
Robótica Modular y locomoción: Aplicación a Robots Ápodos

D. Juan González Gómez
Tesis Doctoral



Director: Dr. Eduardo Boemo Scalvinoni

Contenidos

1. **Introducción**
2. Clasificación
3. Locomoción en 1D
4. Locomoción en 2D
5. Configuraciones mínimas
6. Experimentos
7. Conclusiones

El Problema de la locomoción

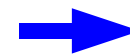
- *Diseñar y contruir un robot capaz de desplazarse desde un punto a otro con independencia del terreno*

- **Nivel Superior:**

- Percepción del entorno
- Planificación de trayectorias
- Navegación
- Estrategias de decisión

- **Nivel Inferior:**

- Coordinación de las articulaciones
- Morfología del robot (patas, ruedas...)
- Modos de caminar

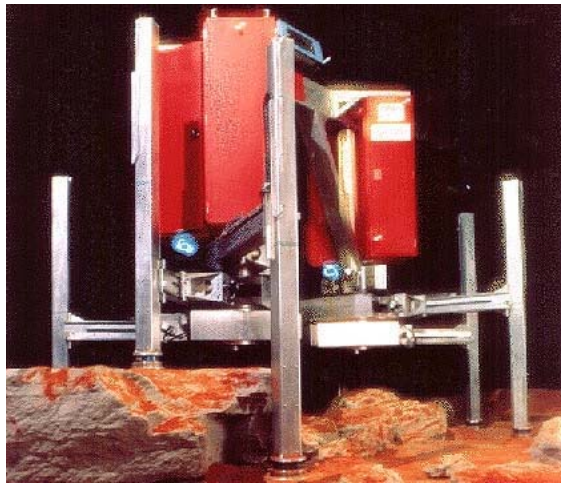


Ámbito de esta tesis

El Problema de la locomoción (II)

Enfoque clásico:

- Estudiar entorno
- Diseñar la morfología del robot
- Realizar los modos de caminar

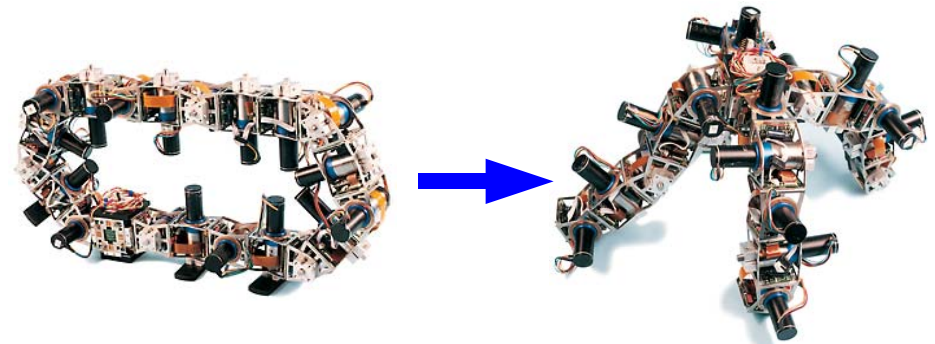


(CMU Ambler, Krotkov et al)

Nuevo enfoque: (Yim, 1995)

Robótica modular Auto-configurable

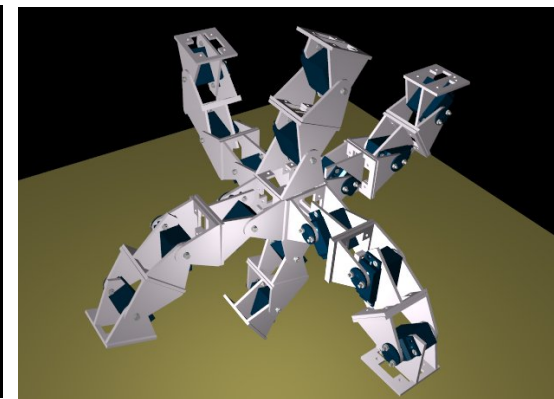
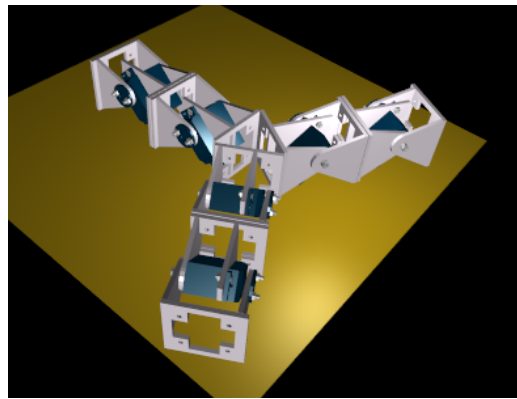
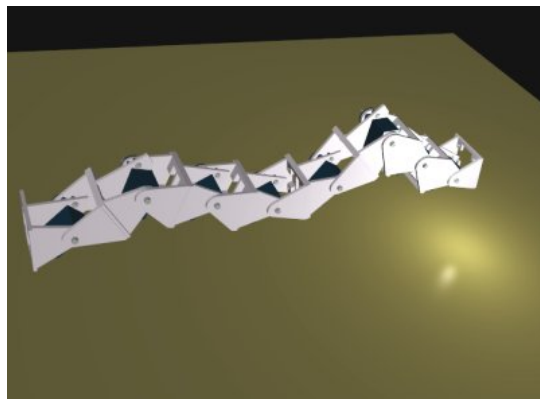
- Robots creados a partir de módulos
- Adaptan su morfología al terreno



(Polybot, Yim et al)

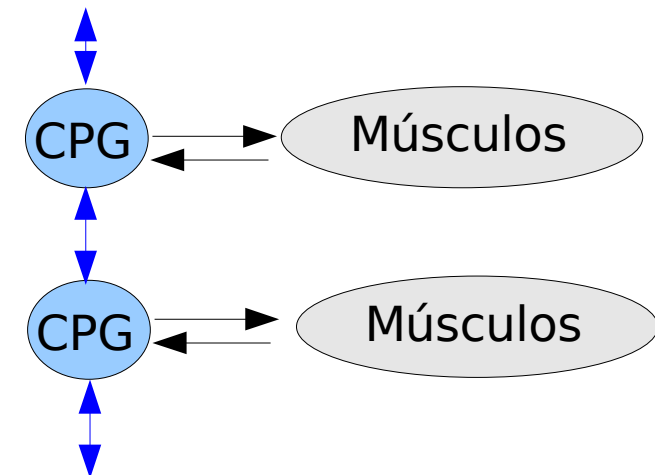
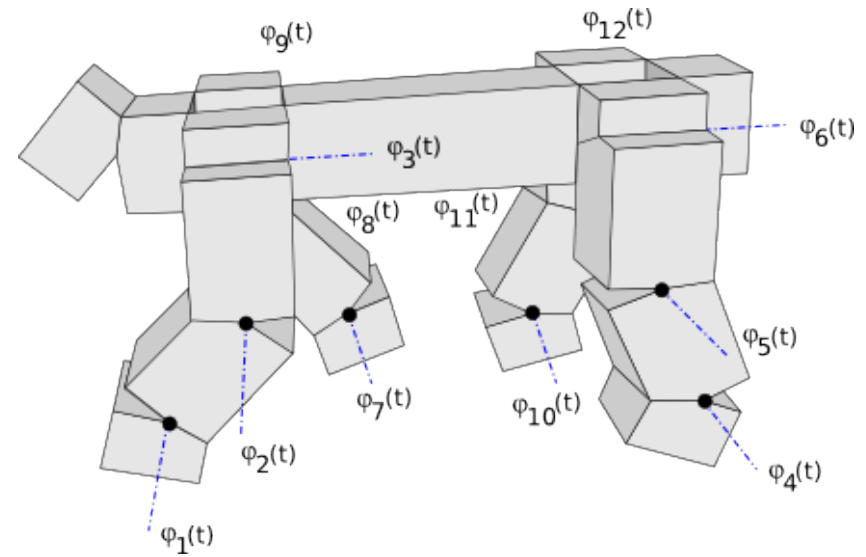
Robótica modular y locomoción

- Estudio de la locomoción de las configuraciones
- Crecimiento exponencial con módulos
- Clasificación
- Ámbito de esta tesis: Topologías de 1D



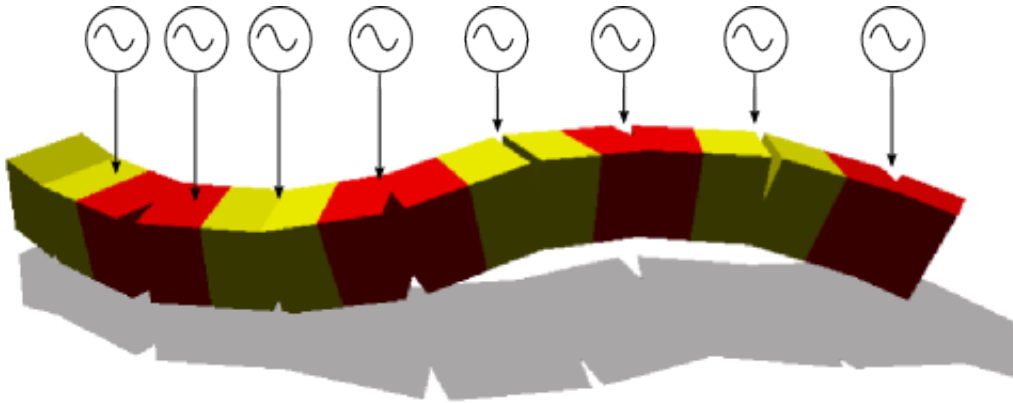
Controladores

- Cálculo de la posición de las articulaciones: $\varphi_i(t)$
- **Enfoque clásico:**
 - Cinemática inversa
 - Definir trayectoria de puntos y obtener los ángulos
 - Inconvenientes: muchas operaciones, válido para una morfología concreta
- **Enfoque Bio-inspirado:** CPGs
 - Actúan directamente sobre los músculos
 - Sincronización entre ellos

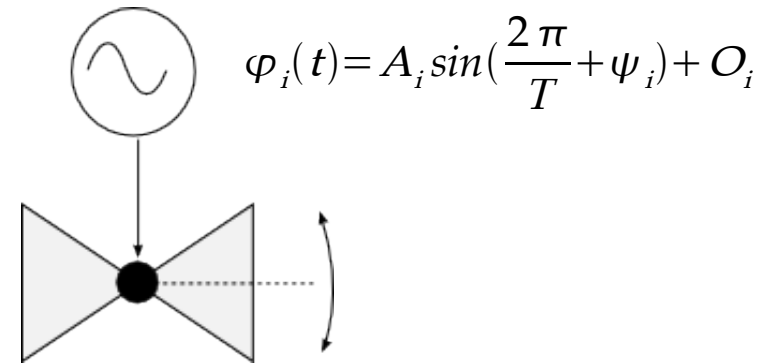


Generadores sinusoidales

- **Otro Enfoque:** Generadores sinusoidales
- Cada generador actúa sobre un módulo



- Coordinación
 - Encontrar los valores de los parámetros de los generadores

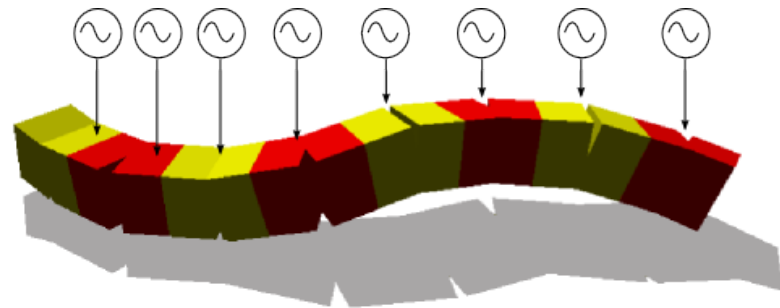


• Ventajas:

- Implementación en diferentes tecnologías
- Simples
- Pocos cálculos

Objetivos

- Viabilidad del modelo
- Modos de caminar
- Caracterización
- Configuraciones mínimas
- Cinemática

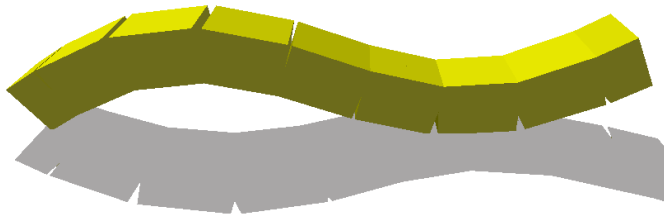


Estudio del problema de la locomoción de los robots ápodos modulares con topología de 1D, de M módulos, en una y dos dimensiones

Restricciones

- Grupos de estudio:

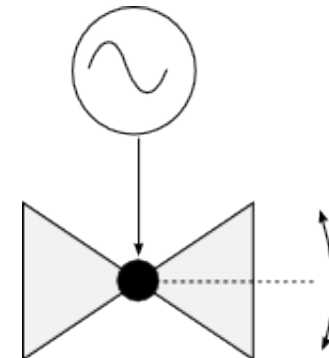
Conexión cabeceo-cabeceo



Conexión cabeceo-viraje



- Régimen permanente
- Superficie homogénea y sin obstáculos
- Control en bucle abierto
- Módulos sin sensores



Contenidos

1. Introducción
2. **Clasificación de robots modulares**
3. Locomoción en 1D
4. Locomoción en 2D
5. Configuraciones mínimas
6. Experimentos
7. Conclusiones

Clasificación de los robots modulares

Robots Modulares

(Yim et al.)

