

# Arquitecturas de Control de Alto Nivel

Dr José Martínez Carranza  
[carranza@inaoep.mx](mailto:carranza@inaoep.mx)

Dr Alejandro Gutiérrez Giles  
[alejandro.giles@inaoep.mx](mailto:alejandro.giles@inaoep.mx)

Primavera 2024

Coordinación de Ciencias Computacionales, INAOE

# Proyectos de la Materia



## Proyectos Individuales.

**Pilotos neuronales.**

**SLAM visual.**

Control para trayectorias ágiles.

**Modelos de lenguaje largo para navegación.**

**Generación sintética de imágenes (NeRFs/Gaussian Splatting) para entrenamiento en simulación.**

Modelos generativos para búsqueda y navegación.



## Proyecto colectivo.

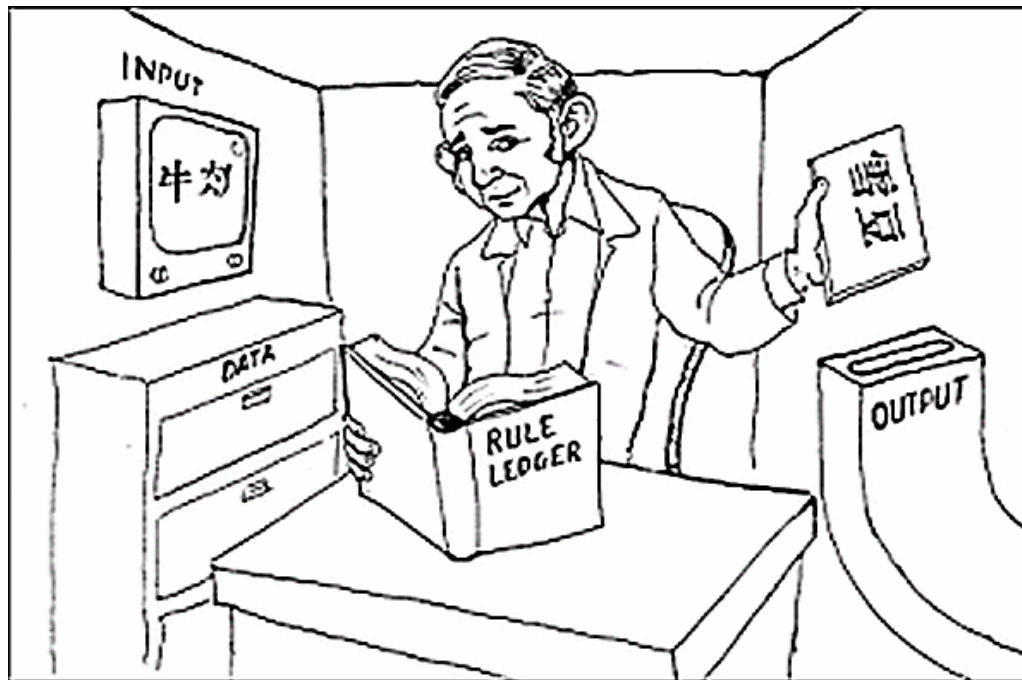
Misiones del IMAV 2023.

Construcción de robot cuadrupedo autónomo.

