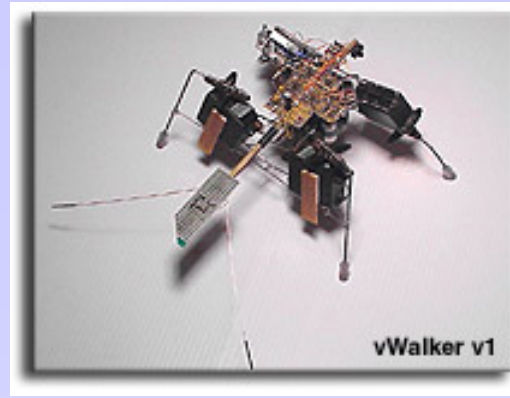




INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y ELECTRÓNICA

# Introducción a la Robótica

L. Enrique Sucar  
INAOE



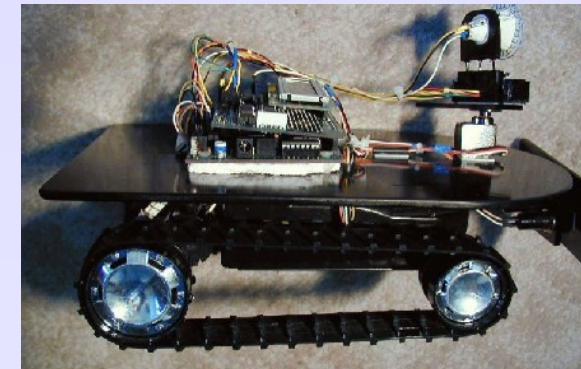
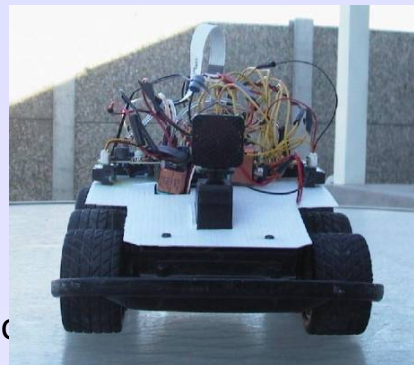
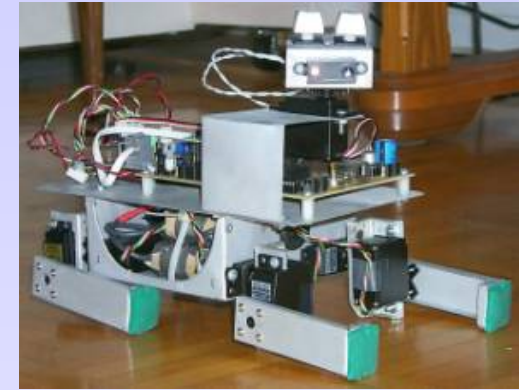
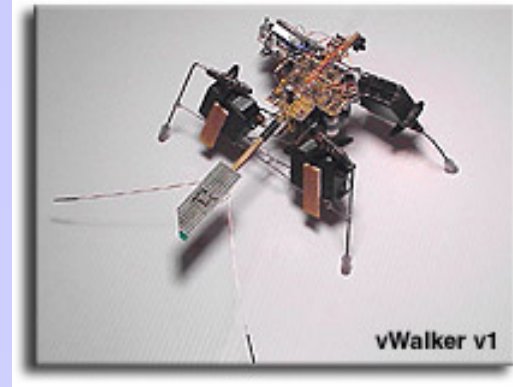
# Sesión 2: Locomoción

Introducción a la Robótica

L. Enrique Sucar

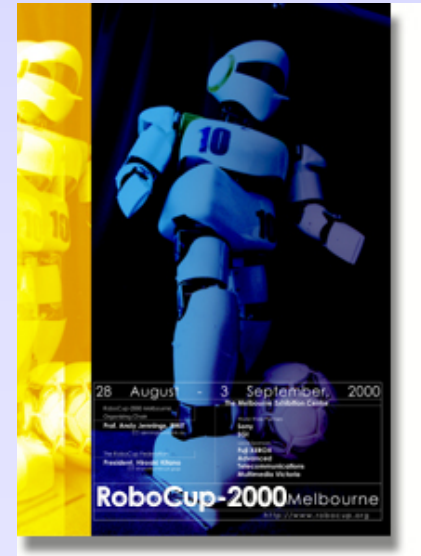
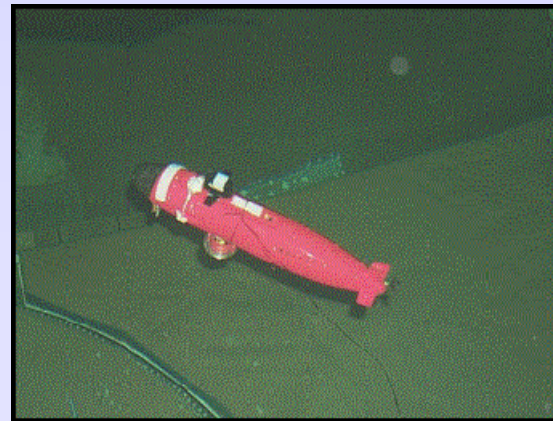
# Contenido

- Introducción
- Robots de Ruedas
  - Configuraciones
  - Cinemática
  - Forma
- Robots de Patas
- Espacio de configuraciones



# Tipos de Robots

- Terrestres
  - Robots de ruedas
  - Robots de patas
- Acuáticos
- Aéreos
- Espaciales



# Tipos de Locomoción (terrestres)

- Sistemas biológicos:
  - Arrastrarse (gusano)
  - Deslizarse (serpiente)
  - Correr (galgo)
  - Brincar (canguro)
  - Caminar (humano)
- Robots (en general):
  - Locomoción mediante ruedas
  - Locomoción mediante patas (6, 4, 2)

# Consideraciones

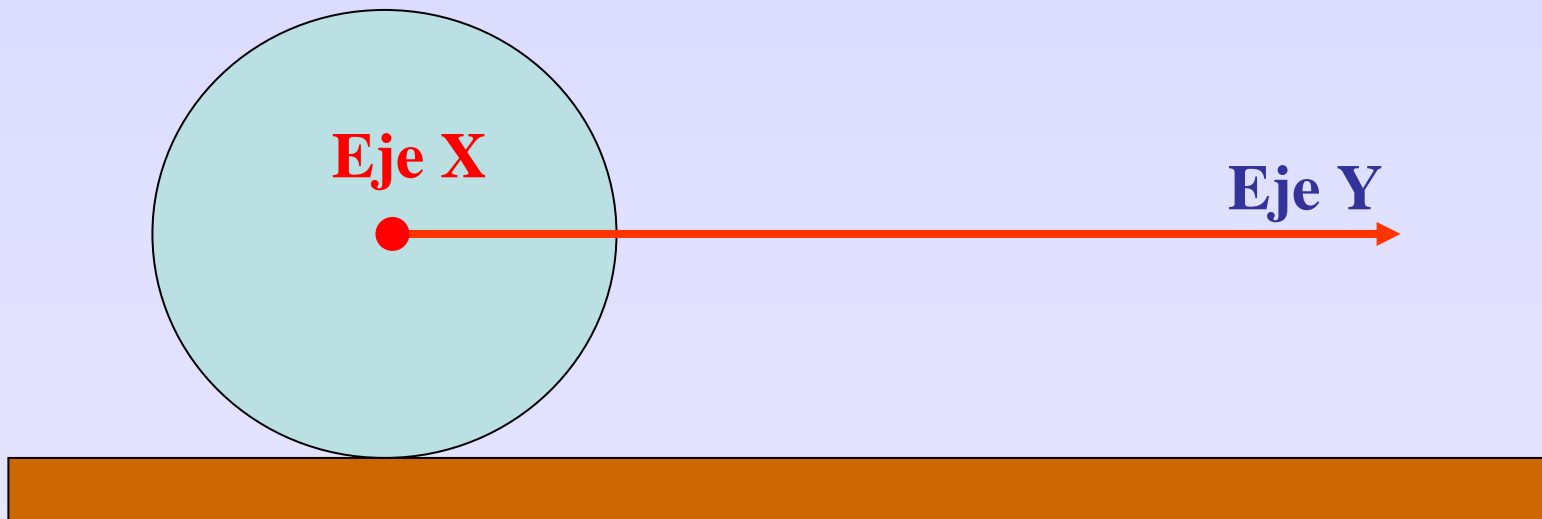
- **Estabilidad:** número de puntos de contacto, centro de gravedad, estática/dinámica, ...
- **Maniobrabilidad:** omnidireccional, restricciones, geometría, ...
- **Controlabilidad:** sencillo /complejo
- En general hay compromisos entre estos 3 aspectos

# Robots de Ruedas

- Son los más utilizados por varias razones:
  - Más simples y fáciles de construir
  - Más eficientes
  - Buena capacidad de “carga”
  - Más sencillo el control (estabilidad)
- Pero:
  - Limitados a terrenos relativamente planos
  - Tienen problemas si las diferencias en el terreno son mayores al radio de las ruedas (una alternativa son ruedas “grandes”)

# Ruedas

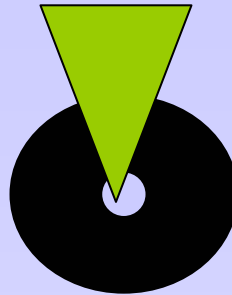
- Se mueven por el contacto superficial (o fricción) con la superficie
- Idealmente, se desplaza  $2\pi r$  por vuelta