Tipo Retículo

Tipo Cadena

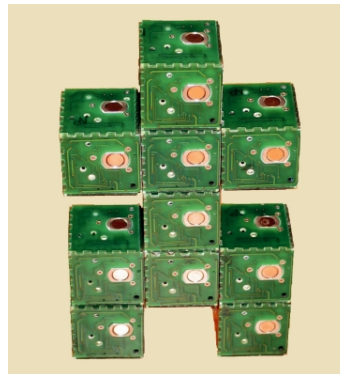
Híbridos

2D

3D



(Catom, Goldstein et al.)

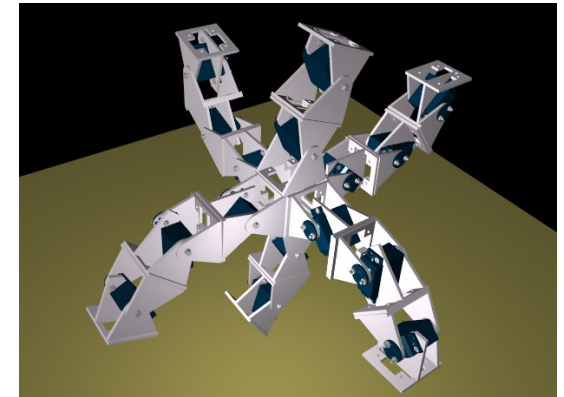
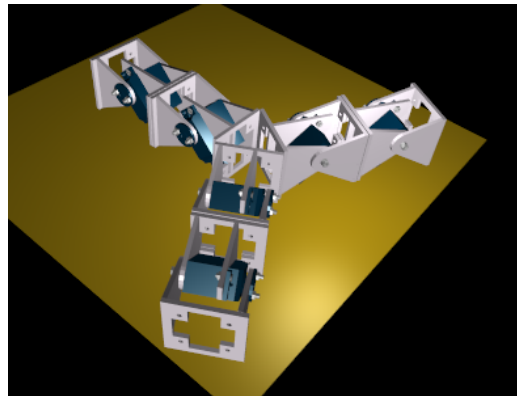
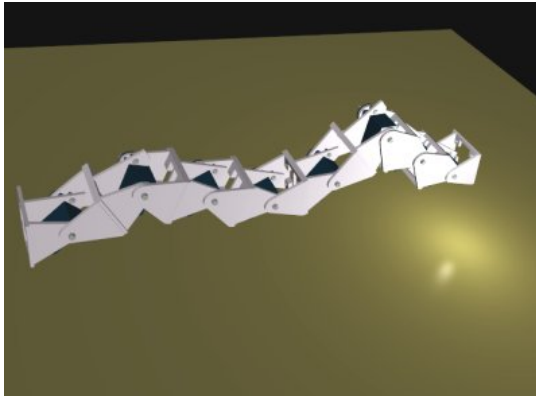
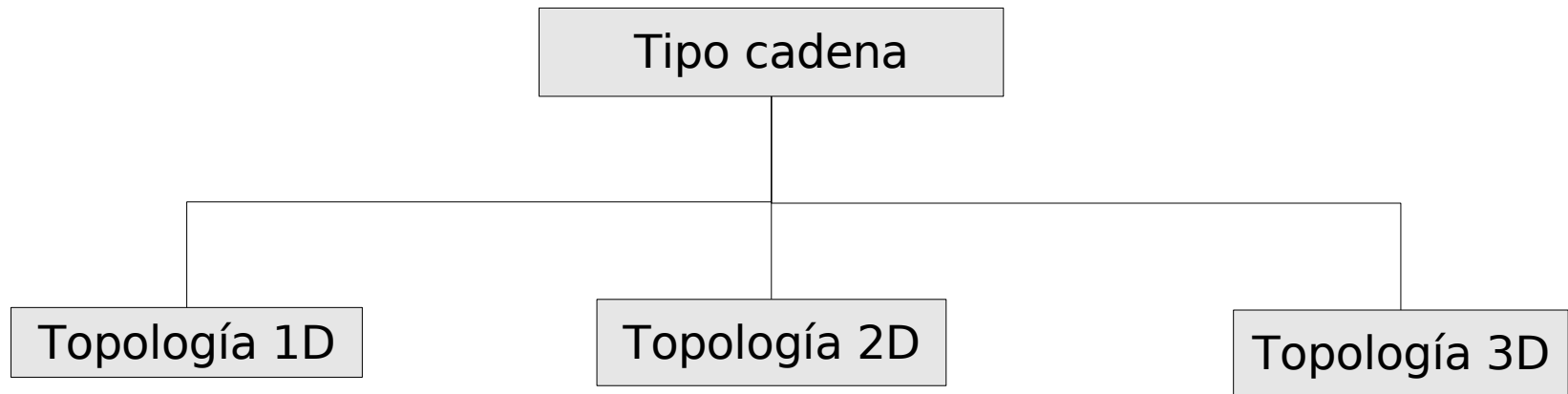


(Miche, Rus et al.)

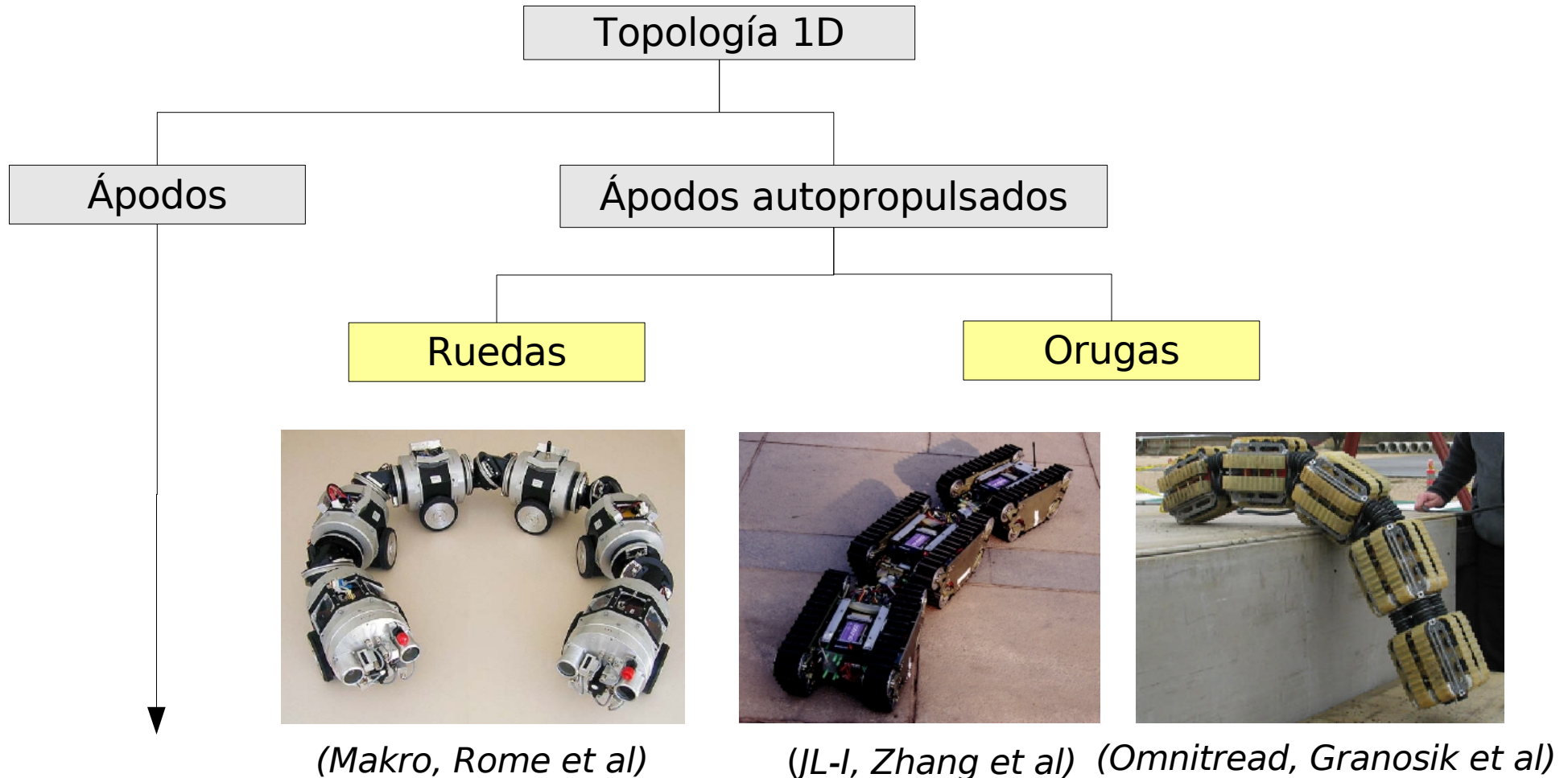


(M-TRAN, Murata et al.)

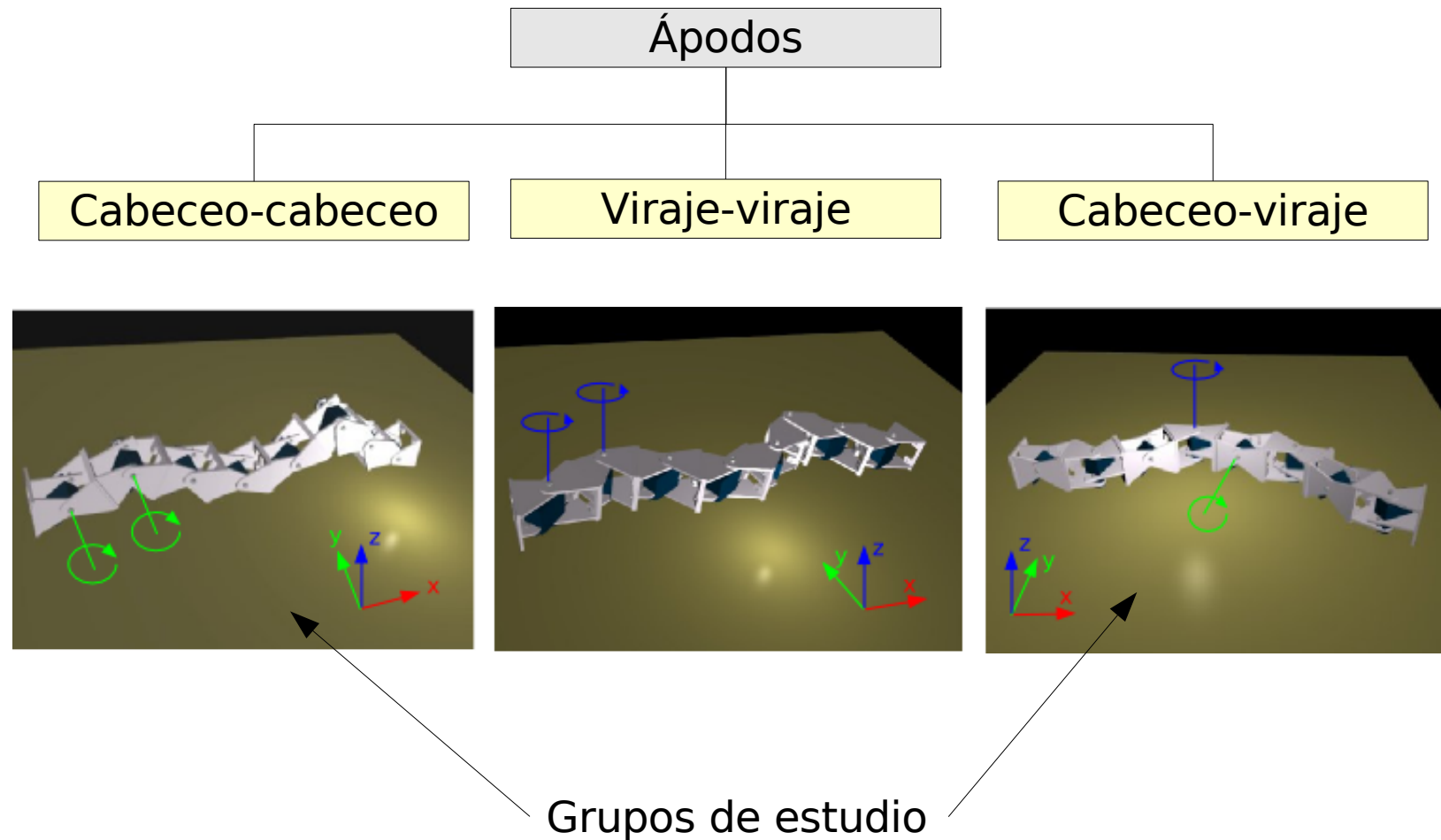
Clasificación de los robots modulares (II)