**Dron autónomo utilizando controladoras px4/beta-fly y ROS 2 (control básico).**

**¿Qué hacer para que un robot exhiba un comportamiento inteligente?**

## El cuarto chino de Roger Penrose [9]





TRADUCCIÓN POR CARTOÓN DEL DÍA

TOP MEMES NUEVOS  
poorludrawnlines.com  
memesnuevos.top



**Dimensiones: 121 cm × 49 cm × 52 cm (48 in × 19 in × 20 in)**

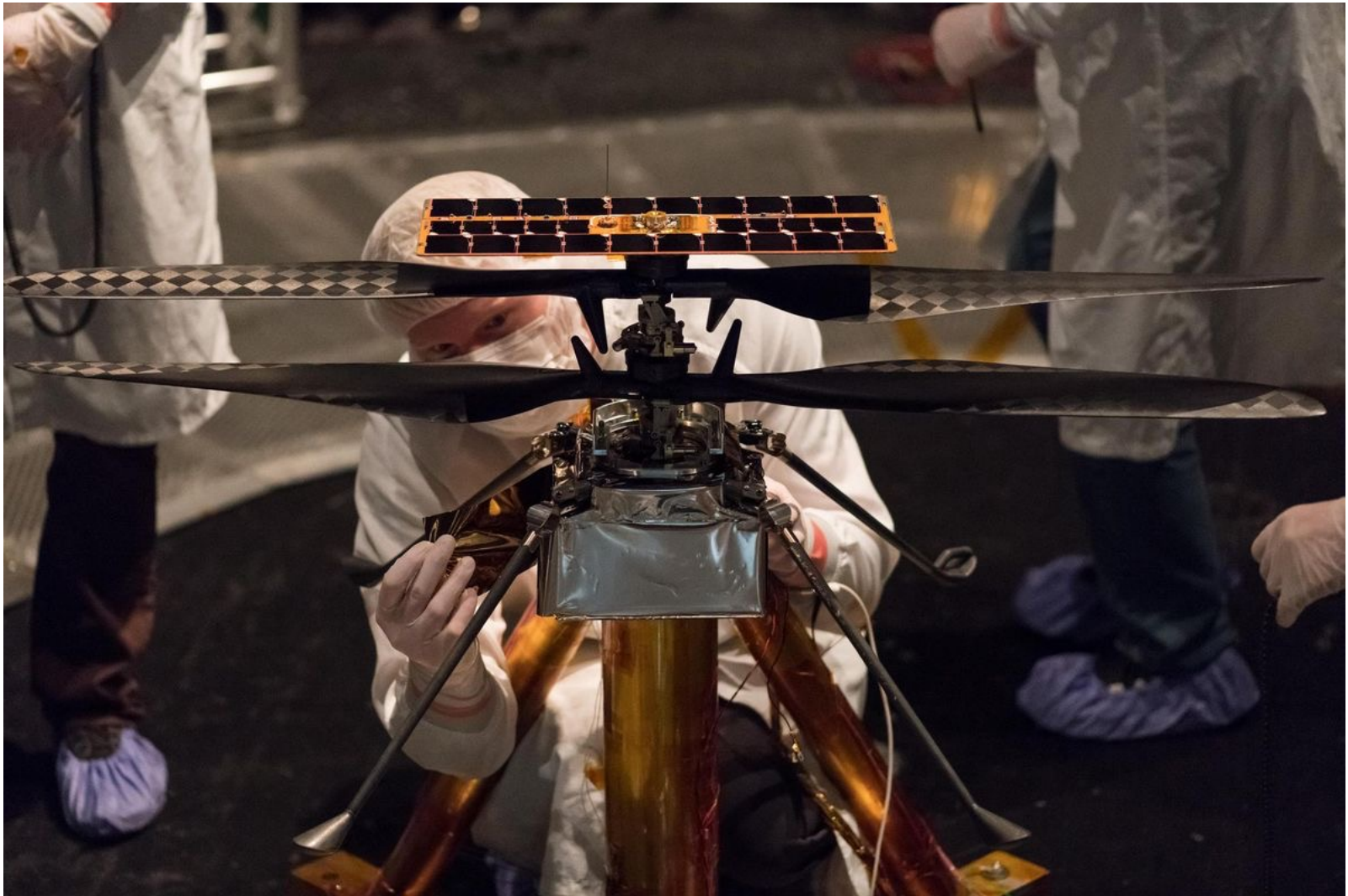
## Ingenuity: Damage puts end to ground-breaking Mars helicopter mission

3 days ago

Nasa Perseverance Mars rover



<https://insideunmannedsystems.com/inside-the-ingenuity-helicopter-teamwork-on-mars/>



<https://spectrum.ieee.org/nasa-designed-perseverance-helicopter-rover-fly-autonomously-mars>



<https://spectrum.ieee.org/nasa-designed-perseverance-helicopter-rover-fly-autonomously-mars>





## The Mars copter's flight control system consists of four main subsystems:

- Mode Commander, setting the overall mode for the flight control system.
- The Guidance subsystem, providing reference trajectories for the flight path.
- The Navigation subsystem, giving estimates of the vehicle state.
- The Control subsystem, commanding the actuators based on the reference trajectories and the vehicle state.



---

**The navigation sensors Ingenuity carries are:**

Bosch Sensortech BMI160 IMU, for measuring 3-axis accelerations at 1600 Hz and angular rates at 3200 Hz.

---

Garmin Lidar-Lite-V3 laser rangefinder (LRF), for measuring distance to the ground at 50 Hz.

---

Downward-looking 640 x 480 grayscale camera with an Omnivision OV7251 global-shutter sensor, providing images at 30 Hz.

---

MuRata SCA100T-D02 inclinometer, for measuring roll and pitch attitude prior to flight.

---

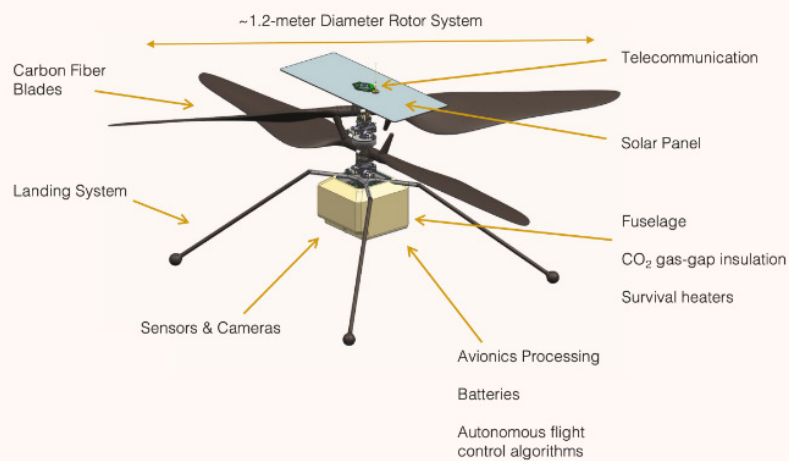
All are commercial off-the-shelf (COTS) miniature sensors, largely developed for the cell phone and lightweight drone markets.

---

Ingenuity also carried a second camera, a 13-megapixel color camera with horizon-facing view for terrain images, not used for navigation.

---

## Anatomy of Mars Helicopter



[https://www.jpl.nasa.gov/news/press\\_kits/ingenuity/landing/mission/spacecraft/](https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/ingenuity/landing/mission/spacecraft/)

## Ingenuity's avionics system architecture:

- A radiation-tolerant field-programmable gate array (FPGA) function routes sensor data and traffic between other computing elements and performs low-level actuator control. Most of the flight control software is hosted on the flight computer (FC).
- A separate navigation computer (NC), a 2.26 GHz quad-core Qualcomm Snapdragon 801 processor, provides the throughput for vision-based navigation. On the NC, one core is devoted to camera-image processing and another to the navigation filter, while the remaining cores are used for other activity.
- The visual-inertial navigation system provides the control system with real-time estimates of the vehicle state: position, velocity, attitude and angular rates. The state estimate is based on fusing information from the onboard IMU, inclinometer, LRF and navigation camera.