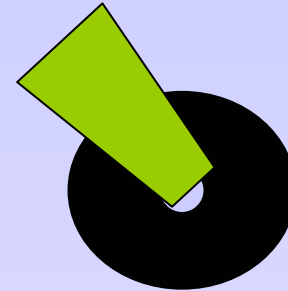


# Tipos de ruedas

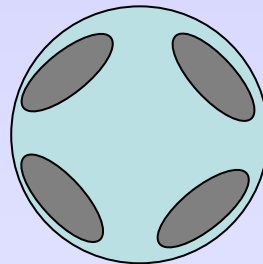
- Estándar



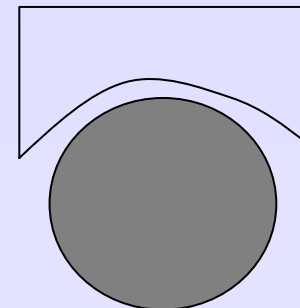
- Caster



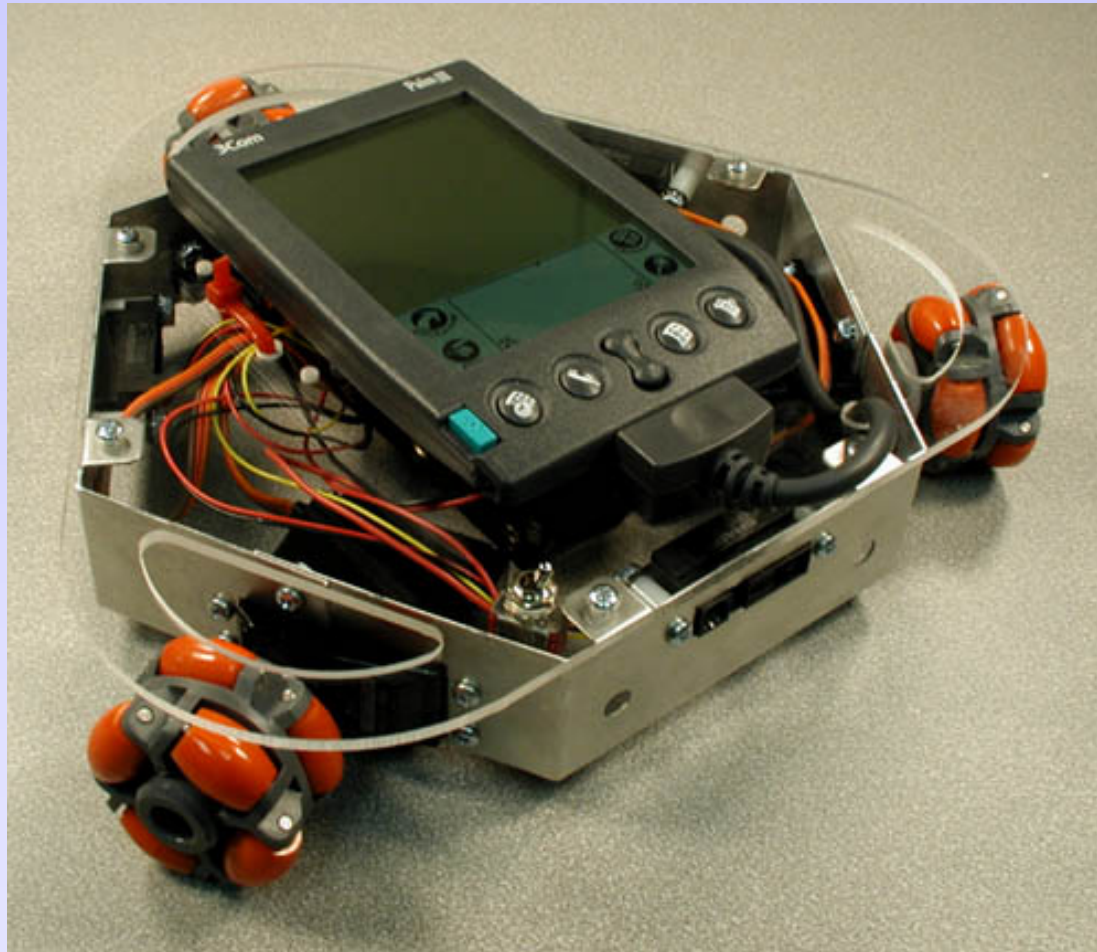
- Sueca



- Esférica

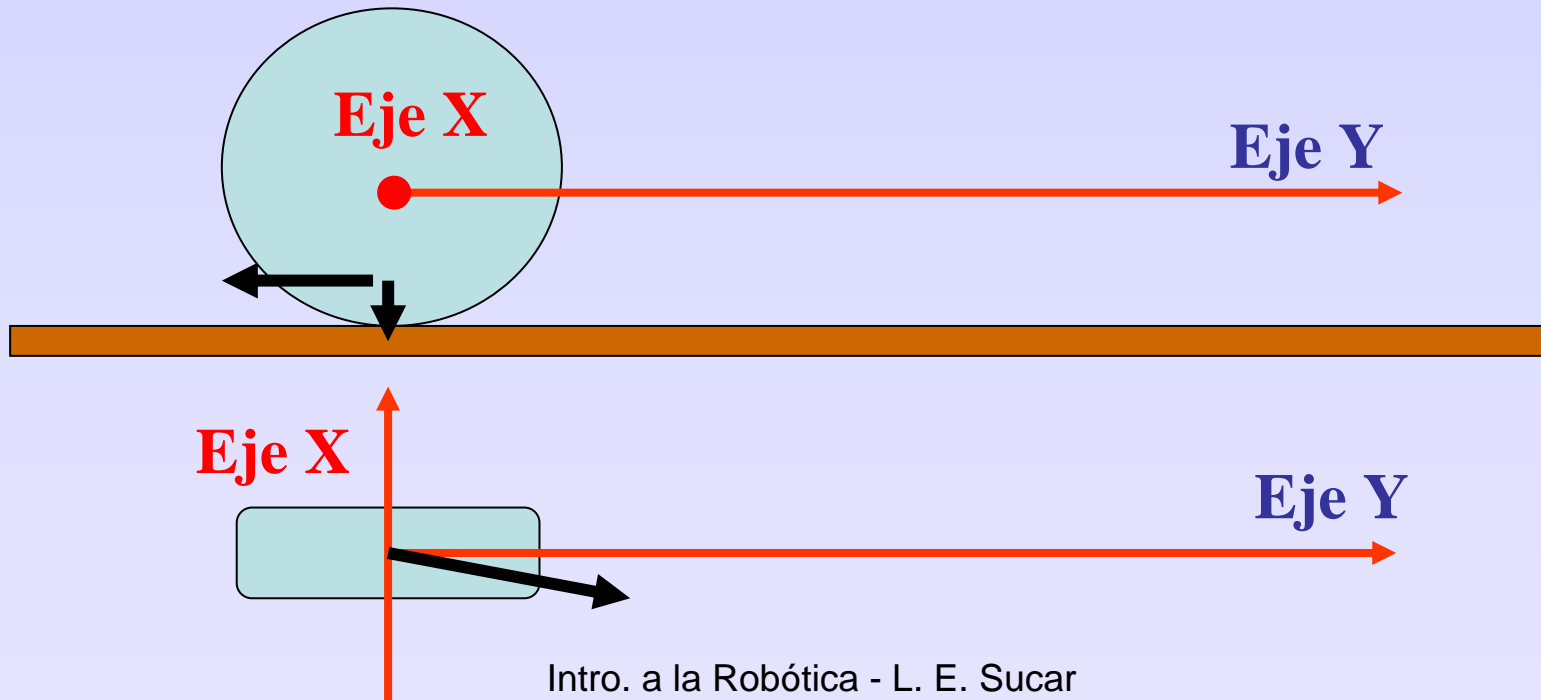


# Ruedas suecas (robot PPRK)



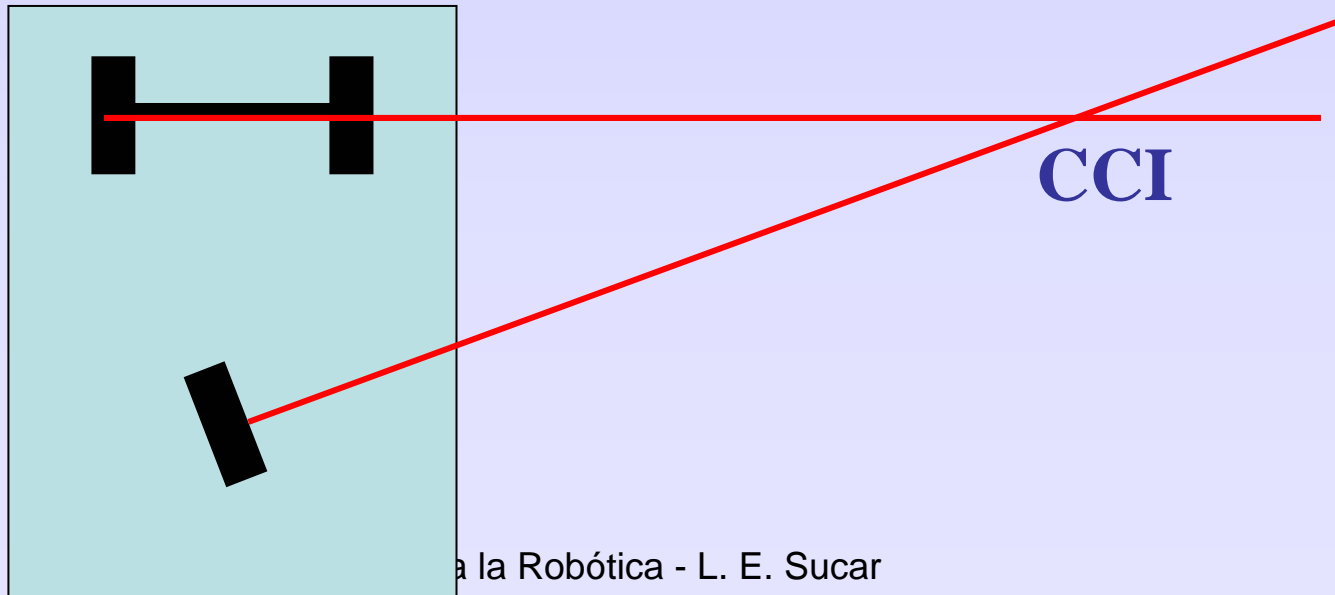
# Errores

- El desplazamiento “ideal” se ve afectado por varios factores:
  - Deslizamiento lateral (*lateral slip*)
  - Patinaje (*slipping / sliding*)
  - Compactación del terreno



# Giro

- Un un vehículo con varias ruedas, existe un punto alrededor del cual cada rueda sigue una trayectoria circular
- *CCI* – centro de curvatura instantáneo
- En el caso de una trayectoria recta, el ICC está en infinito



# Configuraciones de ruedas

- 2 ruedas:
  - Bicicleta
  - Diferencial
- 3 ruedas:
  - Diferencial con punto de apoyo (caster)
  - Triciclo con tracción trasera
  - Triciclo con tracción delantera
  - Síncromo

# Configuraciones de ruedas

- 4 ruedas:
  - Carro con tracción trasera
  - Carro con tracción delantera
  - Diferencial con 2 ruedas de soporte
  - 4 ruedas omidireccionales
  - 4 ruedas tipo caster
- 6 ruedas:
  - 4 omnidireccionales, 2 de tracción al centro

# Configuraciones comunes:

- Diferencial (3, 4)
- Síncrono (3)
- Tipo triciclo (3)
- Tipo carro (4)

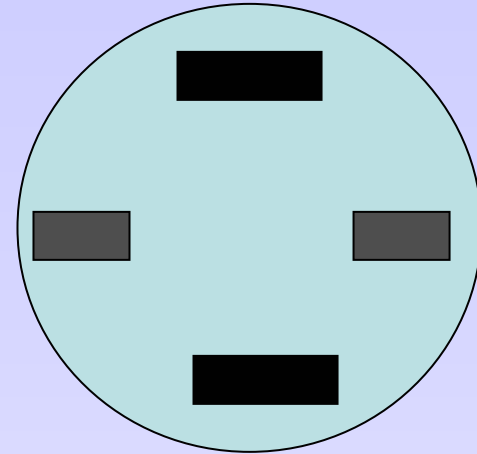
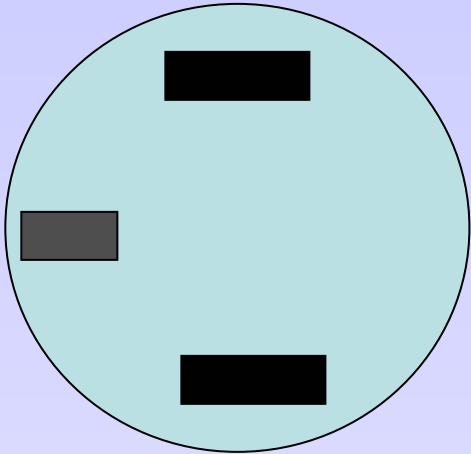