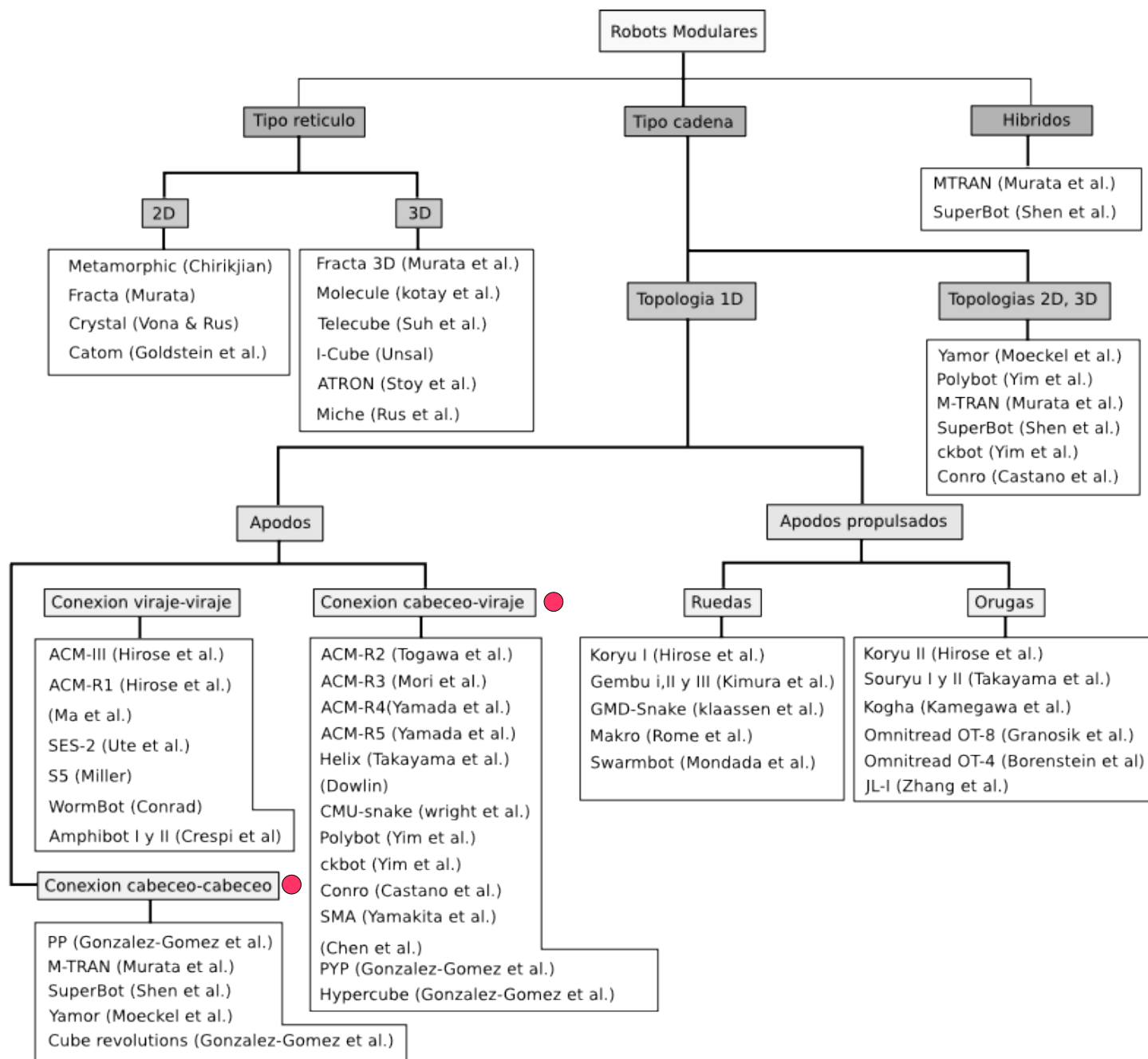


Clasificación de los robots modulares (III)



Clasificación de los robots modulares (IV)

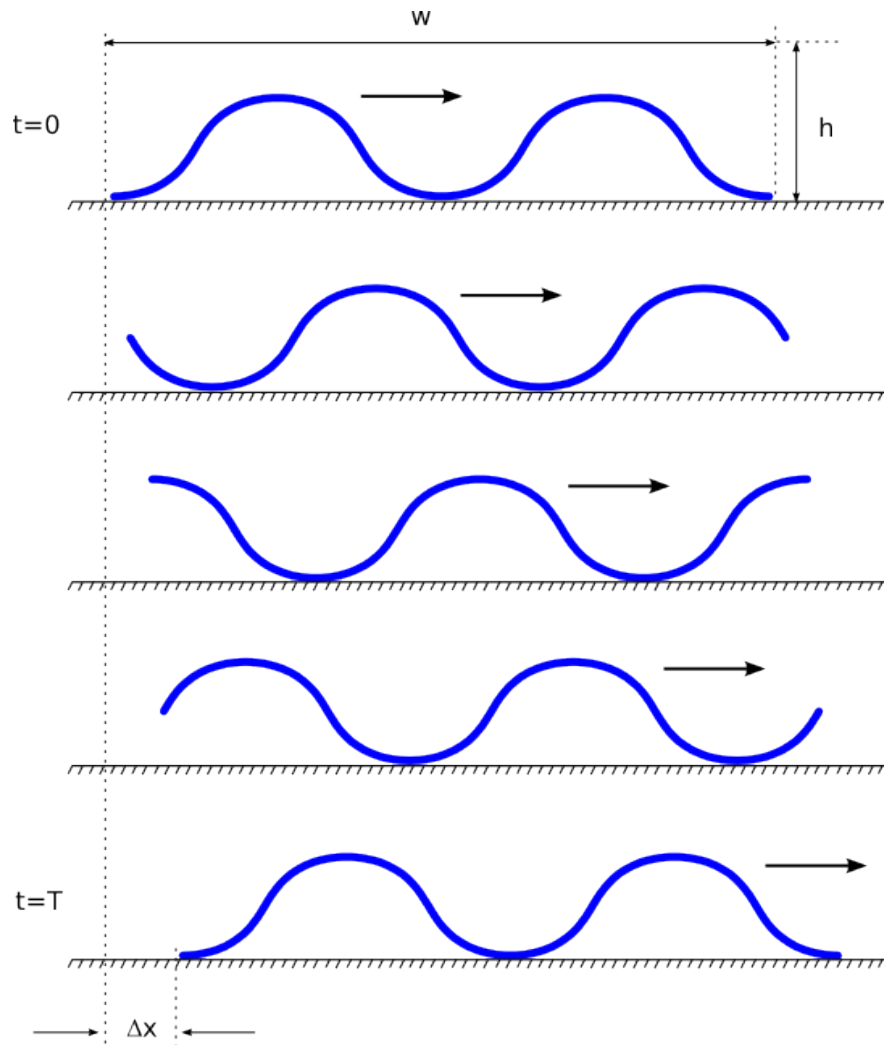




Contenidos

1. Introducción
2. Clasificación de robots modulares
3. **Locomoción en 1D**
4. Locomoción en 2D
5. Configuraciones mínimas
6. Experimentos
7. Conclusiones

Mecanismo de locomoción

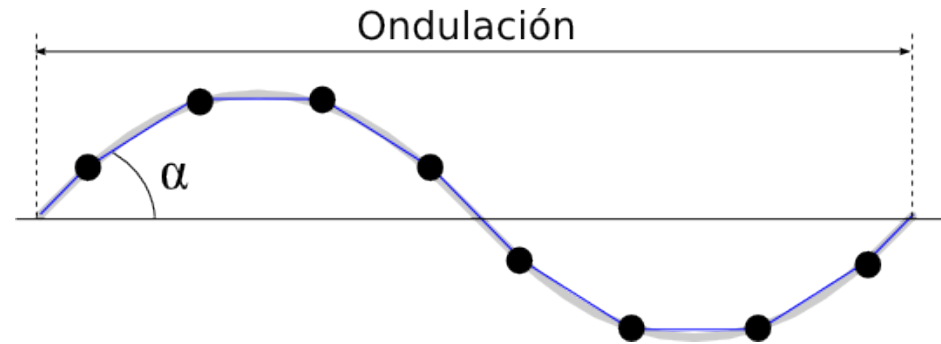


- Propagación de ondas
- Onda corporal que se desplaza
- Paso: Δx
- Dimensiones: anchura (w) x altura (h)