Because of the time-lag challenge, Ingenuity has to perform on its own. Autonomously, in other words.

Radio signals from NASA Command take 15 minutes and 27 seconds to travel the 173 million miles (278.4 million kilometers) to Mars.

Once on the surface, the more well-endowed Perseverance rover served as a communications relay link so the helicopter and Mission Team on Earth could communicate. It passed flight instructions from NASA's Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, California, to Ingenuity.

From a Martian hillock 65 meters away, the four-wheeled rover observed and recorded its four-bladed offspring's history-making flights.



## The MAVeN navigation algorithm:

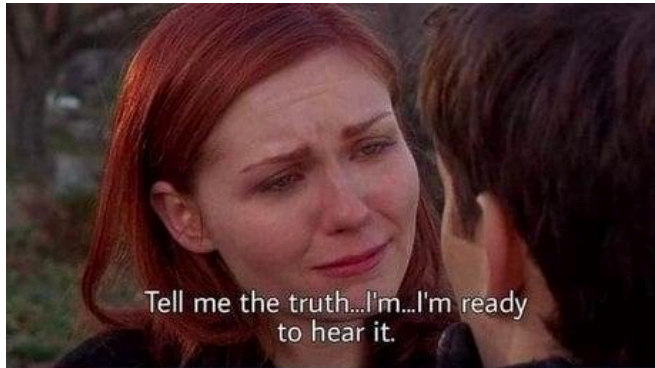
- Implemented as an Extended Kalman Filter (EKF) that also uses the difference between the predicted and measured LRF range.
- MAVeN has a state vector with seven components: position, velocity, attitude, IMU accelerometer bias, IMU gyro bias, base image position and base image attitude, for a total of 21 scalar components.
- MAVeN only tracks features between the current search image and the base image. Because the base frame is frequently reset as features are lost, MAVeN is effectively a long-baseline visual odometry algorithm.
- The relative position and attitude between the two images are measured, but not the absolute position and attitude.



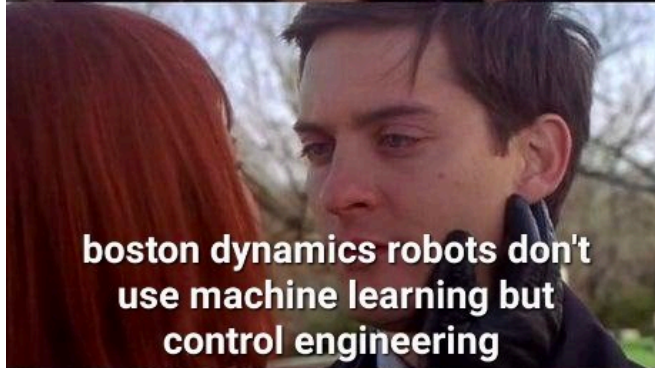
Feature detection in base images is performed with an implementation of the FAST algorithm [30], which selects corner-like features that have sufficient contrast between a center pixel and a contiguous arc surrounding the center pixel.

An algorithm estimates the displacement of a template from one image to the next, using a gradient-based search algorithm that minimizes the difference in pixel intensity





Tell me the truth...I'm...I'm ready  
to hear it.



**boston dynamics robots don't  
use machine learning but  
control engineering**





# Mecanismos de control

Enfoques para el control de robots:

- paradigmas**, conjuntos de suposiciones que caracterizan la manera de resolver problemas en robótica.
- técnicas**, conjuntos de procedimientos y recursos para resolver clases de problemas.

Ningún paradigma es superior a otro, cada uno de ellos representa una forma particular de comprender y abordar un problema (Murphy 2000).



# Mecanismos de control

Paradigmas para el control de un robot:

- basado en el conocimiento o **deliberativo**
- basado en el comportamiento, reactivo o **situado**
- **híbrido** o deliberativo/reactivo
- **probabilista.**



# Mecanismos de control

## Enfoque deliberativo

Primer paradigma propuesto para el control de un robot (1967- ).

Se basa en una visión introspectiva sobre cómo los humanos pensamos y tomamos decisiones, e.g. *veo una puerta, decido pasar a través de ella.*

Salón de la fama: Shakey (Nilsson 1984), Hilare (Khatib & Simeon 1997), P3 y Asimo (Honda-url).





↑ Hilare (LAAS, Francia)  
↔ Shakey (SRI, EEUU)

Asimo (Honda, Japón) ⇔



# Mecanismos de control

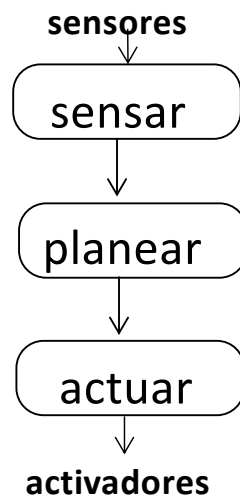
## Enfoque deliberativo

Las funciones de un robot pueden ser divididas en categorías generales:

- SENSAR**: tomar la información proveniente de los sensores y producir una salida filtrada útil a otras funciones (i.e. un modelo del mundo)
- PLANEAR**: tomar la salida de la función previa y conjuntarla con información propia, con objeto de producir una o más tareas que serán ejecutadas por el robot (i.e. un plan de acción)
- ACTUAR**: enviar comandos de salida a los activadores y efectores del robot, de acuerdo al plan previamente elaborado.