# Diferencial

- Uno de los esquemas más sencillos
- Consiste de dos ruedas en un eje común, donde cada rueda se controla independientemente
- Movimientos:
  - En forma recta
  - En arco
  - Vuelta sobre su propio eje
- Utiliza una o dos ruedas adicionales (*caster*) para mantener el balance



# Diferencial



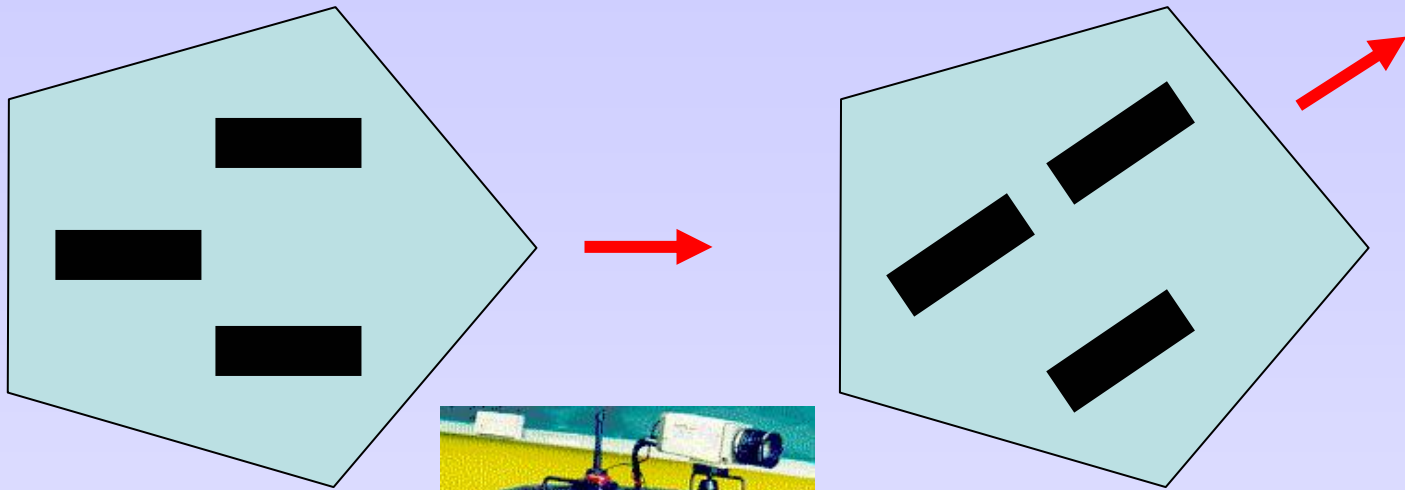
# Diferencial

- 3 ruedas: **triángulo**
  - Problema de estabilidad
- 4 ruedas: **diamante**
  - Pérdida de contacto de las ruedas de tracción (requiere sistema de suspensión)
- Movimiento recto:
  - Requiere asegurarse de que las ruedas vayan a la misma velocidad (control dinámico con retroalimentación –*encoders*)

# Síncrono

- Todas las ruedas (usualmente 3) se mueven en forma síncrona para dar vuelta y avanzar
- Las 3 ruedas están ligadas de forma que siempre apuntan en la misma dirección
- Para dar vuelta giran las ruedas sobre el eje vertical, por lo que la dirección del chasis se mantiene – se requiere de un mecanismo adicional para mantener el frente del chasis en la dirección de las ruedas (torreta)

# Síncrono



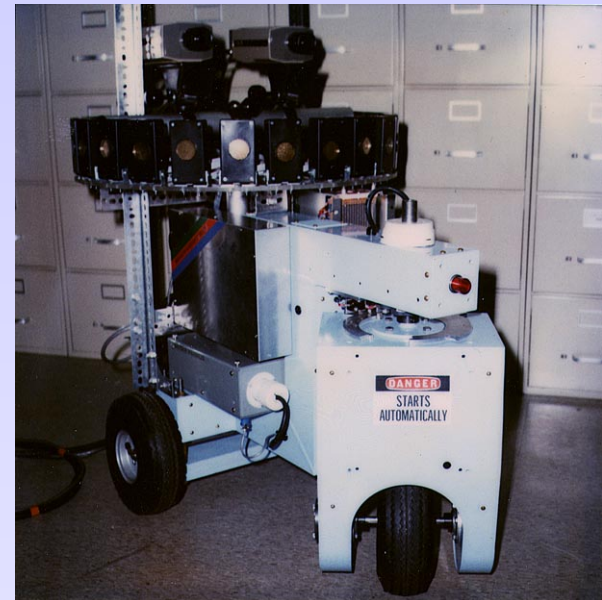
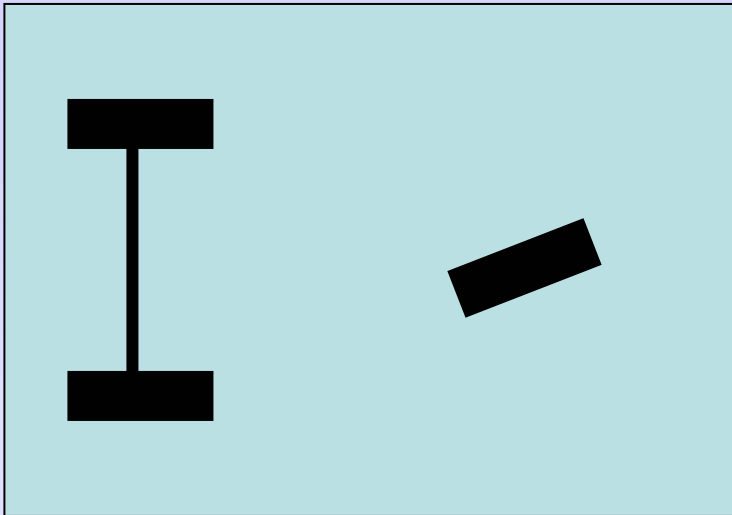
# Síncrono

- Se evitan los problemas de inestabilidad y de pérdida de contacto del diferencial
- Mayor complejidad mecánica

# Triciclo

- Dos ruedas fijas que le dan tracción
- Una rueda para dirección que normalmente no tiene tracción
- Buena estabilidad y simplicidad mecánica
- Facilidad para ir recto
- Cinemática más compleja (más adelante)

# Triciclo



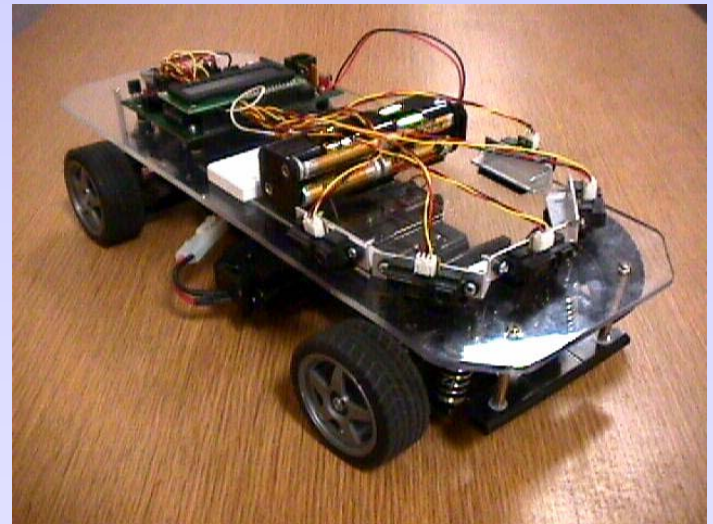
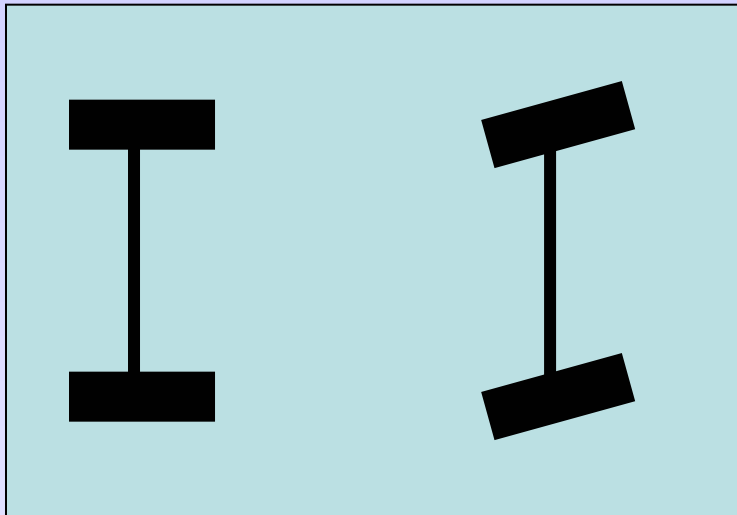
Robot Neptuno

# Carro

- Similar al triciclo
- Dos ruedas de tracción y dos ruedas para dirección
- Mayor complejidad mecánica que el triciclo por acoplamiento entre las 2 ruedas de dirección
- Buena estabilidad y facilidad de ir derecho
- Complejidad cinemática



# Carro



# Movimiento

- **Dinámica:** estudio del movimiento considerando las fuerzas (energía y velocidad)
- **Cinemática:** estudio del movimiento sin considerar las fuerzas involucradas – relaciones geométricas