Forma de la onda corporal

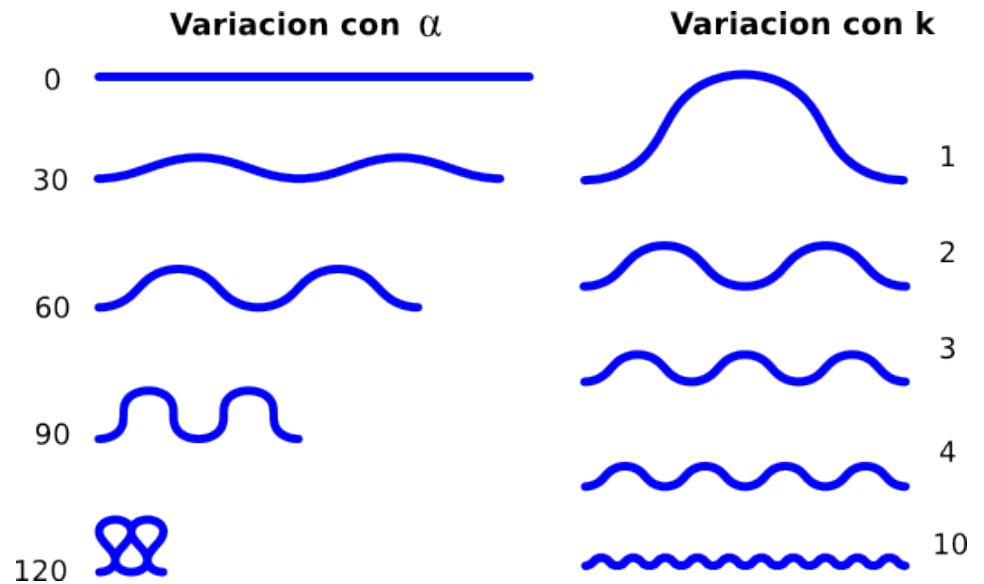
- **Curva serpentinoide**

- Continua/Discreta



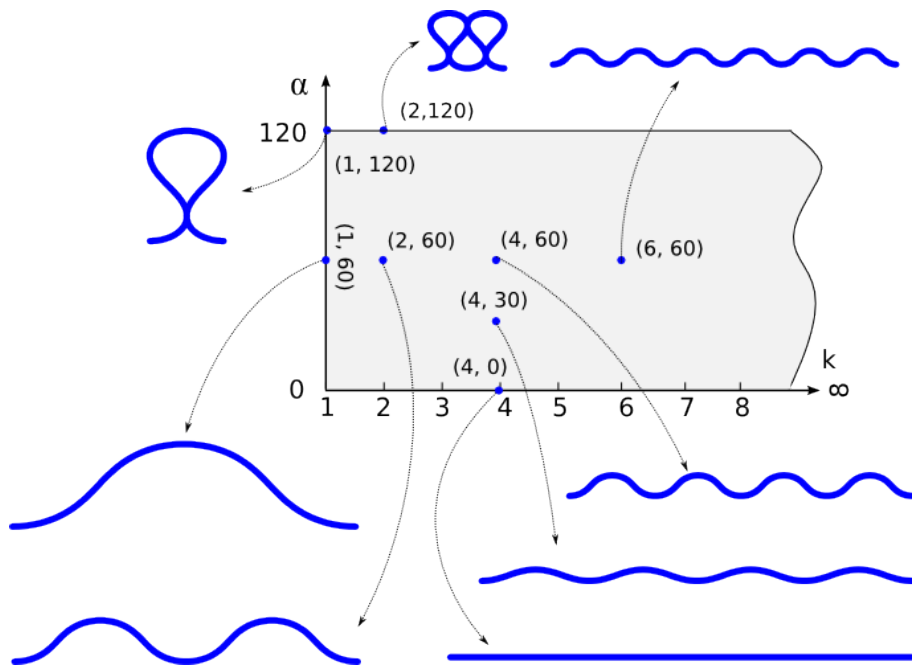
- **Parámetros:**

- Ángulo de serpenteo: α
- Número de ondulaciones: k

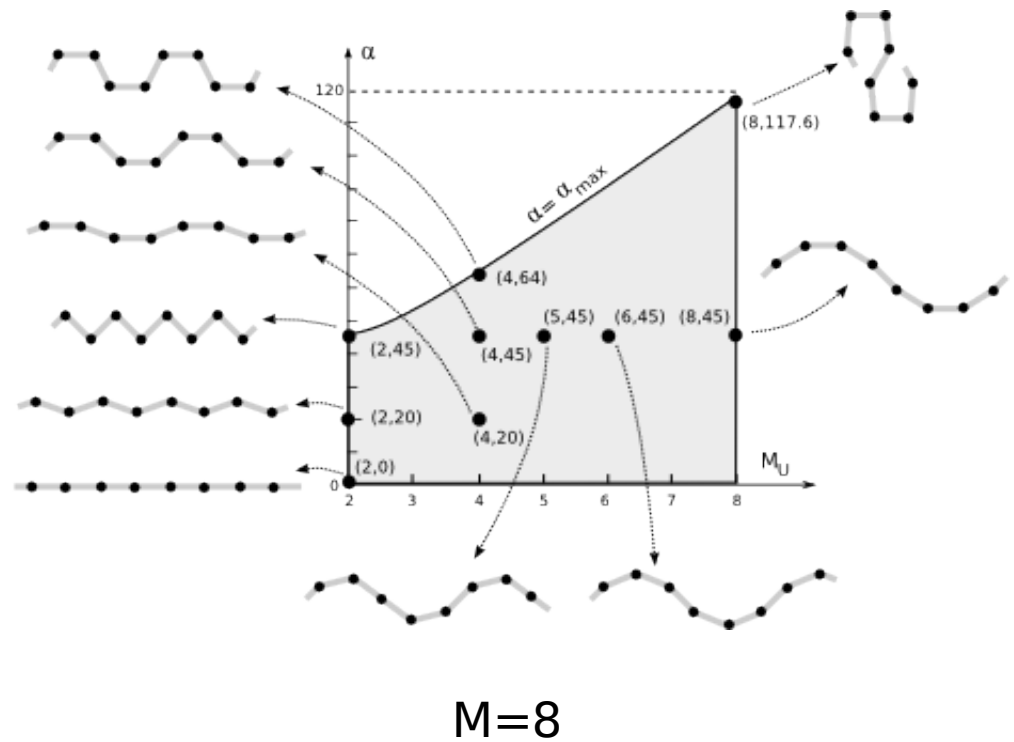


Espacio de formas

Continuo

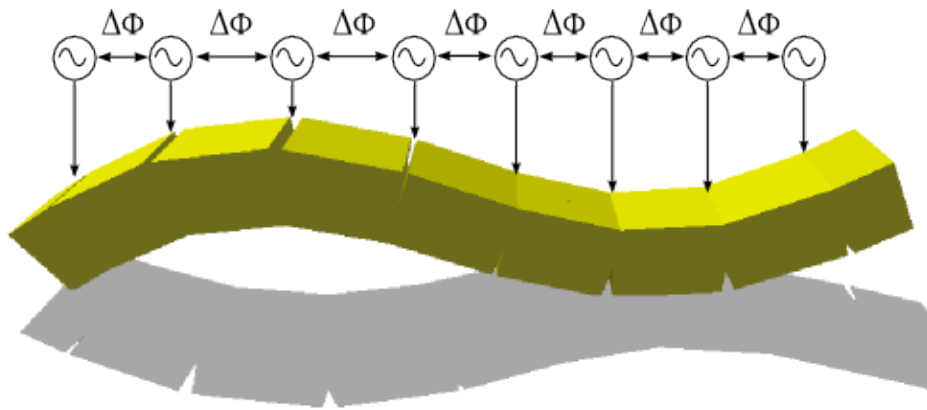


Discreto

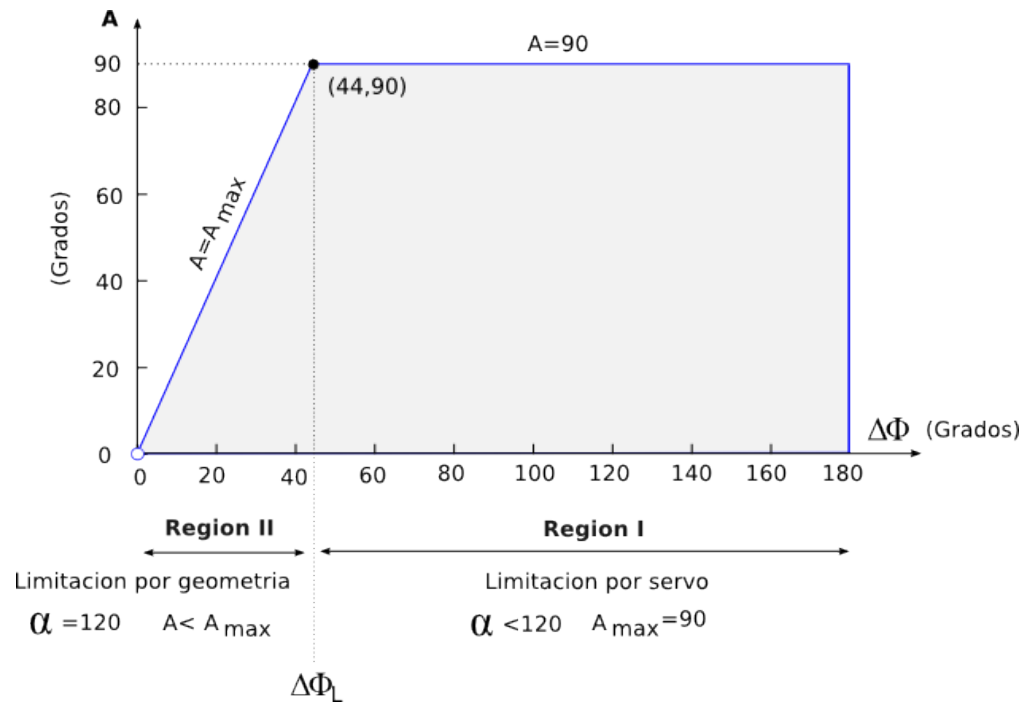


Espacio de control

- M osciladores senoidales iguales
- Misma frecuencia
- Misma amplitud A
- Misma diferencia de fase $\Delta\phi$
- Offset 0

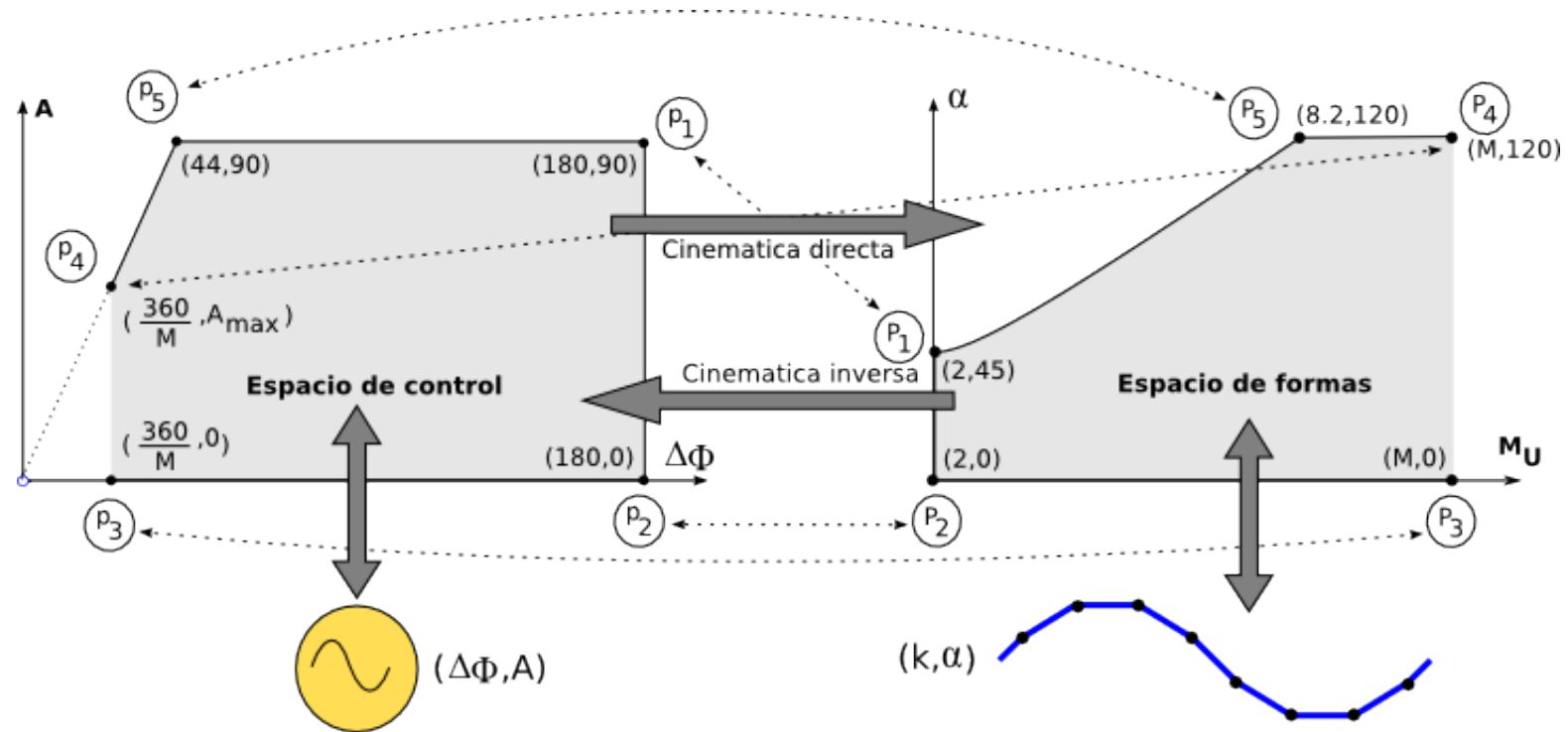


- Sólo dos parámetros:
 - Amplitud: A
 - Diferencia de fase: $\Delta\phi$



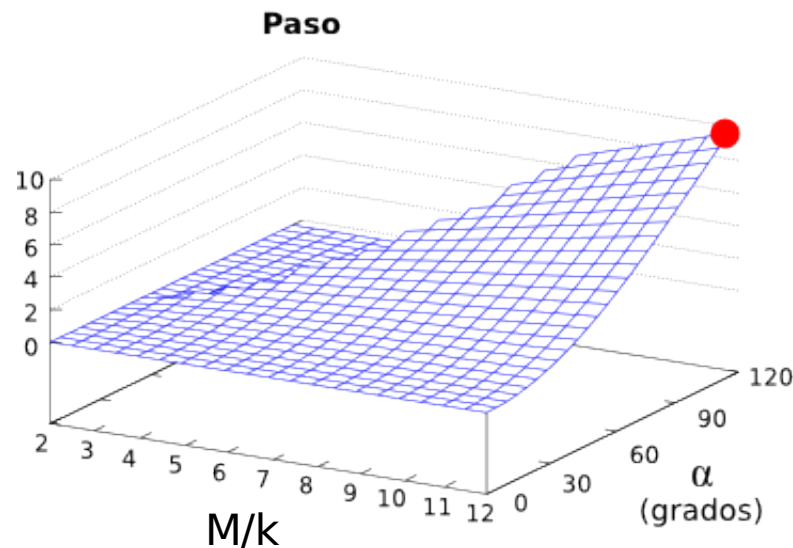
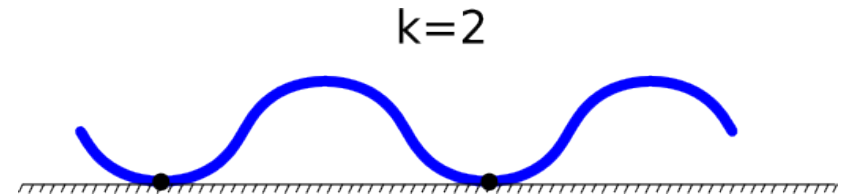
Cinemática

- Problemas de cinemática directa e inversa
- Resolución mediante transformación entre los espacios
- En el espacio de formas establecemos las restricciones (dimensión y paso)



Caracterización del paso

- Estabilidad: $k \geq 2$
- Ecuación del paso: $\Delta x = \frac{l}{k} - \lambda$
- Deducidas partir de la forma del robot

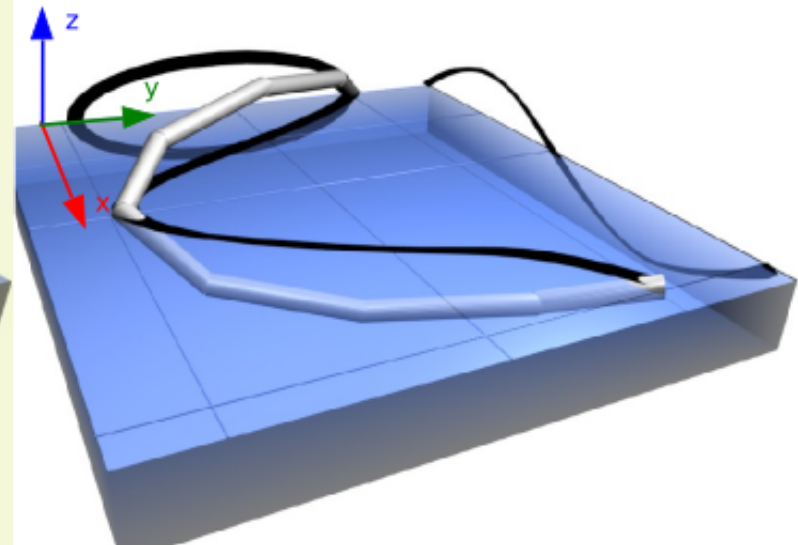
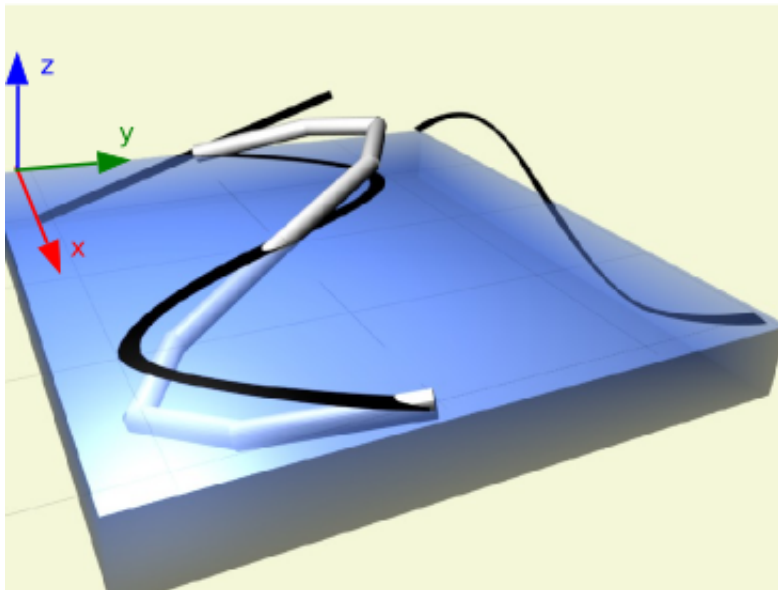


Contenidos

1. Introducción
2. Clasificación de robots modulares
3. Locomoción en 1D
4. **Locomoción en 2D**
5. Configuraciones mínimas
6. Experimentos
7. Conclusiones

Mecanismo de locomoción

- Propagación de ondas
- Onda corporal tridimensional
- Dimensiones: anchura (w) x largo (lx) x altura (h)