# Mecanismos de control



## Enfoque deliberativo

Esquema lineal, ciclo **S-P-A** (también S-M-P-A) basado en la planificación.

El robot percibe el mundo, planea la acción a realizar y la ejecuta.

La información percibida es representada en un modelo global del mundo.

Se presupone que no ocurrirán cambios significativos en el mundo durante la fase de planificación.



# Mecanismos de control

## Enfoque situado

Nace en oposición al enfoque deliberativo (1986 - ).

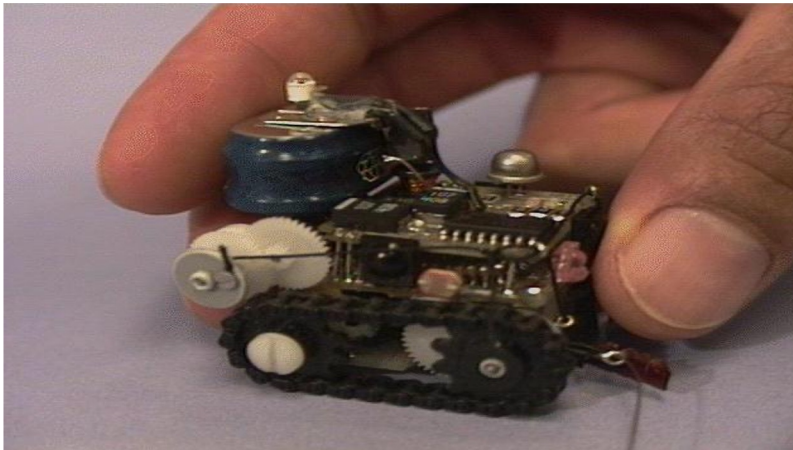
Se basa en modelos biológicos y psicológicos para explicar el comportamiento (inteligente) en diversos organismos vivos.

A la base de un comportamiento complejo se encuentran conductas básicas de tipo

**estímulo ⇒ respuesta**

Salón de la fama: Genghis (Brooks 1989).