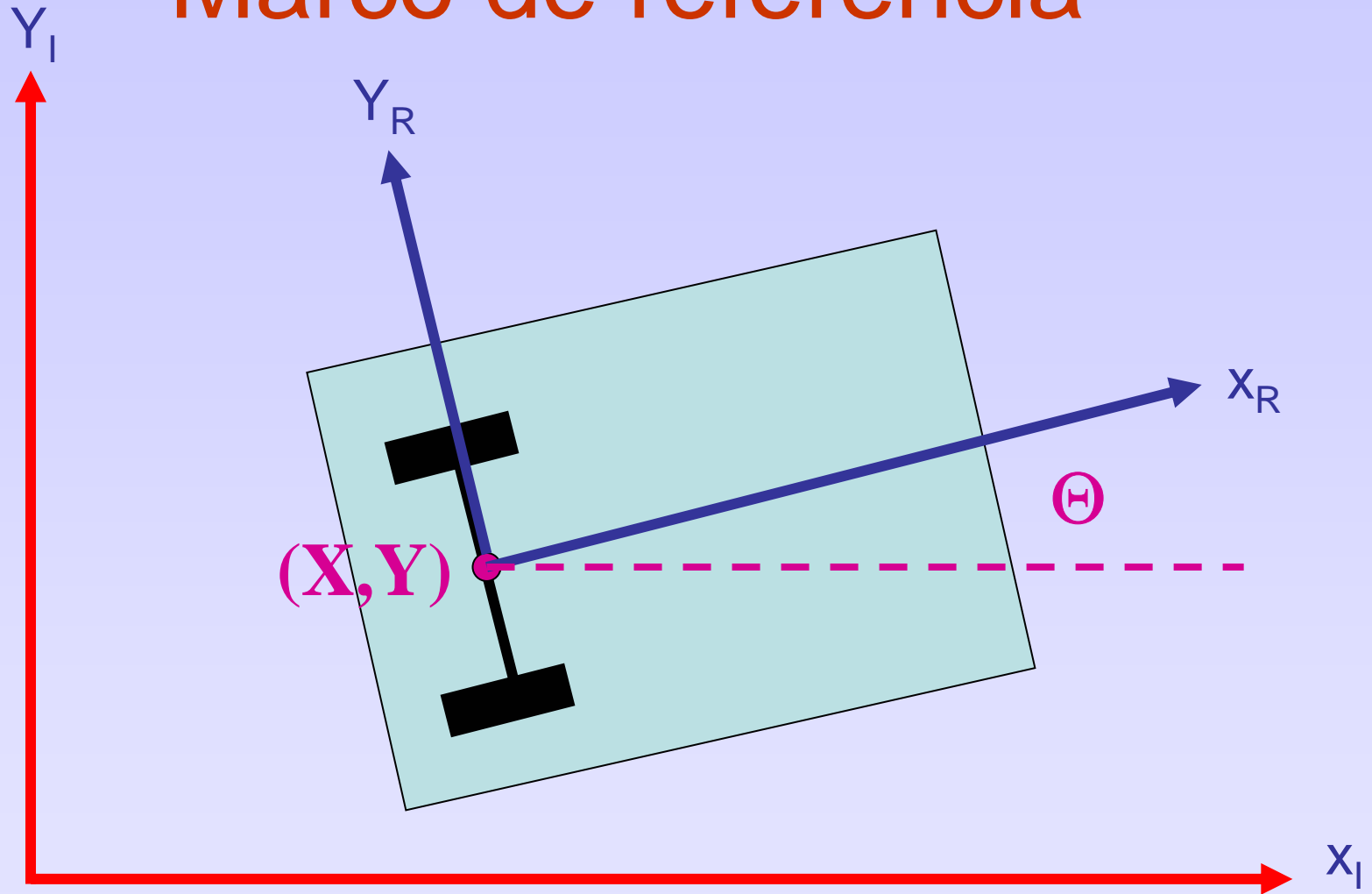
# Cinemática

- La cinemática se refiere a como se mueve el robot
  - **Directa**: dada la posición inicial y los movimientos realizados, cuál es la posición final del robot
  - **Inversa**: dada la posición inicial y final deseadas, cuál es la serie de movimientos que debe realizar el robot

# Cinemática

- Diferentes tipos de ruedas (tracción y dirección) tienen diferentes propiedades cinemáticas
- Un robot móvil normalmente tiene 3 grados de libertad respecto a una referencia: posición en el plano ( $X, Y$ ) y orientación ( $\Theta$ )
- Idealmente, independientemente de donde inicie, el robot debe poder moverse a cualquier posición y orientación ( $X, Y, \Theta$ )

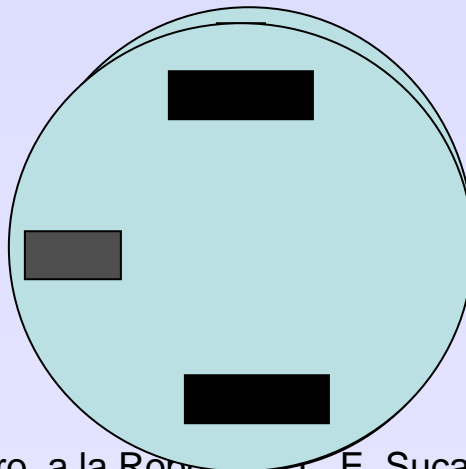
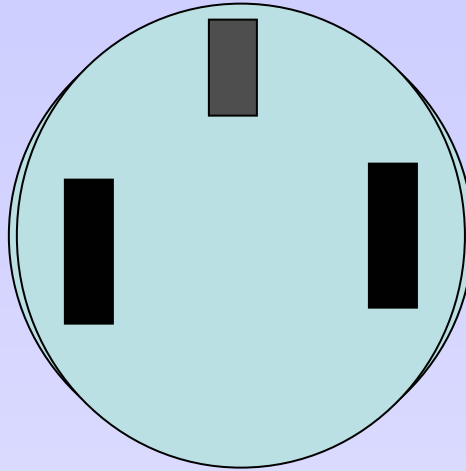
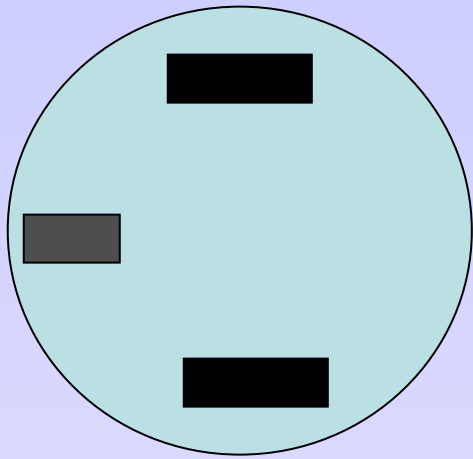
# Marco de referencia



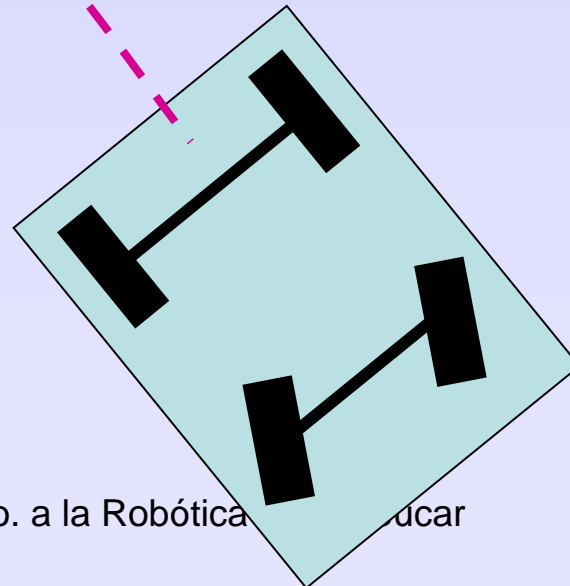
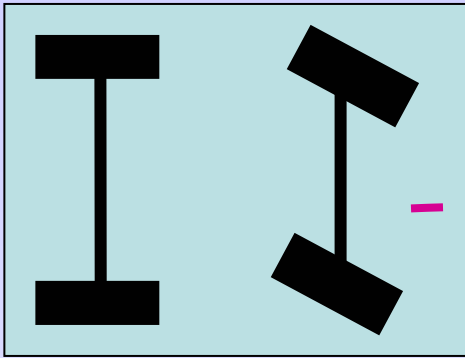
# Restricciones cinemáticas

- **Holonómicas**: los diferentes grados de libertad están desacoplados
  - Robots diferenciales y síncronos: se puede desacoplar la posición de orientación (rotando sobre su eje)
- **No-holonómicas**: los grados de libertad están acoplados
  - Triciclos y carros: para dar vuelta debe moverse hacia el frente o hacia atrás – es más complejo llegar a la posición final deseada

# Ejemplo - diferencial

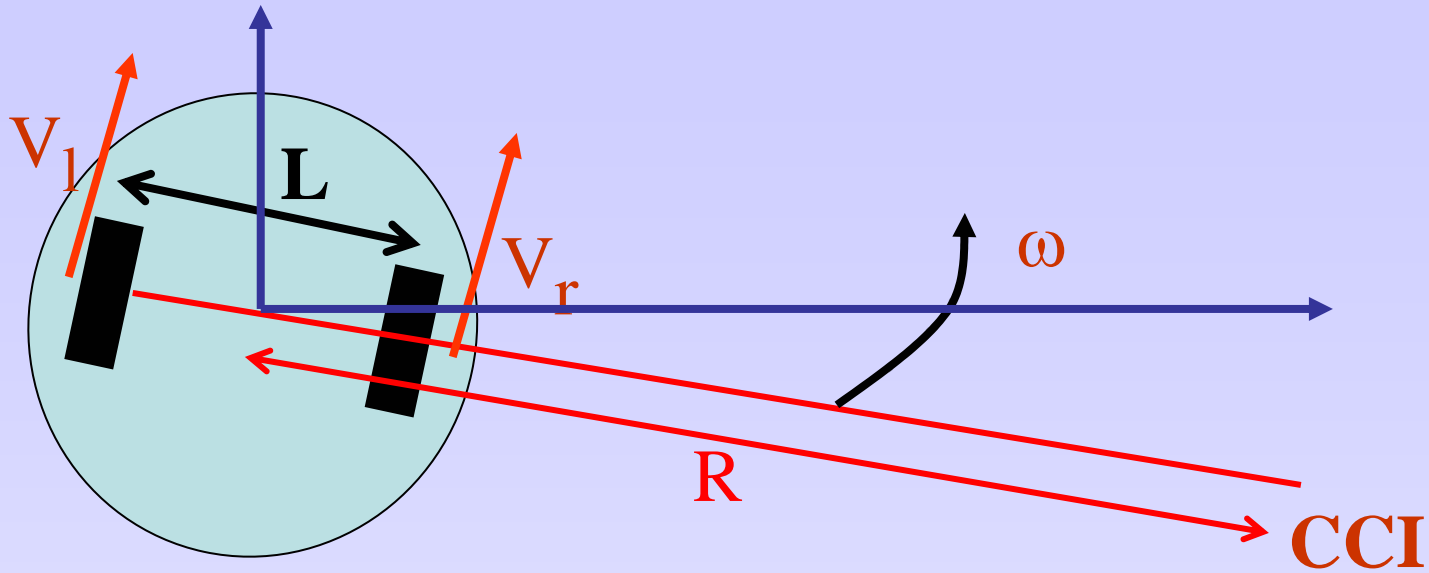


# Ejemplo - carro





# Cinemática - Diferencial



$$\omega (R - L/2) = V_r$$

$$\omega (R + L/2) = V_l$$

$$R = L/2 [ (V_r + V_l) / (V_r - V_l) ]$$

$$\omega = (V_r - V_l) / L$$

Casos especiales:

$$- V_r = V_l$$

$$V_r = V_l$$

# Cinemática directa

- Estimar la nueva posición del robot dada su posición inicial y parámetros de control
- Dada la posición en  $t$ , la posición en  $t+dt$ :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(w dt) & -\text{sen}(w dt) & 0 \\ \text{sen}(w dt) & \cos(w dt) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x-ICC_x \\ y-ICC_y \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} ICC_x \\ ICC_y \\ w dt \end{pmatrix}$$