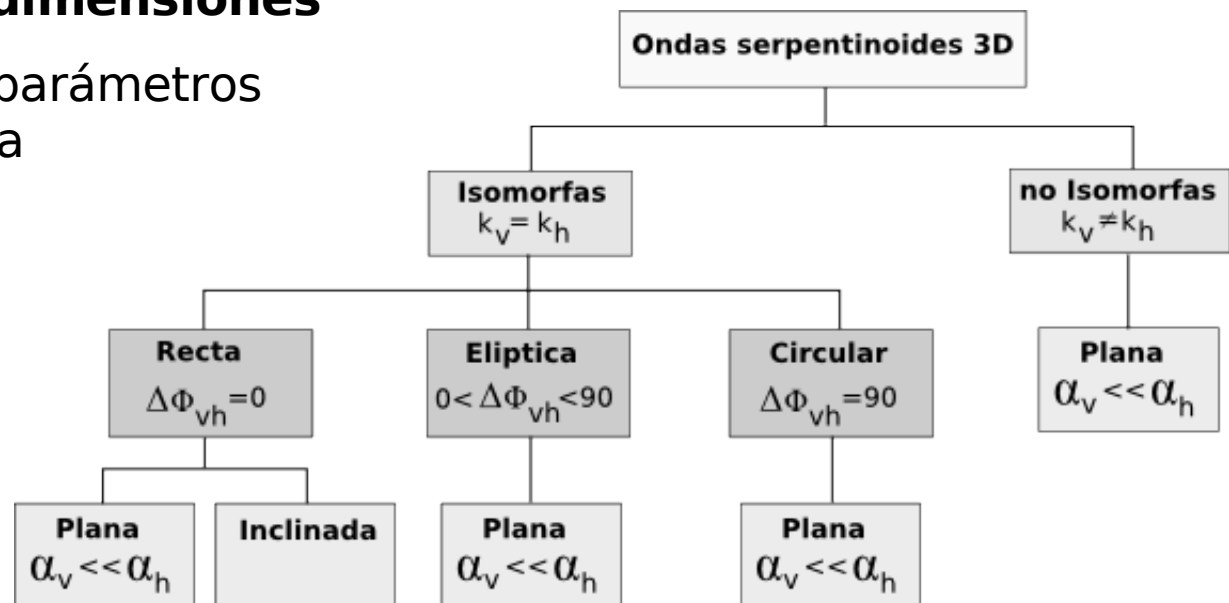


Espacio de formas

- Superposición de dos ondas:
 - Onda vertical: α_v, k_v
 - Onda horizontal: α_h, k_h
 - Diferencia de fase entre ellas: $\Delta\Phi_{vh}$
- Espacio de formas de **5 dimensiones**
- Las relaciones entre los parámetros determinan el tipo de onda

$$\alpha_v, \alpha_h, k_v, k_h, \Delta\Phi_{vh}$$

TIPOS DE ONDAS

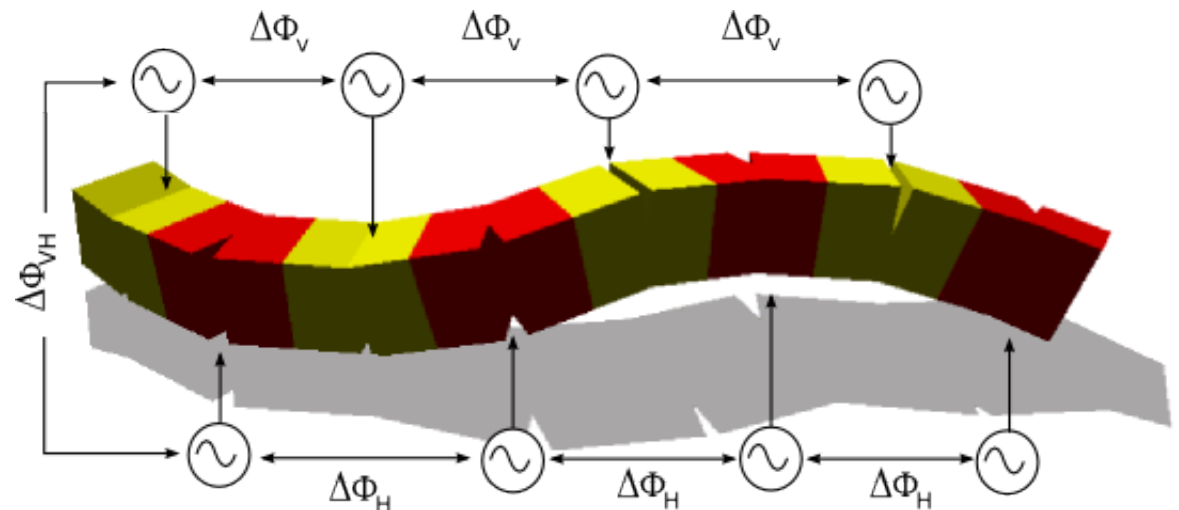


Espacio de control

- Dos grupos de osciladores: verticales y horizontales
- Todos los horizontales son iguales: $A_h, \Delta\Phi_h$
- Todos los verticales son iguales: $A_v, \Delta\Phi_v$
- Diferencia de fase entre verticales y horizontales: $\Delta\Phi_{vh}$
- Misma frecuencia para todos

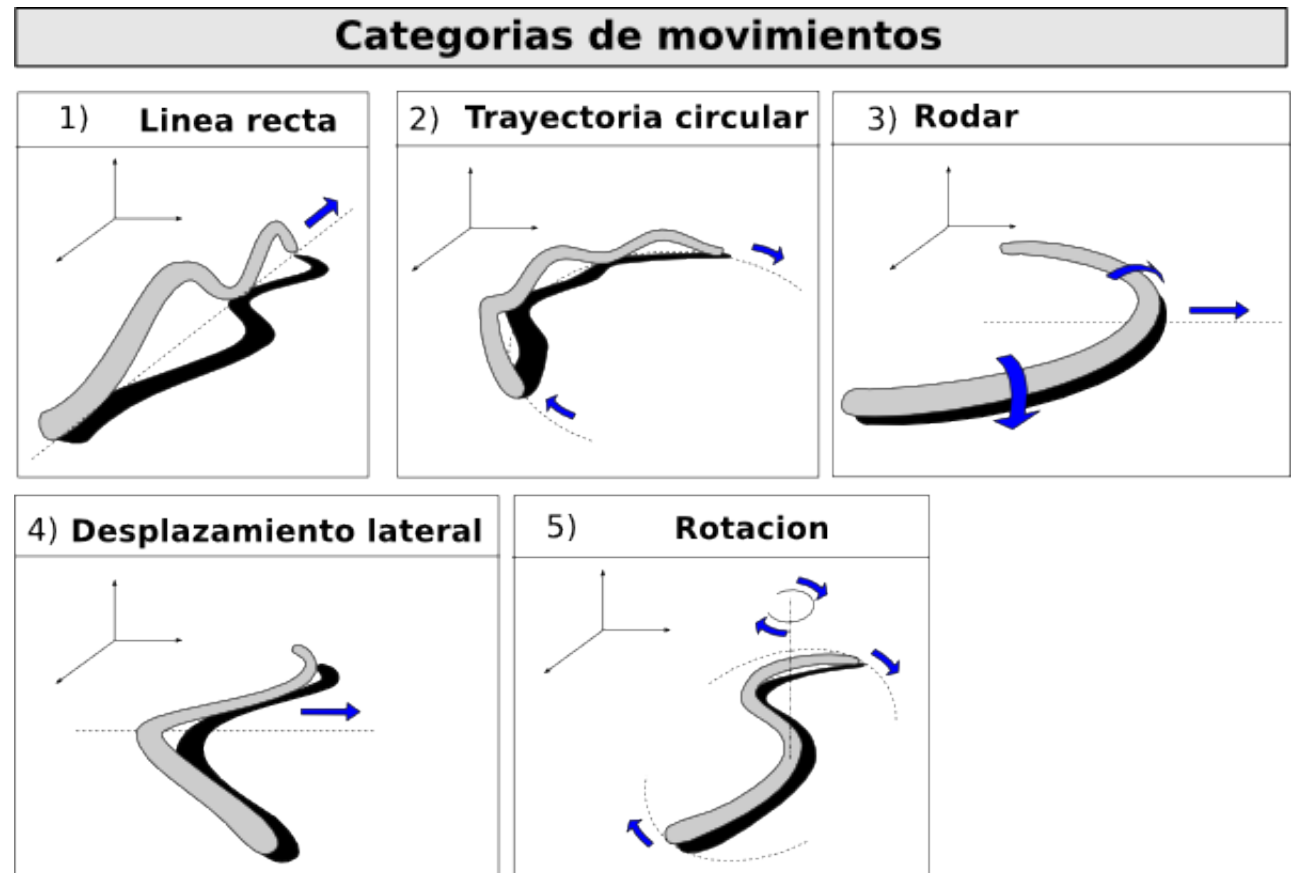
Espacio de 5 dimensiones

$$A_h, A_v, \Delta\Phi_h, \Delta\Phi_v, \Delta\Phi_{vh}$$



Modos de caminar

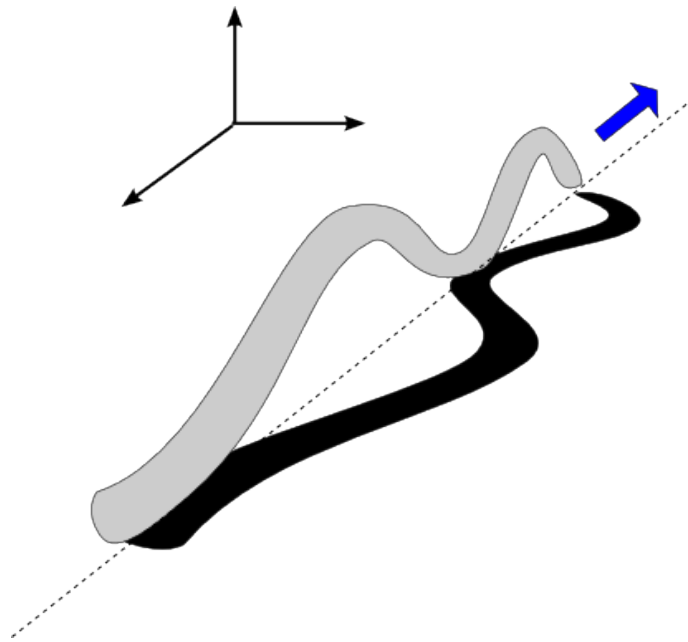
- Búsqueda mediante algoritmos genéticos
- 5 categorías de movimientos
- Caracterizados por las relaciones entre los parámetros de sus ondas



Modos de caminar (II)

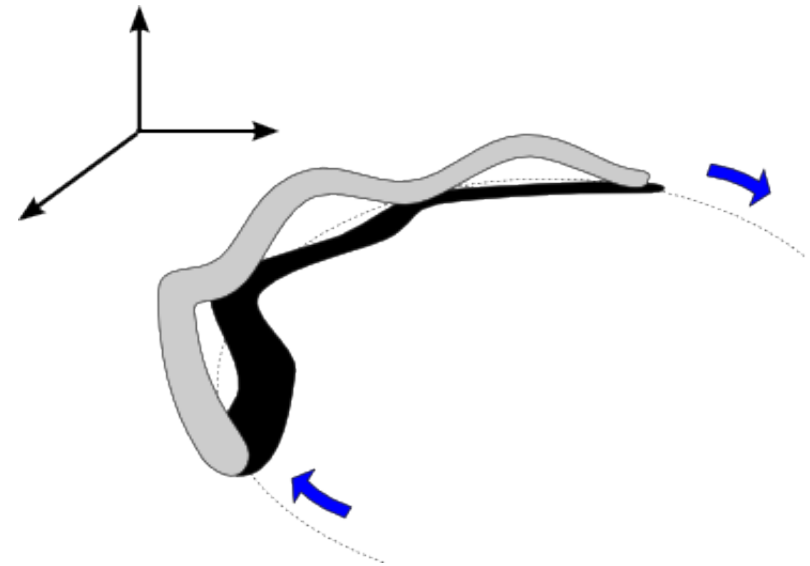
Recto

- Módulos horizontales: $\varphi_h = 0$
- Parámetros: α_v, k_v



Trayectoria circular

- Módulos horizontales: $\varphi_h \neq 0$
- Parámetros: α_v, k_v, α_h



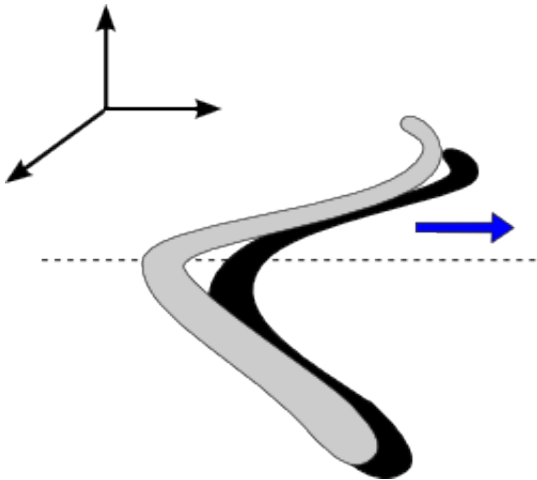
Modos de caminar (III): Desplazamiento lateral