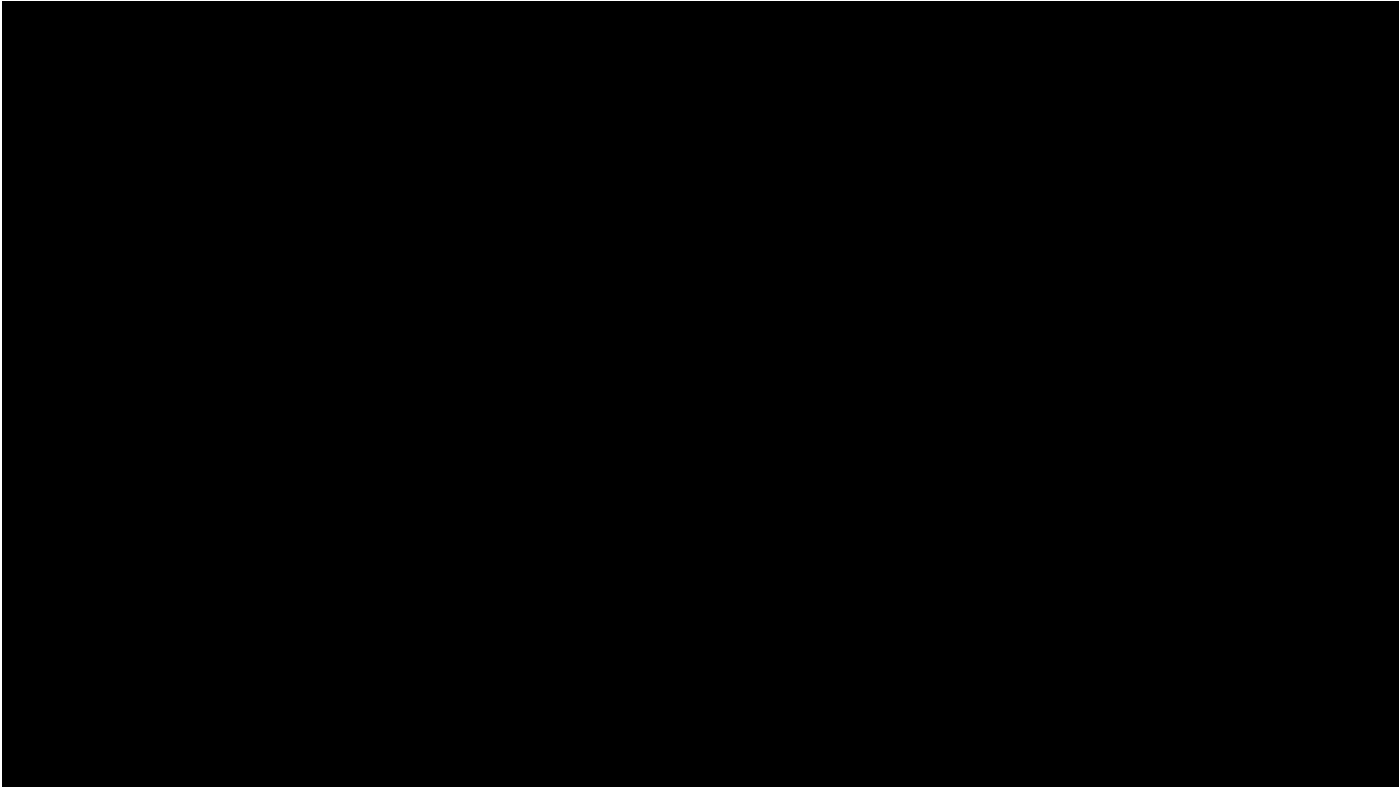


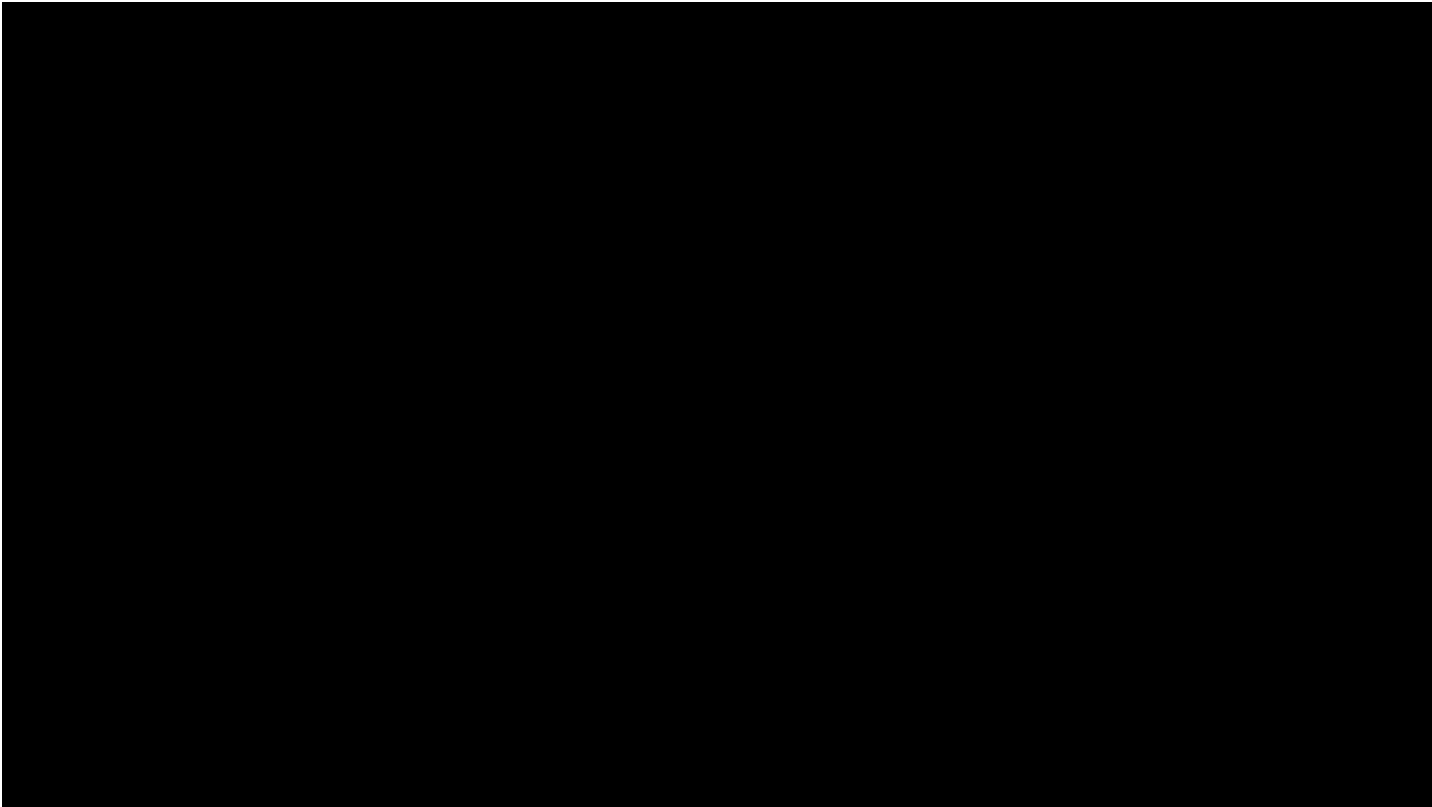
**Genghis &  
Ant (MIT, EEUU)**





***Robot***<sup>®</sup>





**Rodney Brooks [11]**  
2015 IEEE Robotics and  
Automation Award



**Rodney Brooks [11]**  
2015 IEEE Robotics and  
Automation Award

# Mecanismos de control

## Enfoque situado

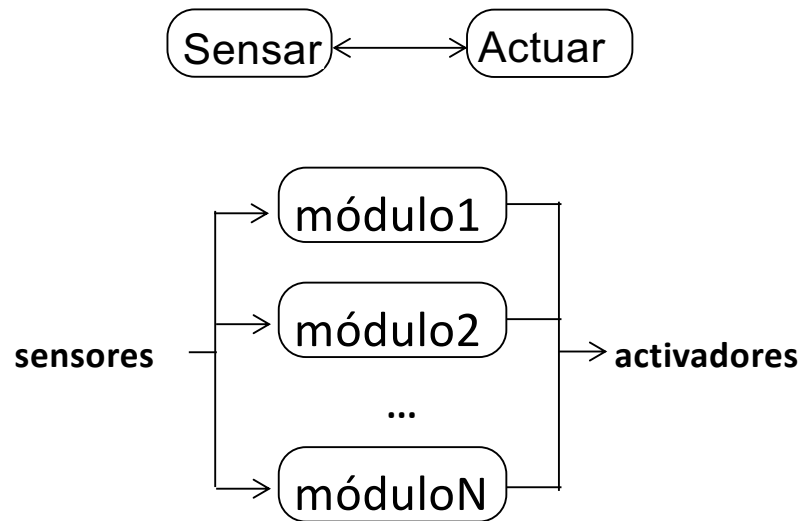
El funcionamiento de un robot es modelado como un conjunto de módulos o comportamientos, cada uno de los cuales está ligado a los sensores y a los activadores del robot.