- Integrando se puede estimar la posición del robot en un tiempo  $t$

# Cinemática inversa

- Determinar los parámetros de control para llevar al robot a la posición deseada
- Diferencial (para  $V_l$ ,  $V_r$  cts. y diferentes):  
$$x(t) = L/2 \left( \frac{V_r + V_l}{V_r - V_l} \right) \text{sen} \left( \frac{t(V_r - V_l)}{L} \right)$$
$$y(t) = L/2 \left( \frac{V_r + V_l}{V_r - V_l} \right) \text{cos} \left( \frac{t(V_r - V_l)}{L} \right) + L/2 \frac{V_r + V_l}{V_r - V_l}$$
$$\theta(t) = t/2 (V_r - V_l)$$
- Dada una posición meta  $(x,y)(t)$ , se puede resolver para  $V_r$  y  $V_l$

# Casos Especiales

- $V_r = V_l = v$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + v \cos(\omega dt) \\ y + v \sin(\omega dt) \\ \theta \end{pmatrix}$$

- $V_r = -V_l = v$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta + 2 v dt / L \end{pmatrix}$$

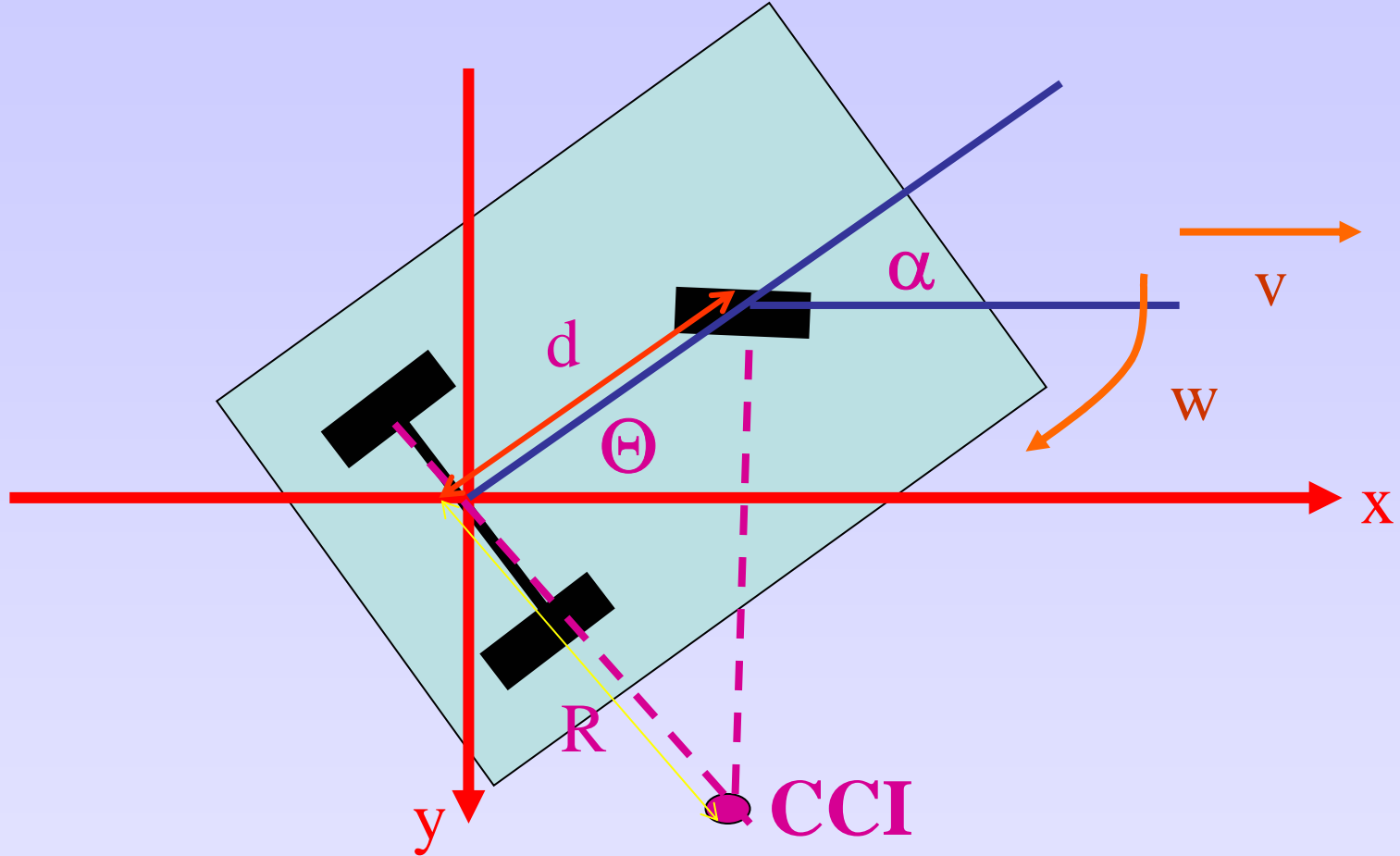
# Solución

- Una forma sencilla de solución en base a las ecuaciones anteriores es:
  1. Rotar al robot en su lugar para que se oriente a la posición  $x,y$  deseada
  2. Moverse en línea recta a dicha posición
  3. Rotar al robot en su lugar para tener la orientación deseada

# Otras configuraciones

- En forma similar se pueden derivar las ecuaciones cinemáticas para los robots síncronos, triciclos y carros
- El síncrono es muy similar al diferencial
- Por otro lado las ecuaciones del triciclo y el carro son similares, veremos las del triciclo

# Cinemática - Triciclo



$$R = d \tan (\pi/2 - \alpha)$$

$$w = v / (d^2 + R^2)^{1/2}$$

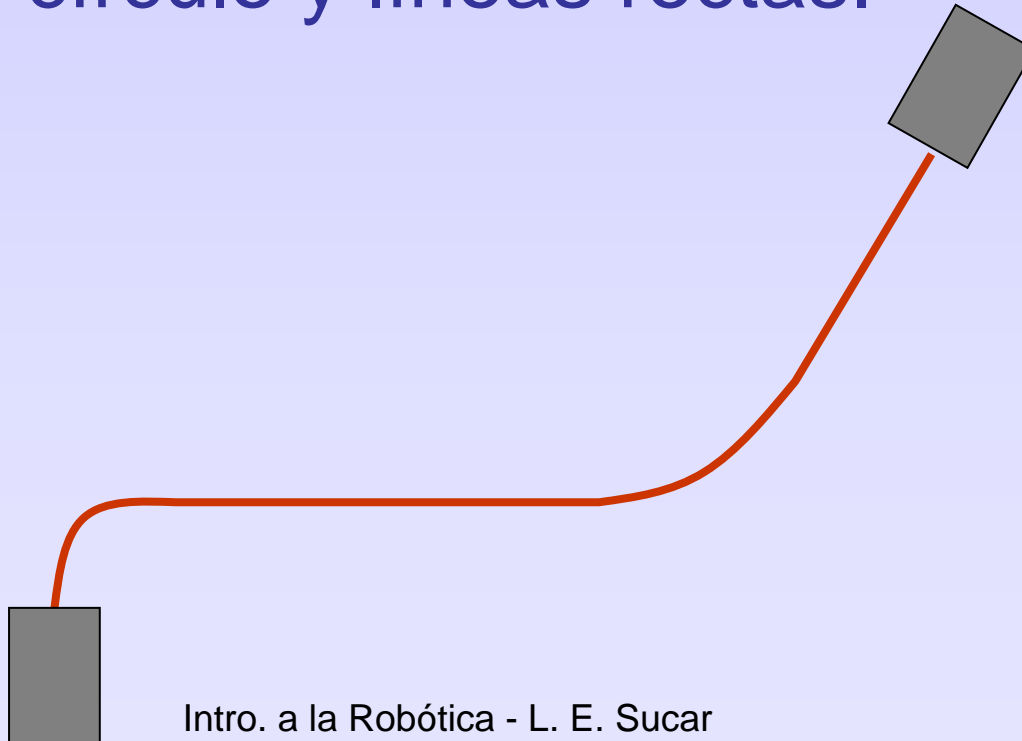
# Triciclo

- Cinemática directa:
  - A partir de las relaciones anteriores se puede obtener en forma análoga a la del diferencial
- Cinemática inversa:
  - El caso general es muy complejo
  - Se pueden obtener casos especiales como cuando el triciclo camina de frente ( $\alpha=0$ )



# Solución

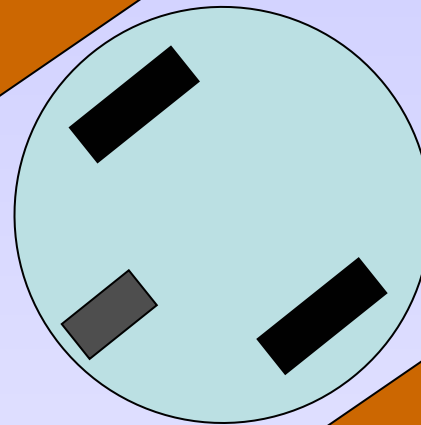
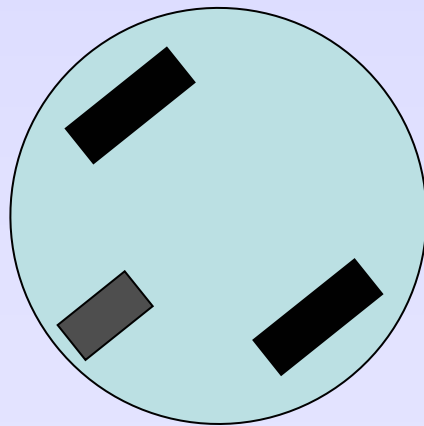
- En forma análoga a la del diferencial, se puede definir una trayectoria en base a arcos de círculo y líneas rectas.