Normal

- Caracterización:

$$\alpha_v \rightarrow 0, k_v = k_h = k, \Delta\Phi_{vh} = 90$$

- DOF: α_h, k



Inclinado

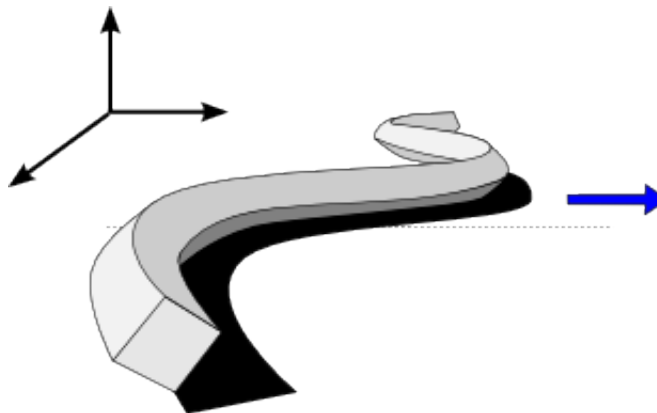
Nuevo

- Caracterización:

$$\alpha_h = \alpha \cos \beta, \alpha_v = \alpha \sin \beta$$

$$k_v = k_h = k, \Delta\Phi_{vh} \rightarrow 0$$

- DOF: α, β, k

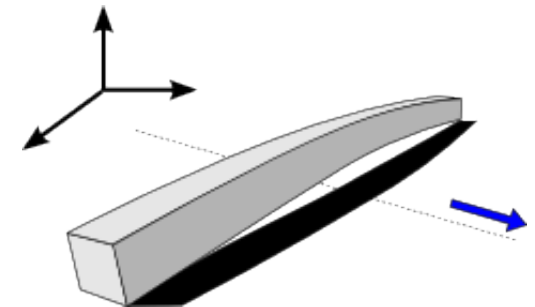


Remero

- Caracterización:

$$\alpha_h = \alpha_v = \alpha, \alpha > \alpha_{min}, \Delta\Phi = 90$$

- DOF: α



Modos de caminar (IV): Rotación

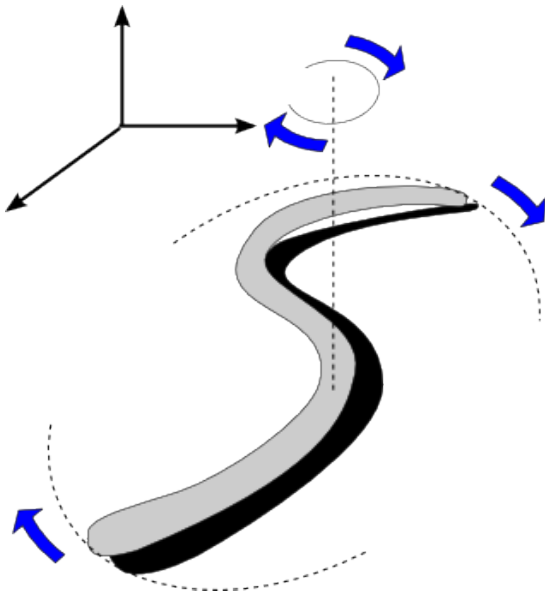
Rotación en S

Nuevo

- Caracterización:

$$\alpha_v \rightarrow 0, k_v = 2k_h, \Delta\Phi_{vh} = 0$$

- DOF: α_h, k_h



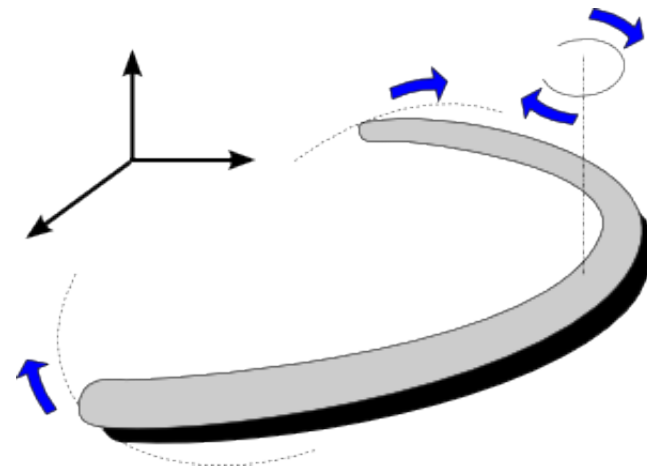
Rotación en U

Nuevo

- Caracterización:

$$\alpha_v \rightarrow 0, \Delta\Phi_{vh} = 90$$

- DOF: α_h, k_v



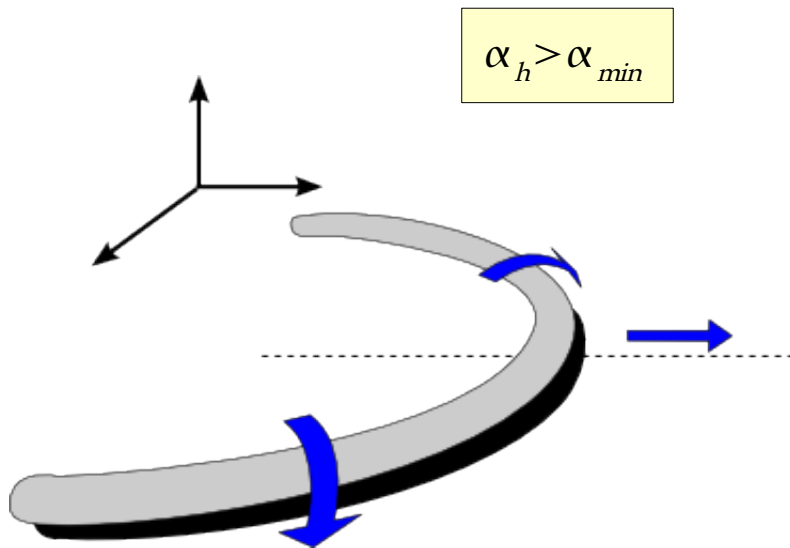
Modos de caminar (V): Rodar

Rodar

- Caracterización:

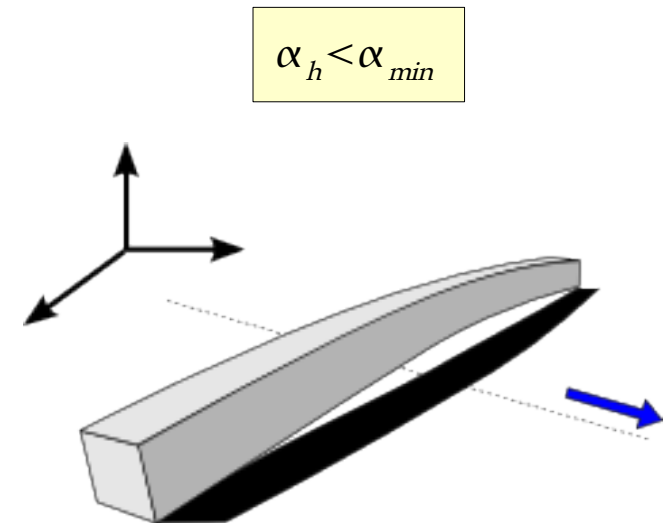
$$\alpha_v = \alpha_h, \alpha_h > \alpha_{min}, \Delta \Phi_{vh} = 90$$

- DOF: α_h



Remero

- Si la sección es cuadrada, el movimiento es de rodar o remero, dependiendo del valor de α_h

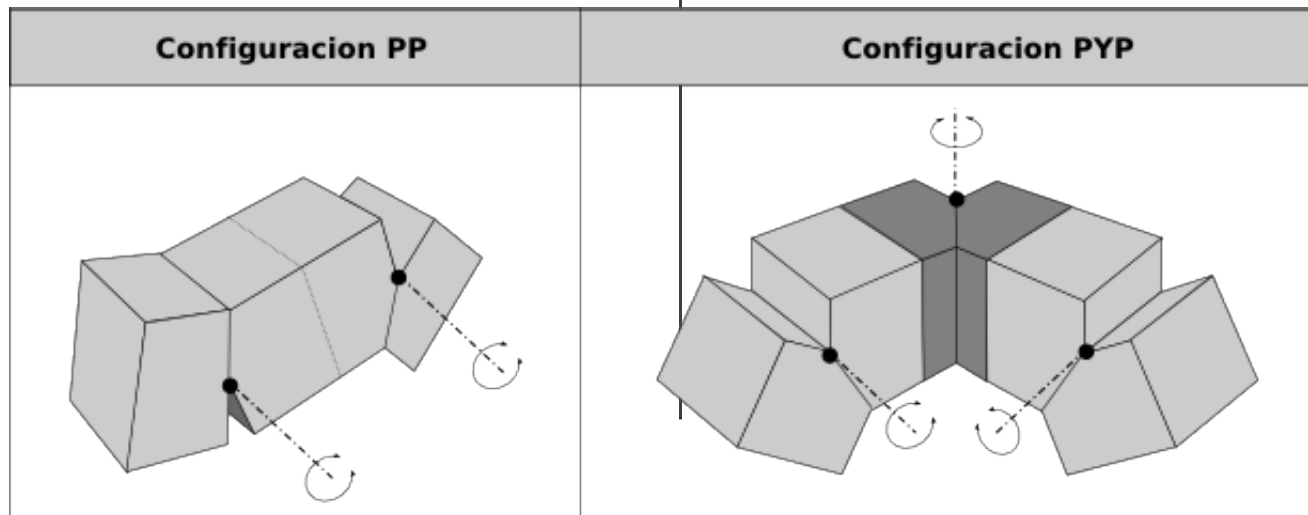


Contenidos

1. Introducción
2. Clasificación de robots modulares
3. Locomoción en 1D
4. Locomoción en 2D
5. **Configuraciones mínimas**
6. Experimentos
7. Conclusiones

Configuraciones mínimas

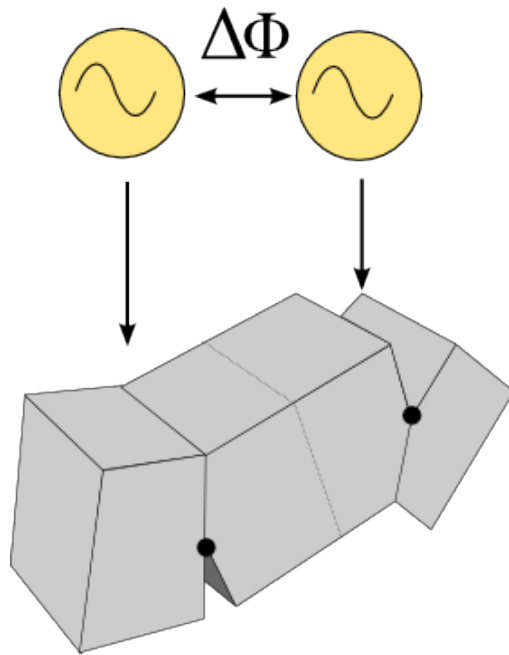
- Configuraciones con el menor número de módulos y que pueden desplazarse
- Búsquedas con algoritmos genéticos en el espacio de control