Las funciones de sensado y actuación se encuentran descentralizadas en una multitud de módulos.

Los módulos son procesos concurrentes que dependen del sensado local. Estos módulos son dispuestos cuidadosamente con objeto de evitar interferencias entre ellos.



# Mecanismos de control



## Enfoque situado

Esquema vertical basado en la percepción, ciclo **S-P**.

El robot percibe el mundo y ejecuta, en respuesta, la acción que parezca más apropiada.

La información percibida no se integra en ningún modelo del mundo. Para el robot, *el mundo es su mejor modelo* (Brooks 1991).



# Mecanismos de control

## Enfoque híbrido

Nace de la fusión de los paradigmas deliberativo y reactivo (1990 - ).

Se intenta tomar lo mejor de cada paradigma:

- comportamiento deliberativo, orientado a metas

- comportamiento reactivo, de rápida respuesta y adaptable a los cambios del mundo.



# Mecanismos de control

## Enfoque híbrido

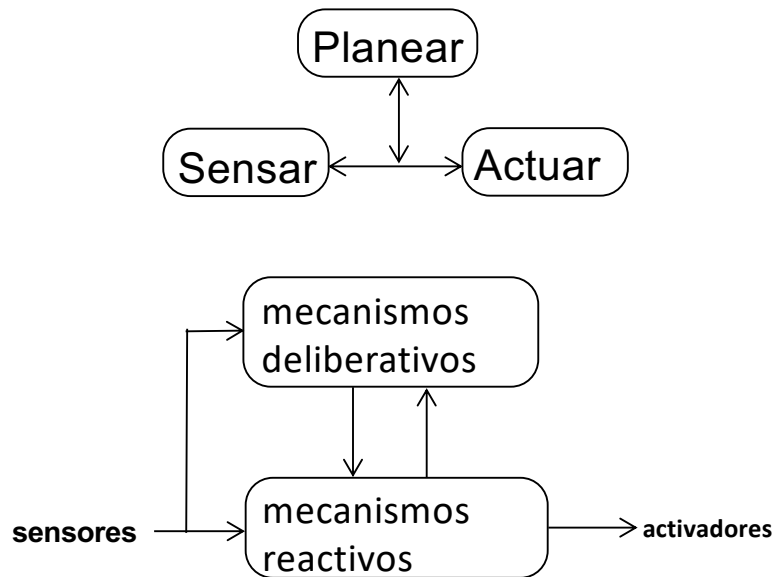
Se mezclan las reglas deliberativas y reactivas en dos capas de control ejecutándose en paralelo, pero a diferentes velocidades:

- una **capa reactiva** encargada del control de las acciones de base (e.g. avanzar, evitar obstáculos).
- una **capa deliberativa** encargada de planificar acciones más elaboradas (e.g. dirigirse a un sitio preciso, reconocer visualmente marcas y objetos)

La información de los sensores es accesible a los módulos de comportamiento, pero también al planificador para la construcción de un modelo del mundo orientado a tareas.



# Mecanismos de control



## Enfoque híbrido

Esquema en capas, ciclo **P, S-A**

Un planificador traza las acciones del robot, en función de sus objetivos globales.

Los planes son secuencias de acciones de base, ejecutables por módulos programados según el esquema reactivo.

Ambas capas están comunicadas, para informarse sobre las acciones a realizar (delib.⇒ react.) y sobre su ejecución (react.⇒ delib.).



# Mecanismos de control

## Enfoque probabilista

Más reciente paradigma propuesto para el control de un robot (1997 - ).

Se basa en la representación de la información proporcionada por los sensores a través de **densidades de probabilidad**, y en la explotación de esa información considerando la **incertidumbre** bajo la cual opera el robot.

No se busca más que el robot ejecute en todo momento la única y mejor acción.



# Mecanismos de control

## Enfoque probabilista

Este enfoque considera de forma explícita la variabilidad, el ruido y las limitaciones de los sensores físicos, así como la dinámica de los ambientes reales.

Salón de la fama: Rhino y Minerva (Thrun et al. 1999; Thrun 2000)