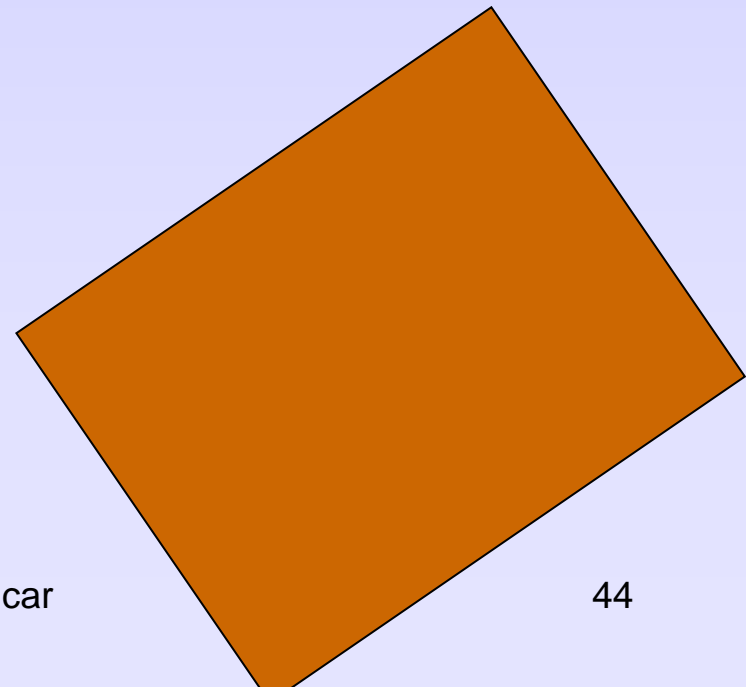
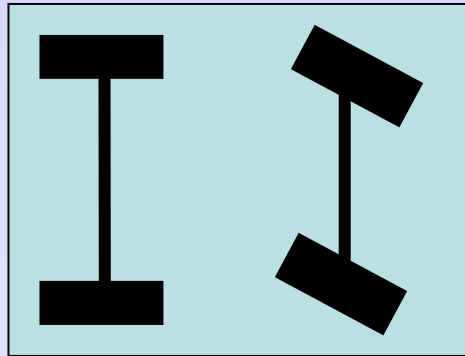
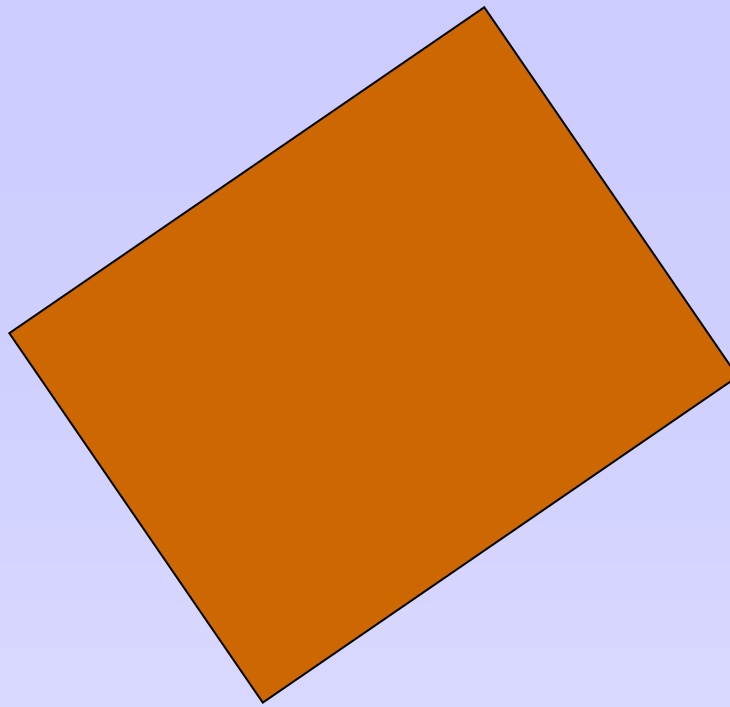
# Forma

- La forma del robot tiene un fuerte impacto en su facilidad de navegación, en particular con obstáculos y pasillos angostos
- **Robot cilíndricos:**
  - Es más fácil navegar por la simetría del robot (*espacio de configuraciones se reduce a 2D*)
- **Robots cuadrados:**
  - Es más complejo navegar, depende de la orientación del robot (*espacio de configuraciones en 3D*)

# Forma - cilíndrico



# Forma -cuadrado

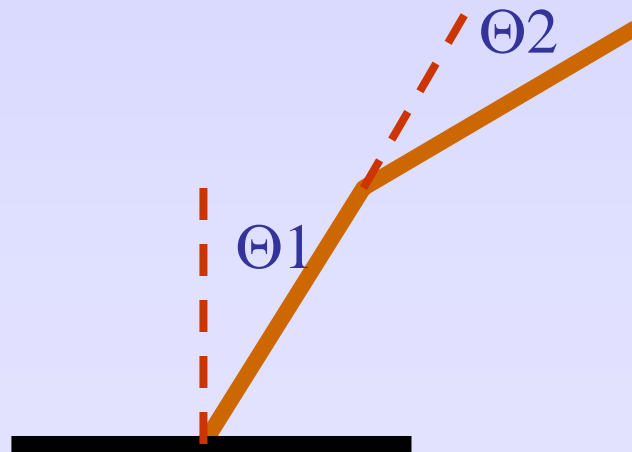


# Espacio de configuraciones

- Grados de libertad:
  - Se refiere a los posibles movimientos de un robot (**X, Y, Z y rotaciones**)
  - Para manipuladores, cada articulación provee un grado de libertad (se requieren 6 para ubicar un manipulador en cualquier posición y orientación)
- Robots móviles:
  - Movimiento en el plano **X-Y** y rotación

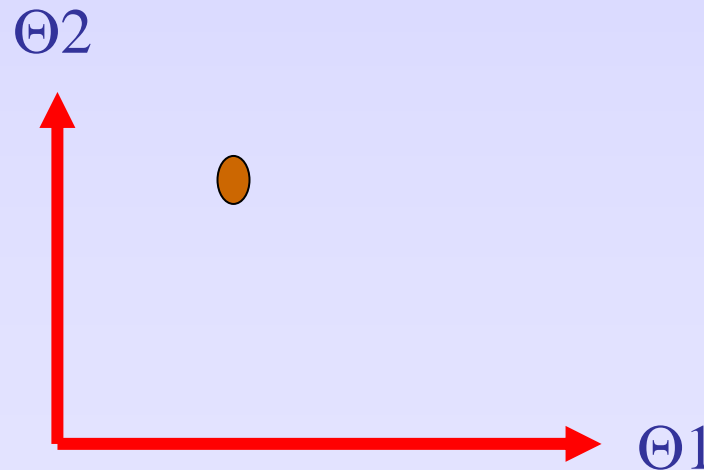
# Configuración de un robot

- La configuración de un robot se refiere a la posición de sus todas articulaciones que definen su estado en el espacio



# Espacio de configuraciones

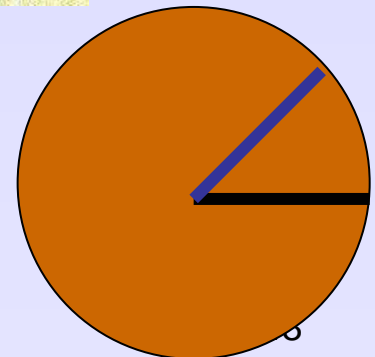
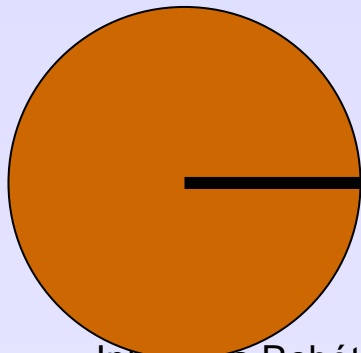
- Espacio “n”-dimensional donde se ubica cada grado de libertad del robot – el robot (orgáno terminal) se puede ver como un punto en este espacio



# Espacio de configuraciones

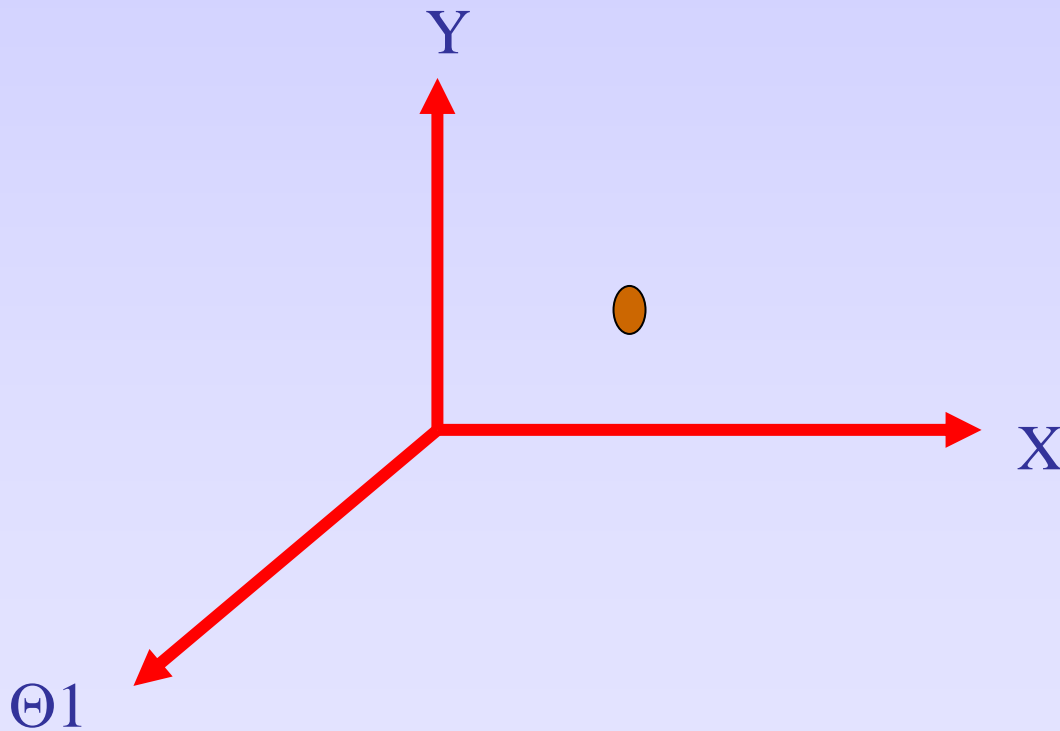
Para un robot móvil, la configuración del robot está dada por su posición X-Y y su orientación

- Ejemplos:
  - Robot Scout:  $X, Y, \Theta_1$
  - Robot Nomad:  $X, Y, \Theta_1, \Theta_2$