• Línea recta

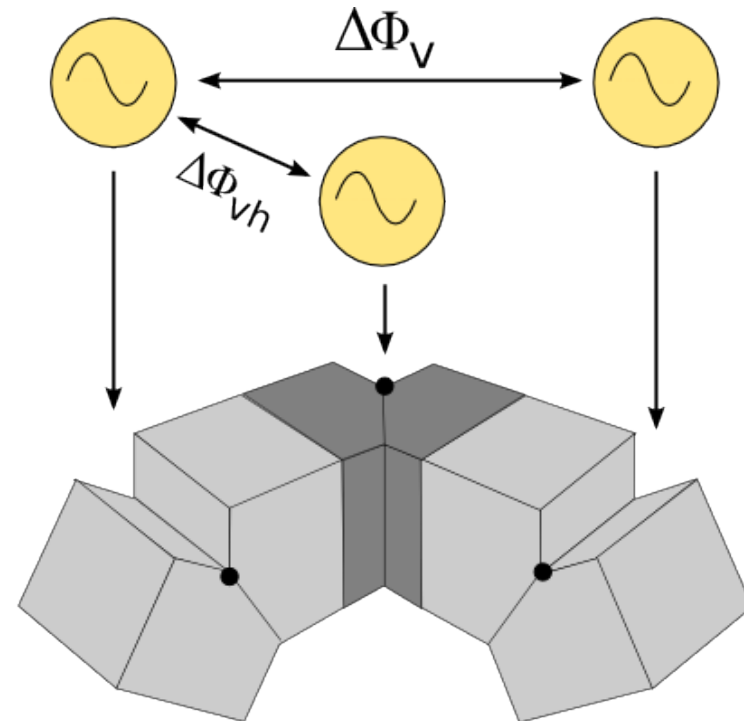
• 5 modos de caminar

Espacio de control



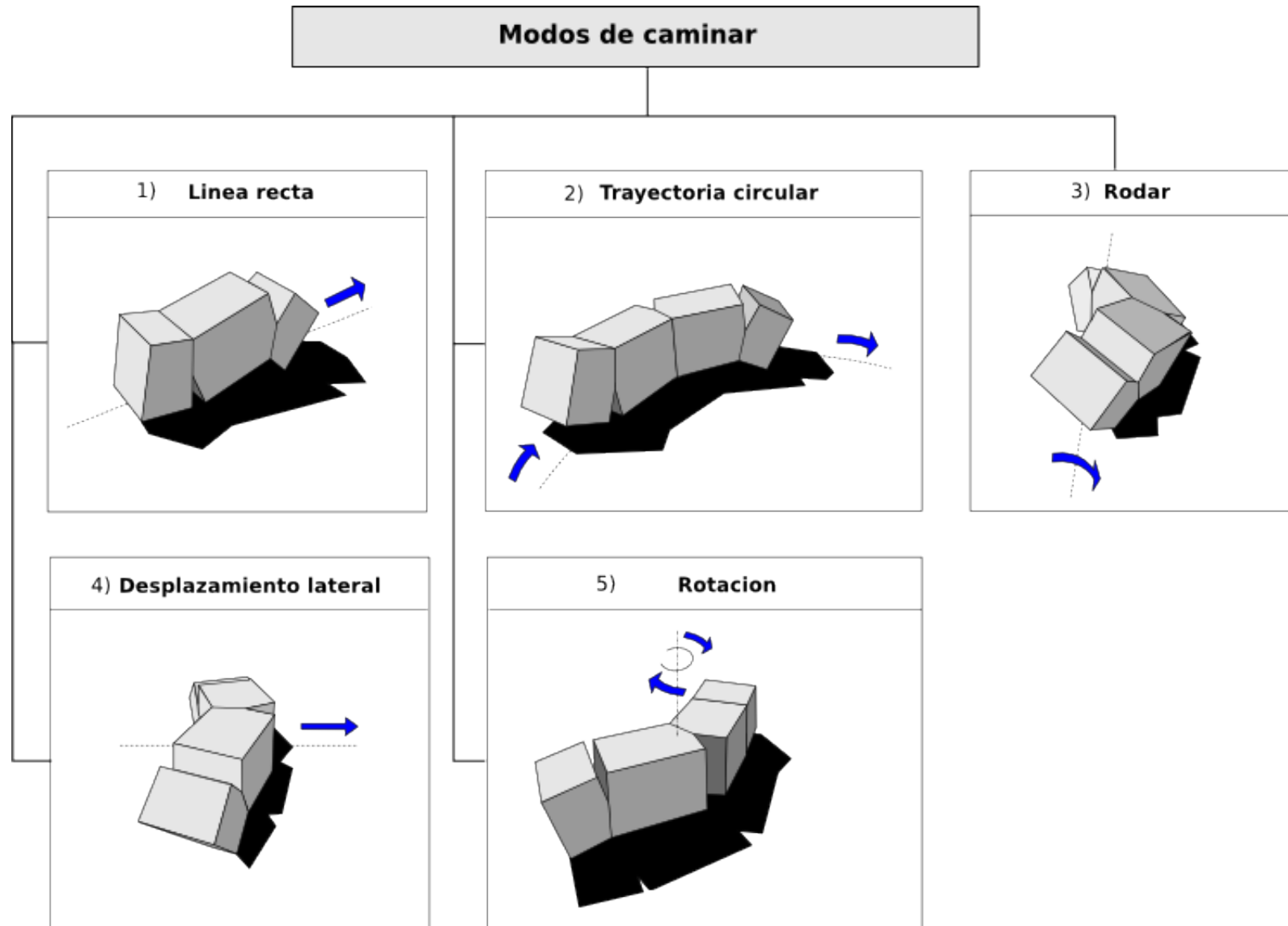
- Espacio de 2 dimensiones

$$A, \Delta\Phi$$



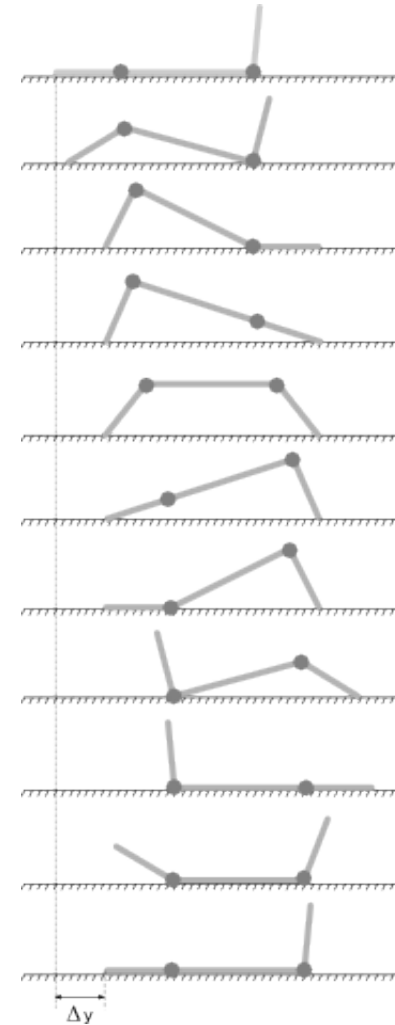
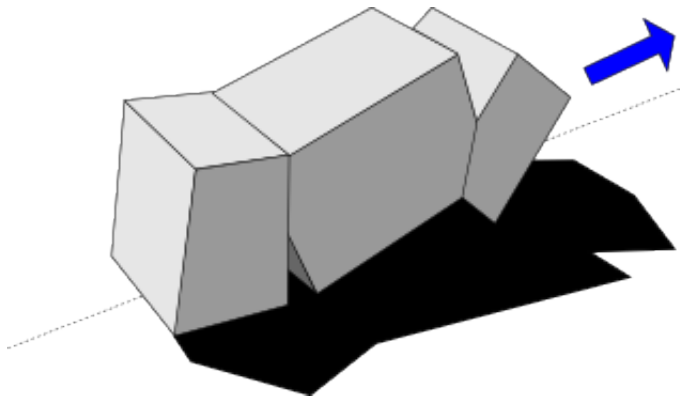
- Espacio de 4 dimensiones

$$A_v, A_h, \Delta\Phi_v, \Delta\Phi_{vh}$$



Modos de caminar (II): Línea recta

- Estudio del modelo alámbrico
- Mejor coordinación: $\Delta\Phi \in [108, 110]$
- Paso máximo: Mejor coordinación + $A=90$



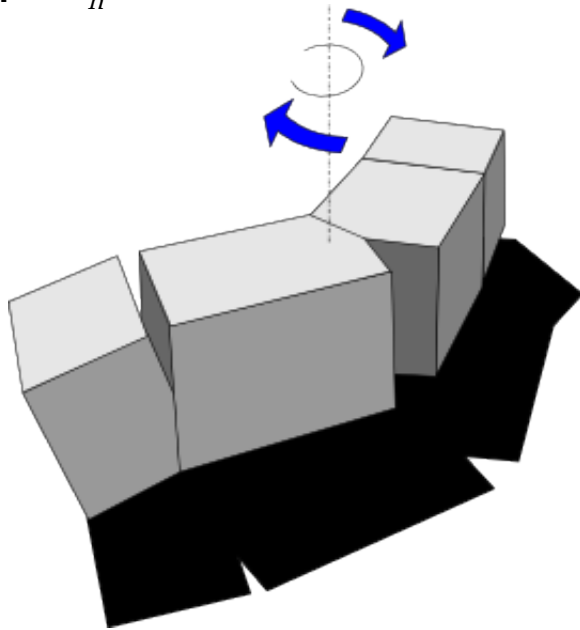
Modos de caminar (III)

Rotar

- Caracterización:

$$A_v \rightarrow 0, \Delta \Phi_v = 180, \Delta \Phi_h = 90$$

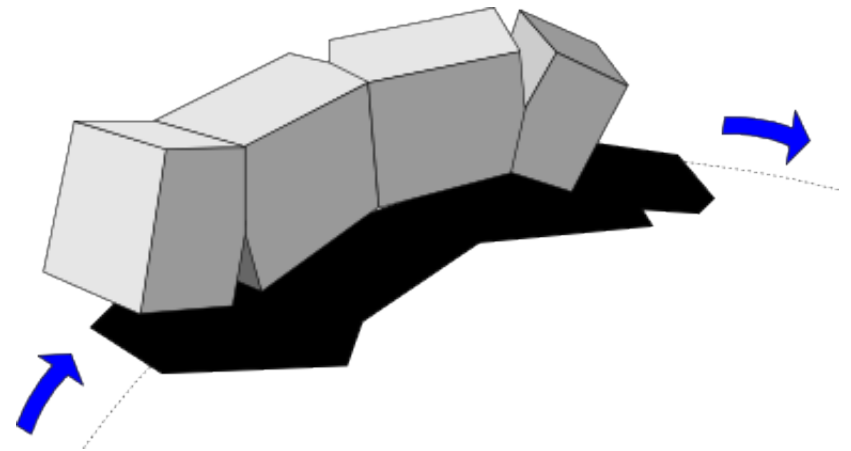
- DOF: A_h



Trayectoria en arco

- Caracterización: $\varphi_h = A_h$

- DOF: $A_v, A_h, \Delta \Phi_v$



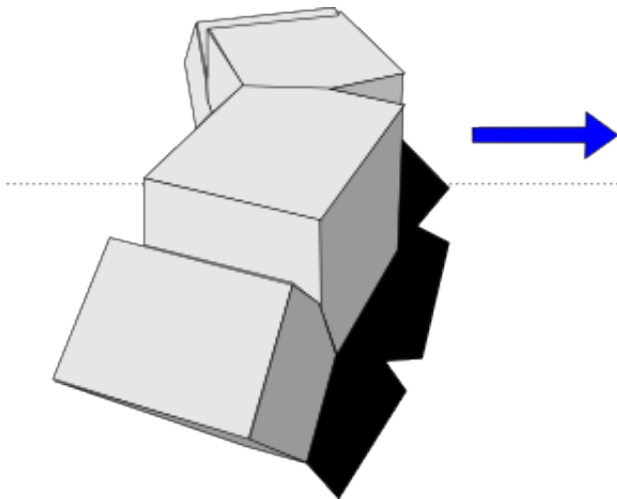
Modos de caminar (VI)

Lateral

- Caracterización:

$$A_v \rightarrow 0, \Delta \Phi_v = 0, \Delta \Phi_{vh} = 90, A_h < A_{min}$$

- DOF: A_h

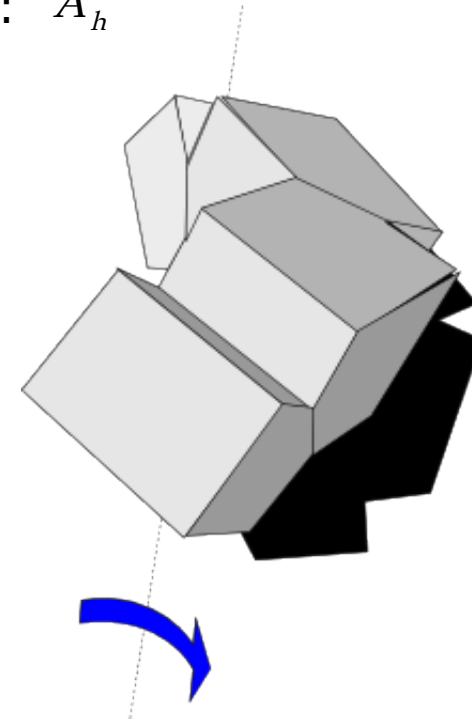


Rodar

- Caracterización:

$$A_v = A_h, \Delta \Phi_v = 0, \Delta \Phi_{vh} = 90, A_h > A_{min}$$

- DOF: A_h

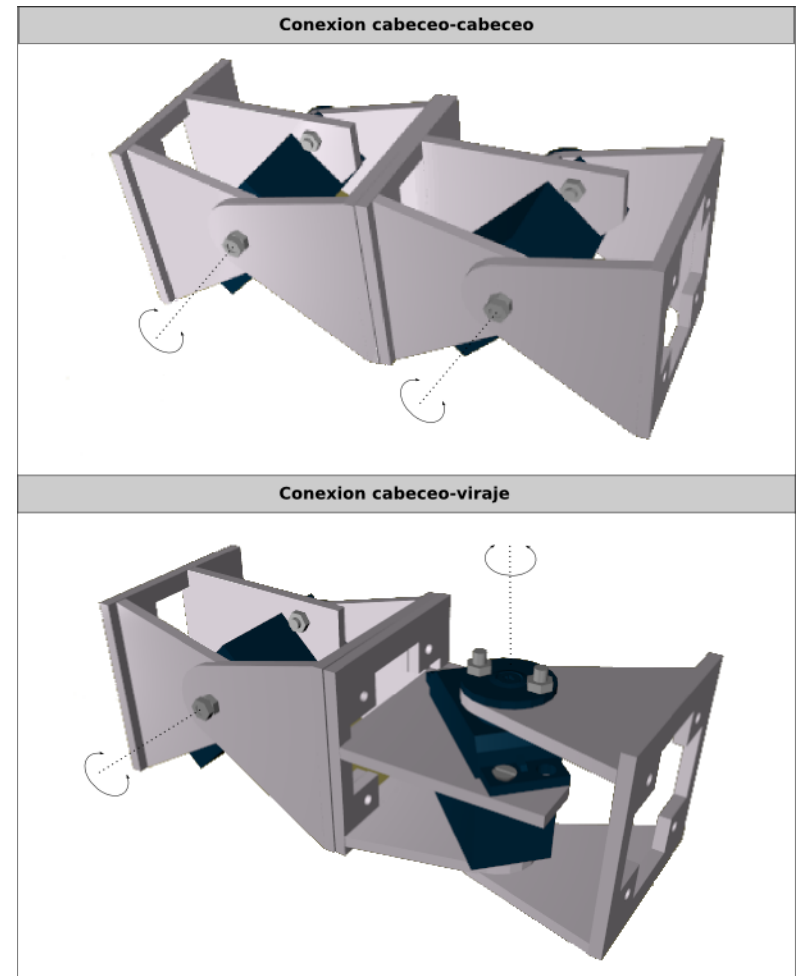
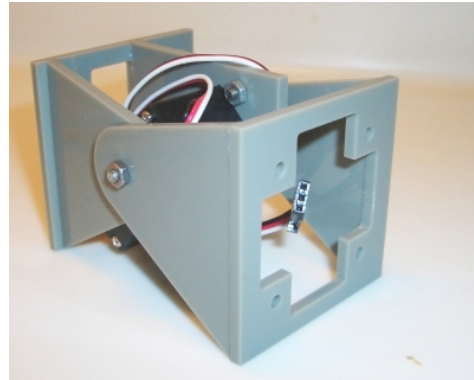
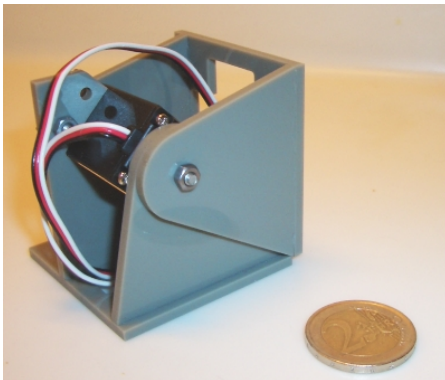


