kalman Filter
- Yêu cầu:
 - ✓ Phân bố nhiễu Gauss trắng cho tất cả các phép đo
 - ✓ Mô hình đo và chuyển động tuyến tính



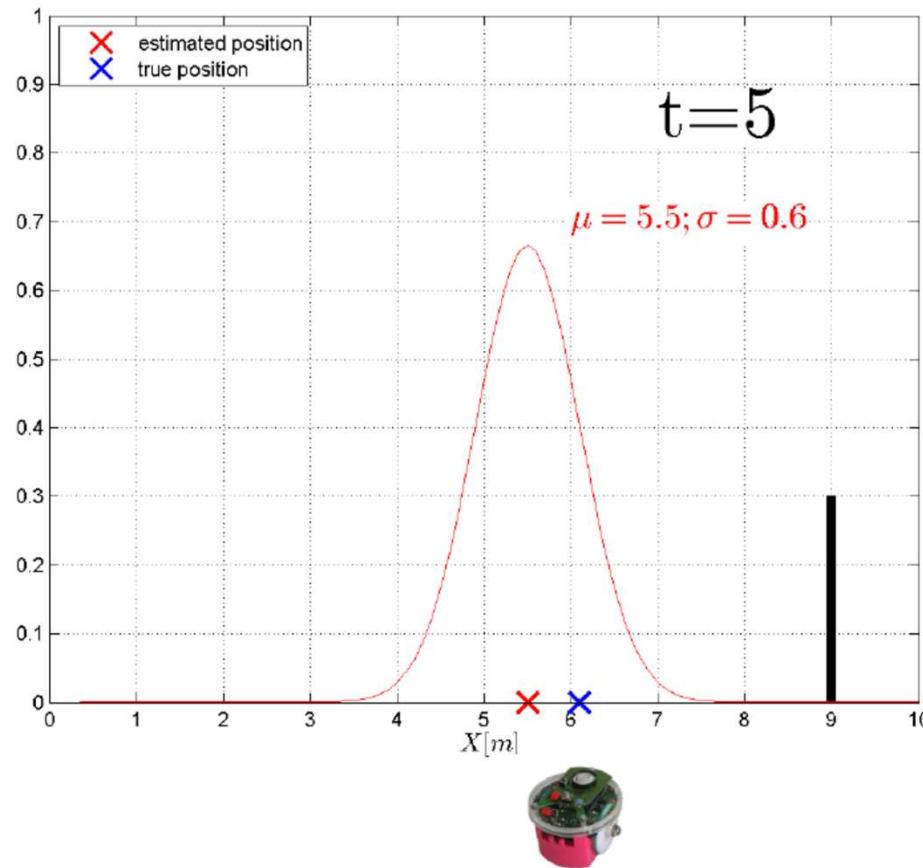
Định vị dựa trên đối tượng địa lý



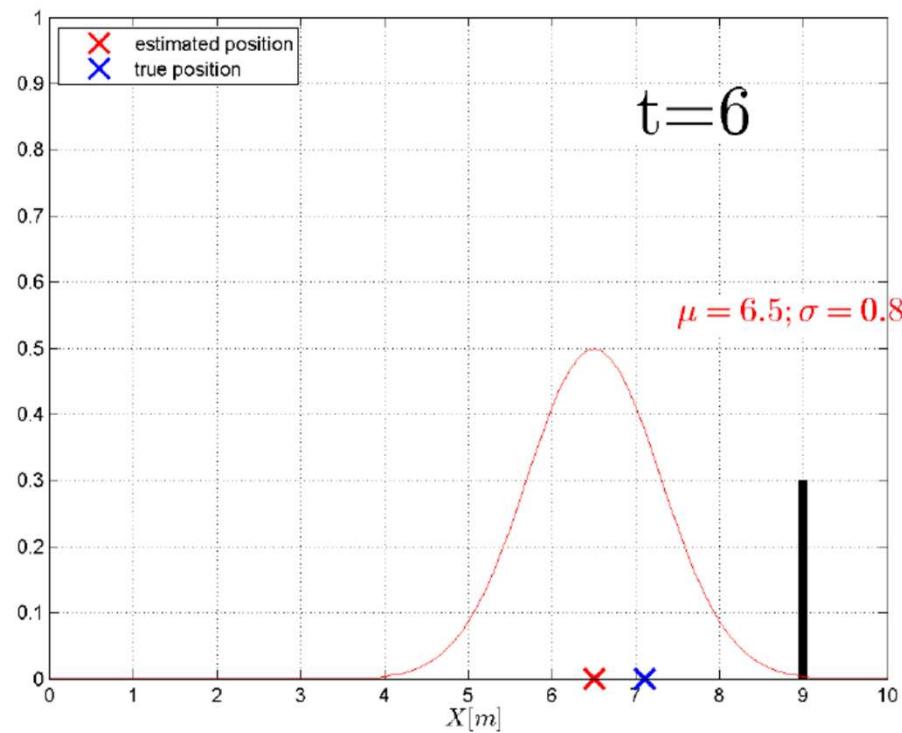
Định vị dựa trên đối tượng địa lý



Định vị dựa trên đối tượng địa lý



Định vị dựa trên đối tượng địa lý



Luyện tập

- BT1: Mô hình động học thuận robot hai bánh vi sai?
- BT2: Phương pháp định vị Odometry?
- BT3: Tại sao Odometry có sai số tích lũy?
- BT4: Phương pháp giảm sai số tích lũy của Odometry?
- BT5: Thực hành với Odometry