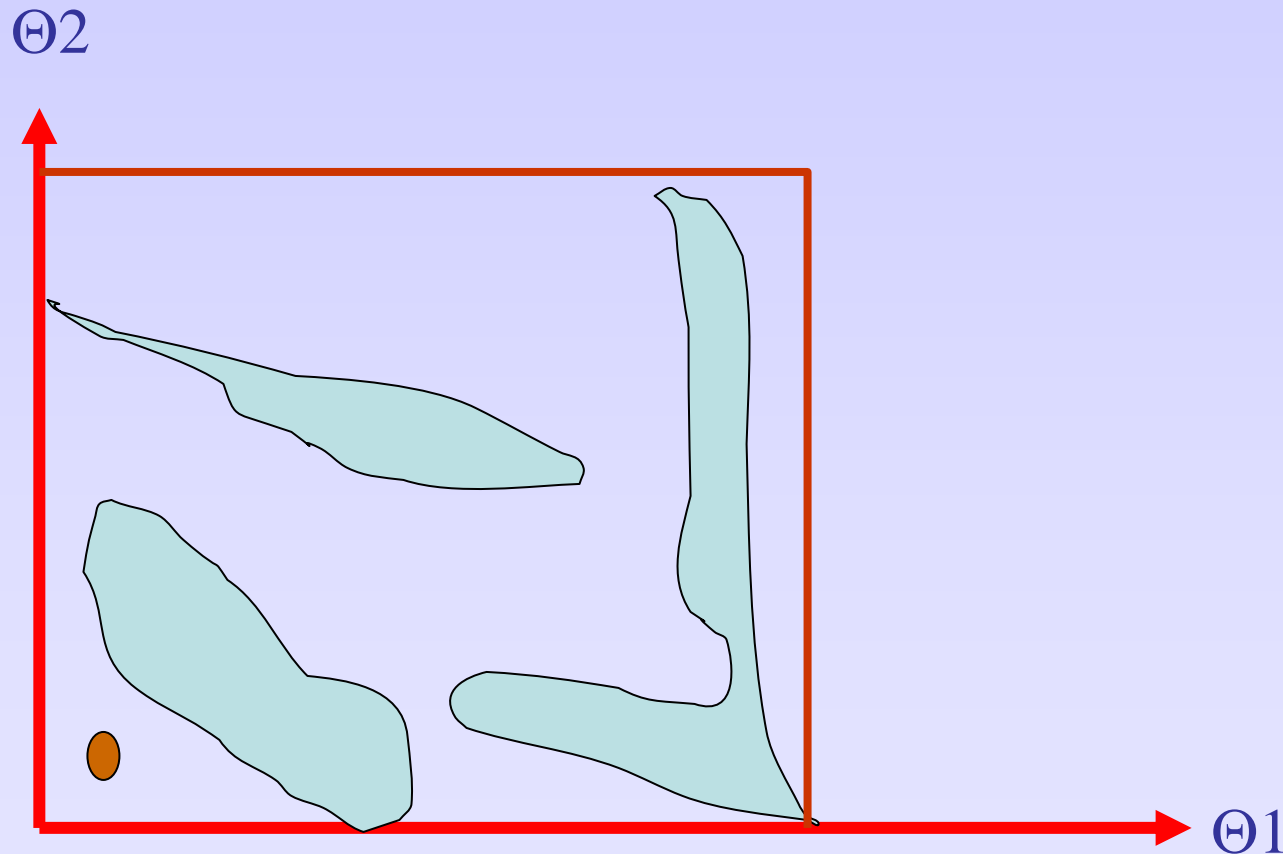
# Espacio de configuraciones: robot móvil



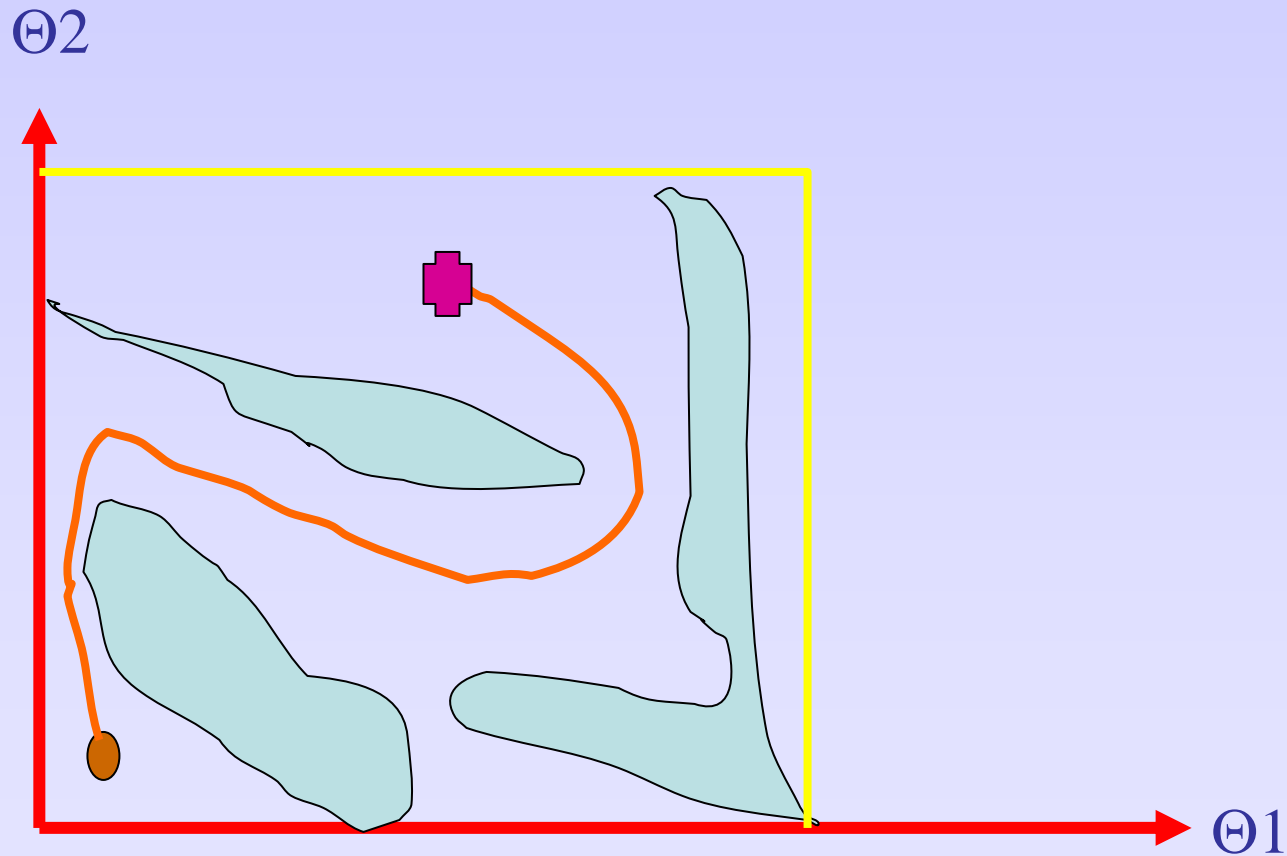
# Planeación en el espacio de configuraciones

- Posibles configuraciones del robot en el espacio de configuraciones –  $C$
- Localización de los obstáculos en el espacio de configuraciones -  $O =$   
**espacio de obstáculos**
- Espacio libre -  $F = C - O$
- Robot es un “punto” en este espacio

# Ejemplo: espacio de configuraciones, de obstáculos y espacio libre

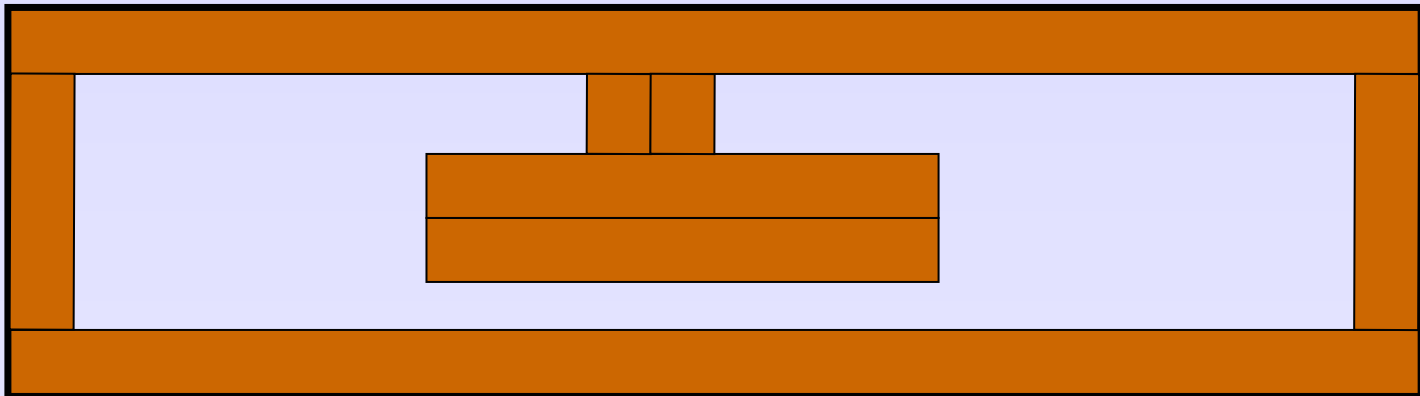


# Plan: trayectoria en el espacio libre



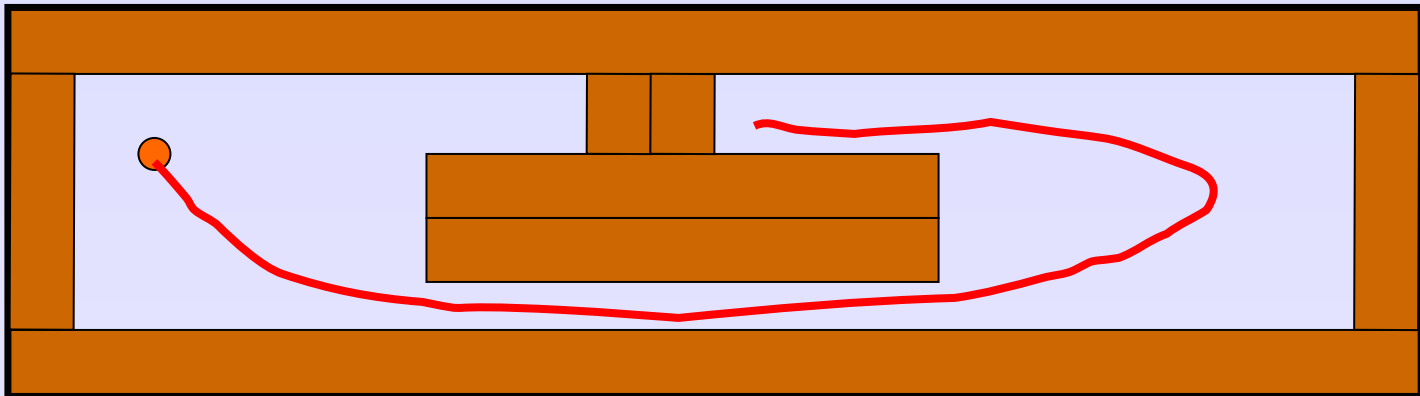
# Espacio para robots móviles

- Considerando un robot cilíndrico, el espacio de obstáculos / libre se puede visualizar en 2-D “extendiendo” los obstáculos por el diámetro del robot