Contenidos

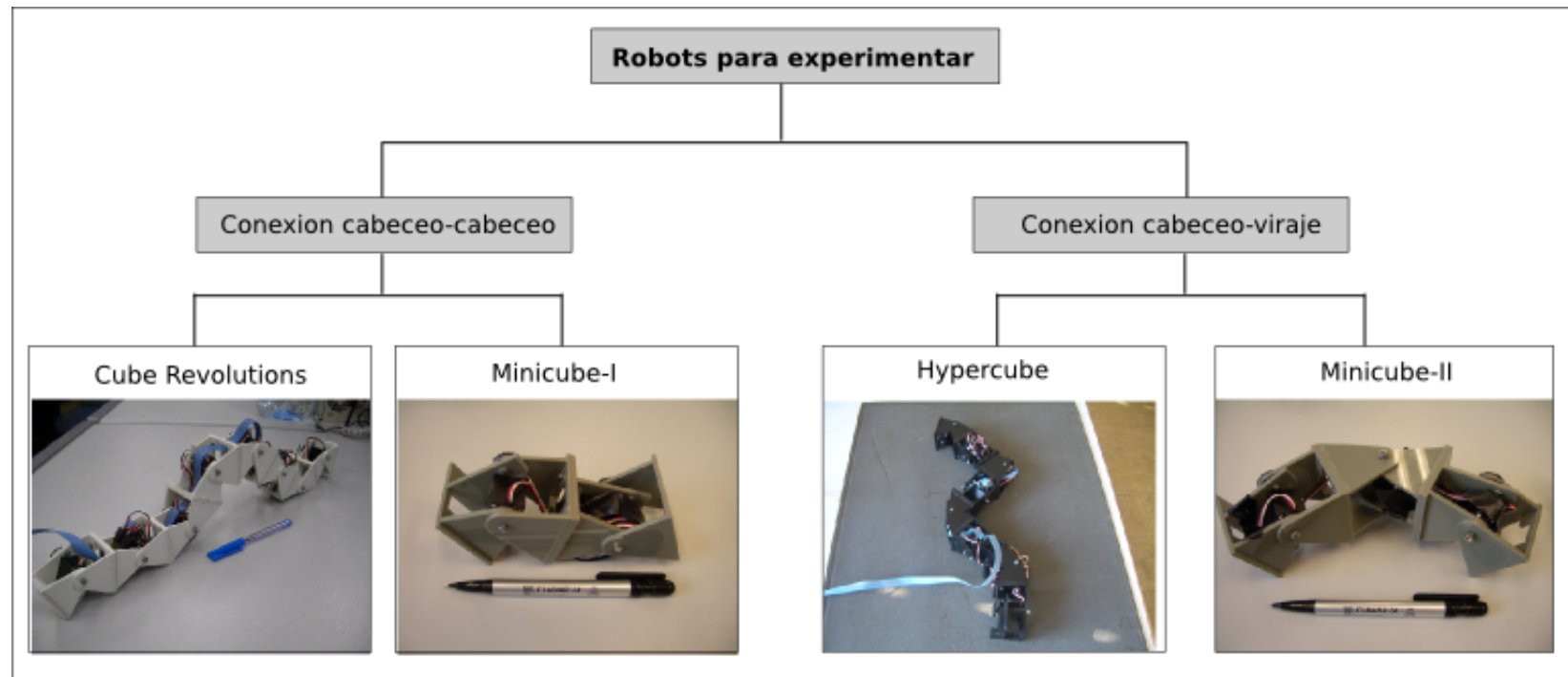
1. Introducción
2. Clasificación de robots modulares
3. Locomoción en 1D
4. Locomoción en 2D
5. Configuraciones mínimas
6. **Experimentos**
7. Conclusiones

Módulos Y1

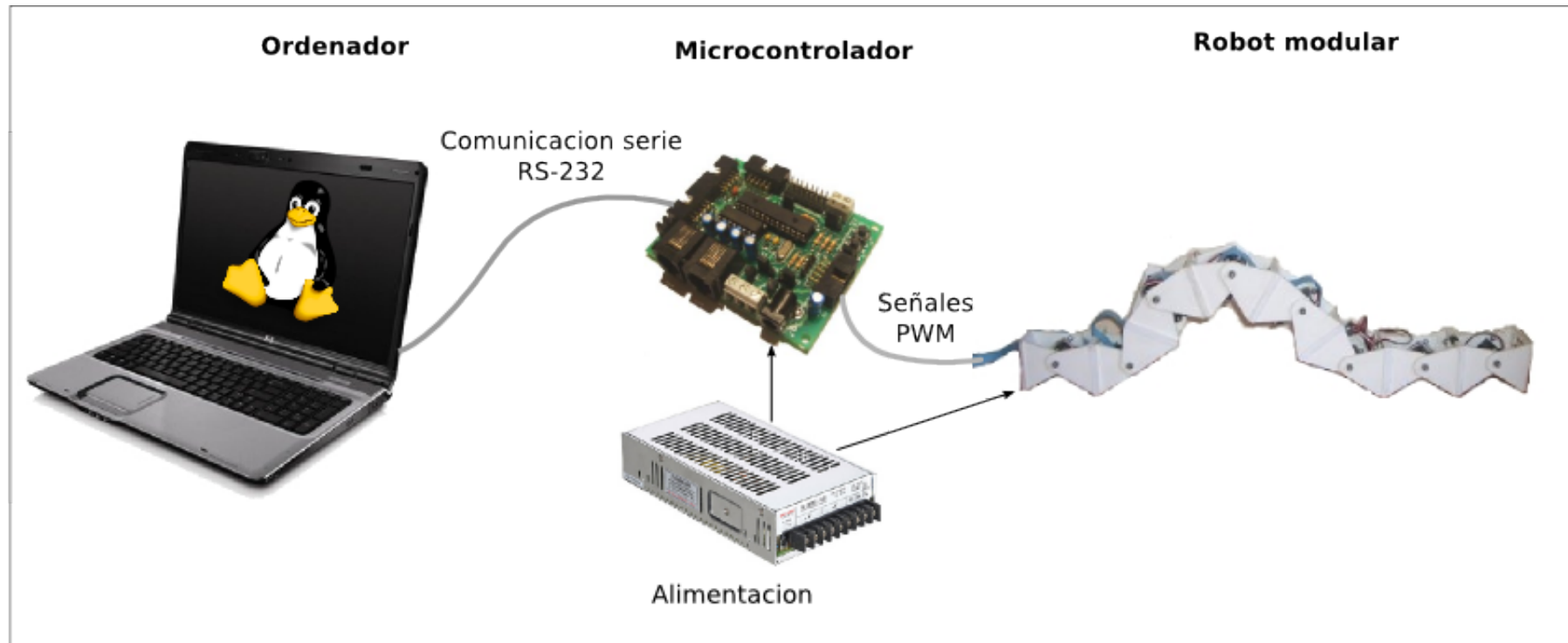
- Un grado de libertad
- Fácil construcción
- Baratos
- Libres



Robots modulares

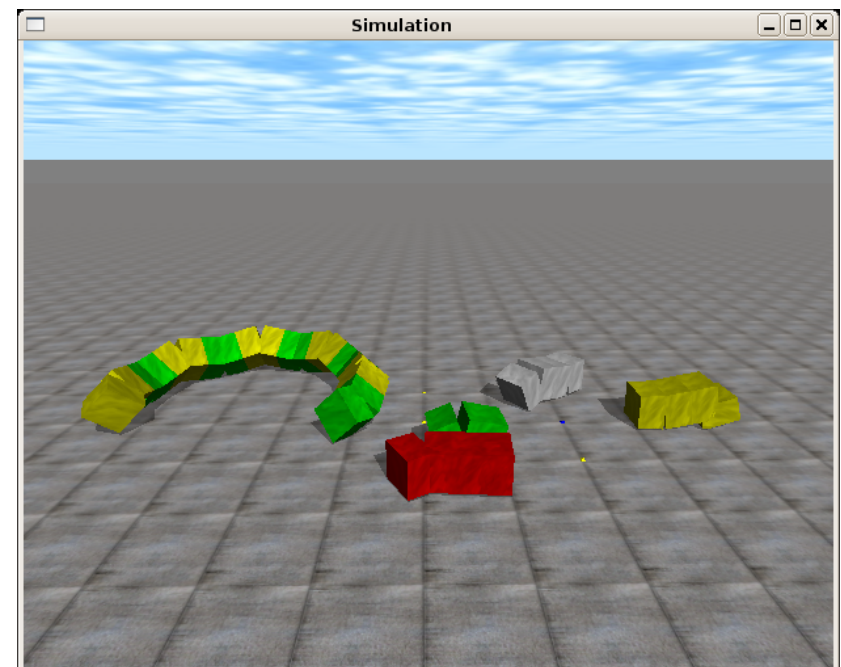
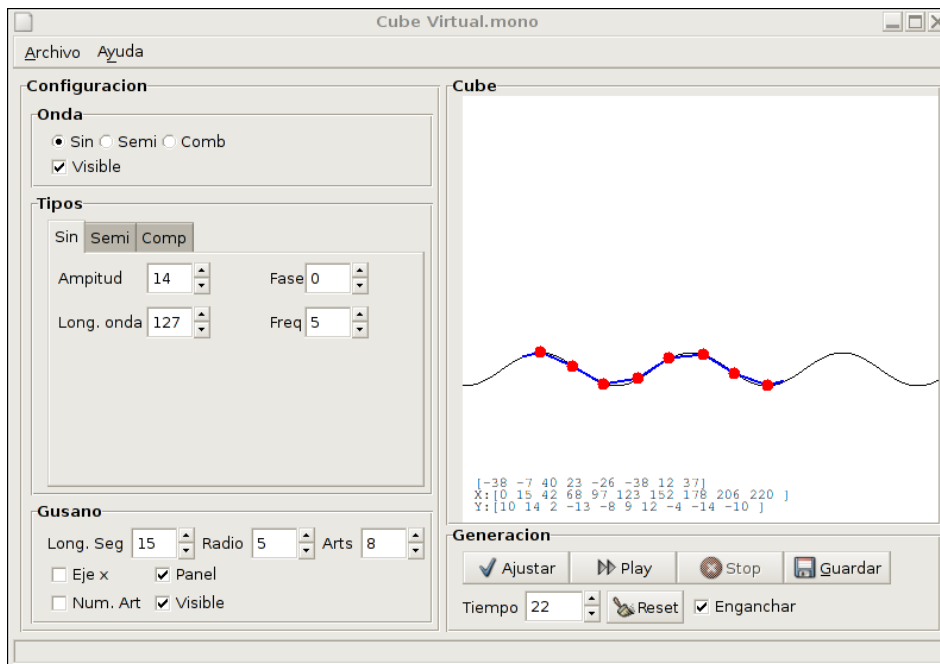


Esquema de control



Software

- Simulador para topologías de 1D (Basado en ODE)
- Algoritmos genéticos: PGAPack
- Modelos matemáticos en Octave/Matlab



Descripción experimentos

- **Simulación:**

- Locomoción modelos continuos ($M=32$)
- Caso estudio ($M=8$)
- Configuraciones mínimas
- Obtención de datos experimentales
- Comparación con modelo teórico

- **Robots reales:**

- Comprobación del movimiento
- Descarte de soluciones

Contenidos

1. Introducción
2. Clasificación de robots modulares
3. Locomoción en 1D
4. Locomoción en 2D
5. Configuraciones mínimas
6. Experimentos
7. **Conclusiones**

Resumen

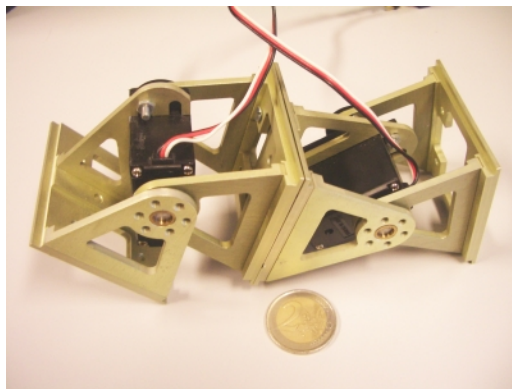
- Analizado el estado del arte
- Establecida una clasificación
- Hipótesis de partida: generadores sinusoidales
- Desarrollo de los modelos matemáticos
- Búsqueda de soluciones
- Comprobación mediante experimentos

Principales aportaciones

- **Viabilidad** del modelo de generadores sinusoidales
- Al menos **5 modos de caminar**
- **Dimensión mínima** del espacio de control: 2 y 5
- Tres **nuevos modos de caminar**: Rotación (en S y en U) y Lateral inclinado
- **Configuraciones mínimas**
- **Relaciones** entre parámetros generadores y la cinemática
- Resumen en **27 principios de locomoción**

Trabajos futuros

- Modelos energéticos
- Incorporación de realimentación
- Nuevos módulos: **GZ-I**
- Estudio locomoción topologías 2D
- Aplicación a orugas trepadoras
- Materialización de comportamientos (JDE)



Robótica Modular y locomoción: Aplicación a Robots Ápodos

D. Juan González Gómez
Tesis Doctoral



Director: Dr. Eduardo Boemo Scalvinoni