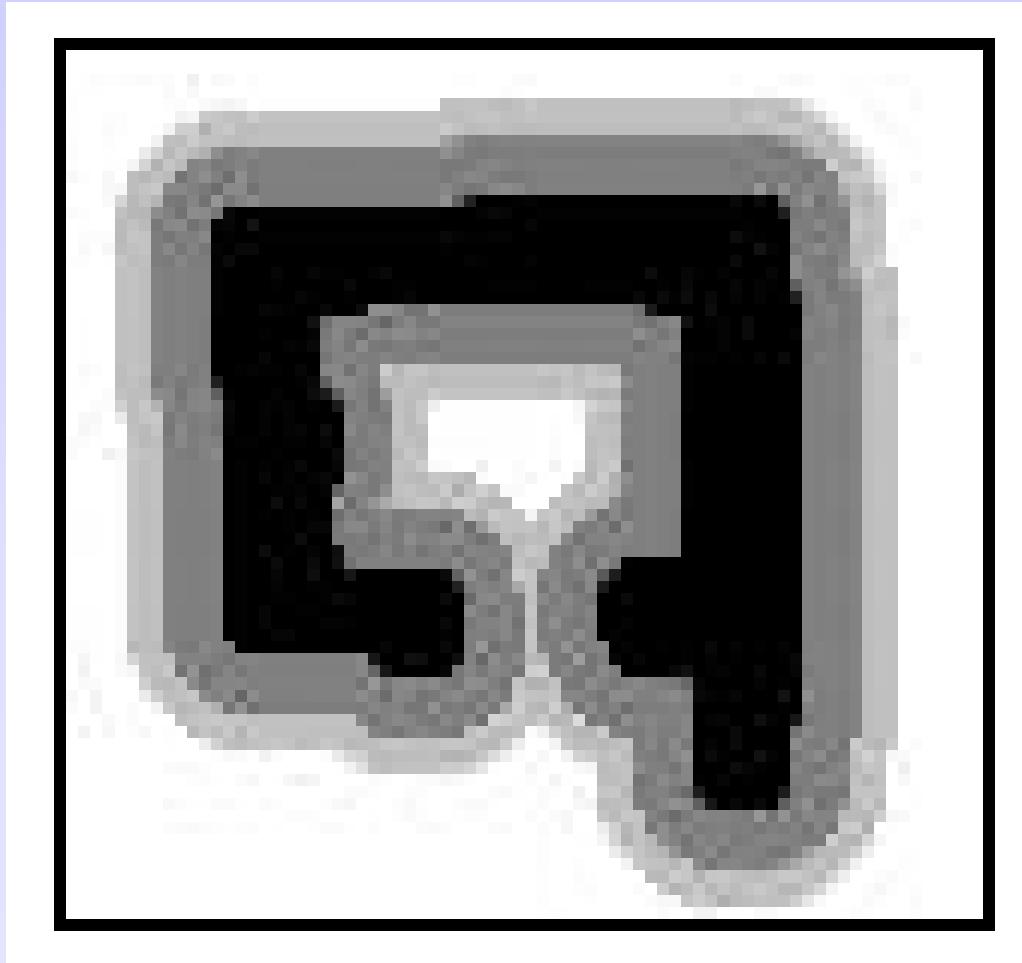


# Espacio para robots móviles

- El robot se puede ver como un punto en este espacio lo que facilita la planificación de para navegación



# Ejemplo de espacio de configuraciones



# Robots con Patas

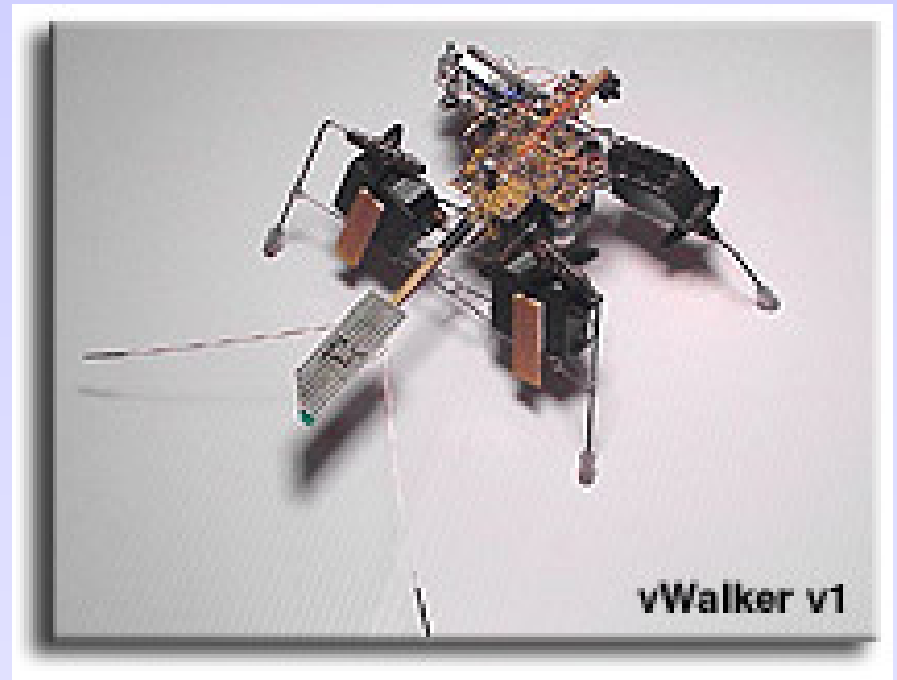
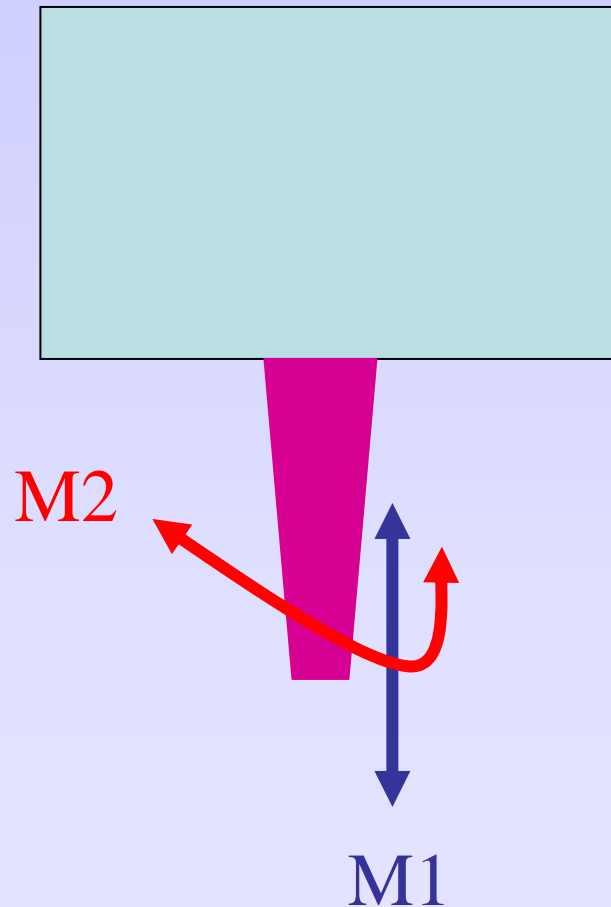
- La construcción y control de robots con patas es más complicada, la ventaja es que son más versátiles para diferentes tipos de terrenos
- Existen diferentes arreglos de patas (2, 4, 6 son los más comunes)
- También existen diferentes variaciones de diseño de patas



# Pata tipo insecto

- Consiste de un segmento con 2 motores que le dan dos grados de libertad:
  - Movimiento fuera-adentro (respecto al cuerpo del robot) – **M1**
  - Movimiento adelante-atrás – **M2**
- El movimiento combinado en ambos sentidos le permite el desplazamiento
- El movimiento coordinado de 6 patas de este tipo permite a un robot avanzar, retroceder o girar

# Pata tipo insecto



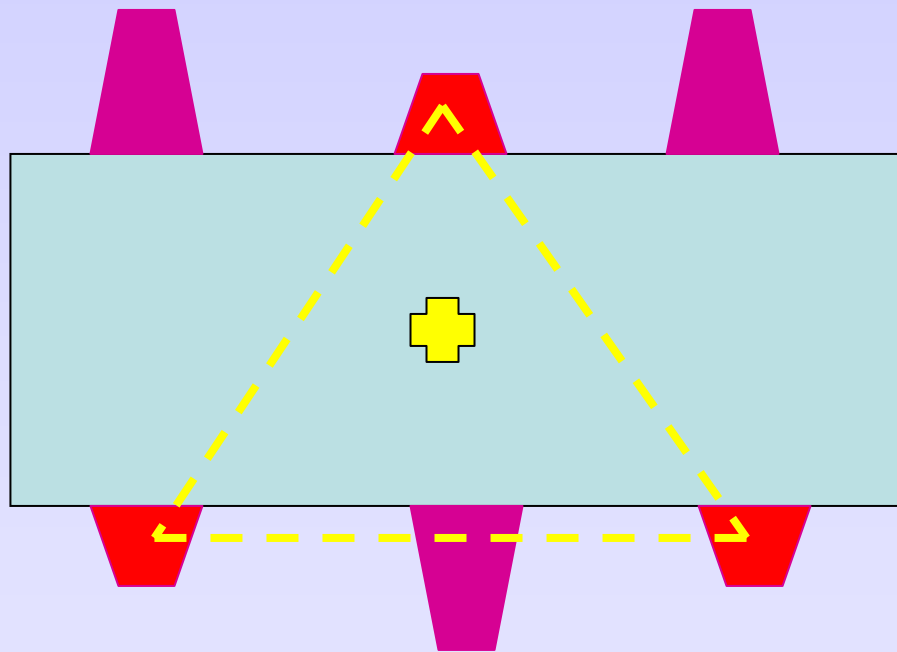
# Pata tipo insecto

- Secuencia de un movimiento:
  - Mover pata alejandola del cuerpo (M1)
  - Mover pata hacia delante (M2)
  - Mover pata hacia abajo (acercandola al cuerpo) hasta que toque el piso (M1)
  - Mover pata hacia atrás, empujando el robot hacia delante (M2)

# Coordinación

- Las patas se deben mover de acuerdo a cierta secuencia que produzca el movimiento deseado y al la vez mantenga el equilibrio del robot (centro de masa)
- Por ejemplo, para un robot de 6 patas, el equilibrio se mantiene mediante el movimiento alternado de tres patas, dos de un lado y una del otro

# Coordinación



# Referencias

- [Siegwart et al.] – Cap 2 y 3
- [Dudek y Jenkin] – Cap 2
- [Jones, Flynn] Cap 6
- J. C. Latombe, “Robot Motion Planning”, Kluwer

# Actividades

- **Práctica 1: *robot deambulante* → Feb. 8**
  - Seleccionar un tipo de robot (configuración de ruedas y geometría)
  - Seleccionar configuración de sensores
  - Hacer un programa para que el robot deambule en un ambiente 2D sin chocar
  - Documentar:
    - Configuración robot (que tipo es)
    - Sensores, como se utilizan y se combinan
    - Algoritmo para deambular
    - Pruebas realizadas y análisis, problemas
  - Explorar diferentes configuraciones mecánicas y sensoriales