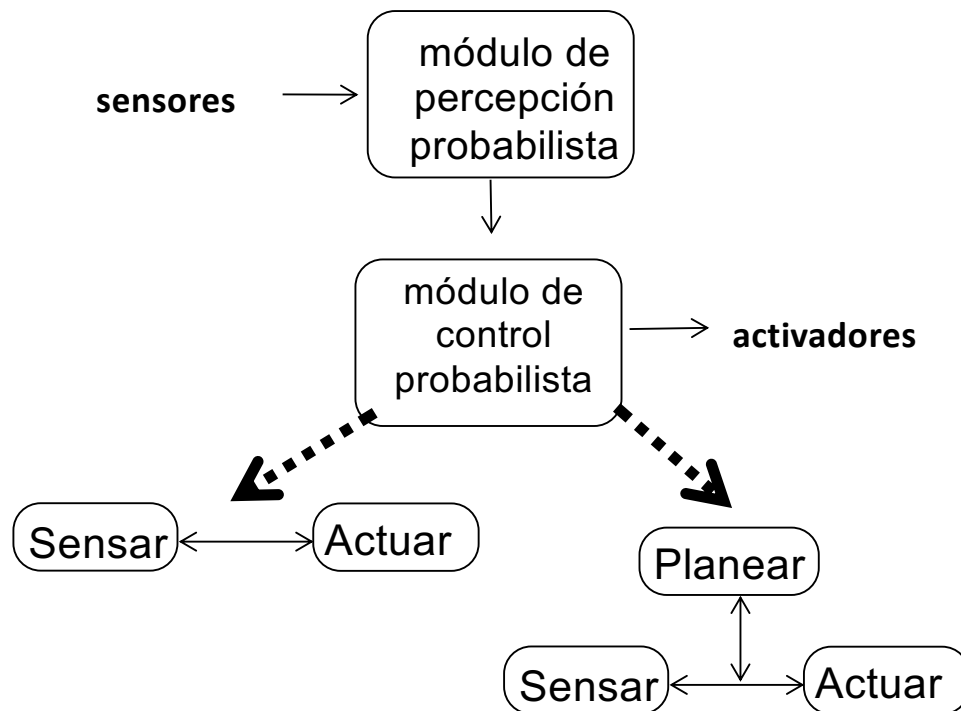




↑Rhino &  
↔Minerva, robots guías de museo (Carnegie Mellon University, USA; University of Bonn, Aachen University of Technology, Alemania)



# Mecanismos de control



## Enfoque probabilista

Esquema flexible, que puede adaptarse a esquemas **S-P** o bien **P, S-A**.

El robot percibe el mundo y calcula una distribución de probabilidades sobre lo que puede suceder en el mundo.

Una vez formulada esta distribución se toman decisiones, considerando la incertidumbre actual o bien, anticipando incertidumbre en el futuro.

# Mecanismos de control

¿Cuál enfoque conviene utilizar?

El paradigma a elegir depende de diversos factores:

el **problema a resolver**, *e.g.* ambientes dinámicos requieren robots que actúen en un tiempo de respuesta adecuado, mientras que otro tipo de ambientes (*e.g.* asistencia médica, control automático) requieren robots que ejecuten acciones de alta precisión.

el **perfil del diseñador**.



# Arquitecturas

Dentro de cada enfoque se han propuesto diversas **arquitecturas** o **modelos** para el control de robots.

Una arquitectura refleja una manera de organizar un sistema de control.

Las arquitecturas de control se ocupan de diseñar el comportamiento global de un robot.

# Mecanismos de control

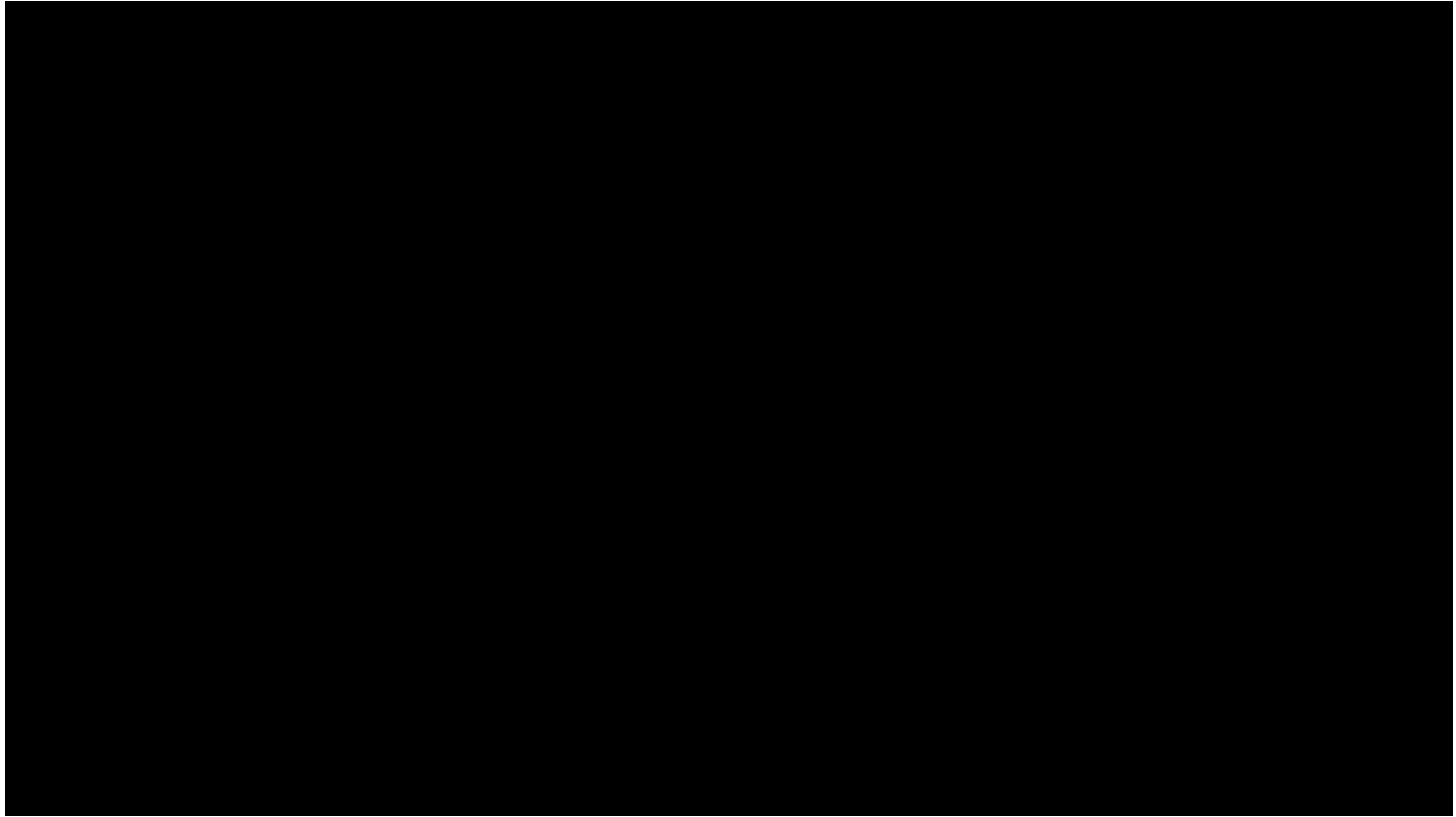
Problemas abordados:

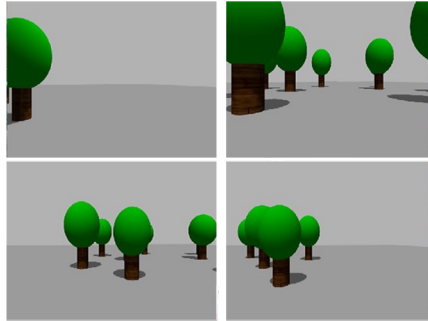
- ☞ ¿Cómo es el mundo para el robot?, ¿cómo y qué percibe?
- ☞ ¿Cómo adquirir esta percepción del mundo?, ¿cuáles son los estados del mundo que el robot distingue?
- ☞ ¿Cómo asociar las entradas de los sensores con secuencias de salida para los activadores?
- ☞ ¿Cómo organizar estas asociaciones de manera que el comportamiento global del robot sea coherente, orientado a metas?

# Maquina de Estados

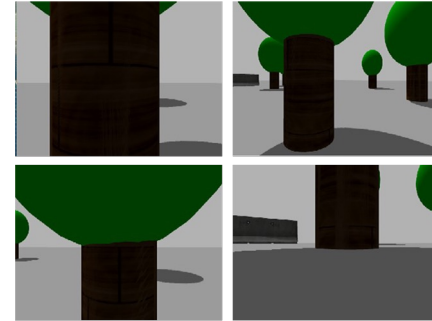
- Permite organizar las señales de control de acuerdo a ciertos estados del sistema.
- Se puede utilizar a diferentes niveles de abstracción.
- Ejemplo: aumento/decremento de velocidad.
- Ejemplo: cambio de dirección.
- Ejemplo: diferentes rutinas de navegación.



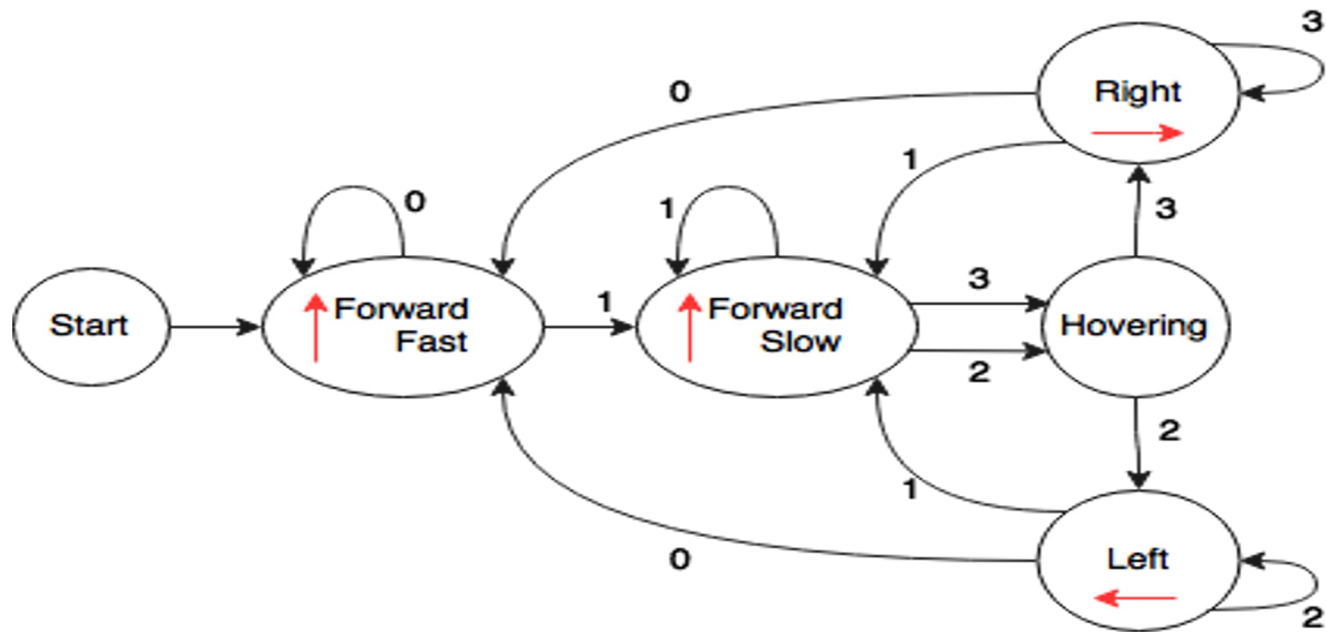




Far: 0

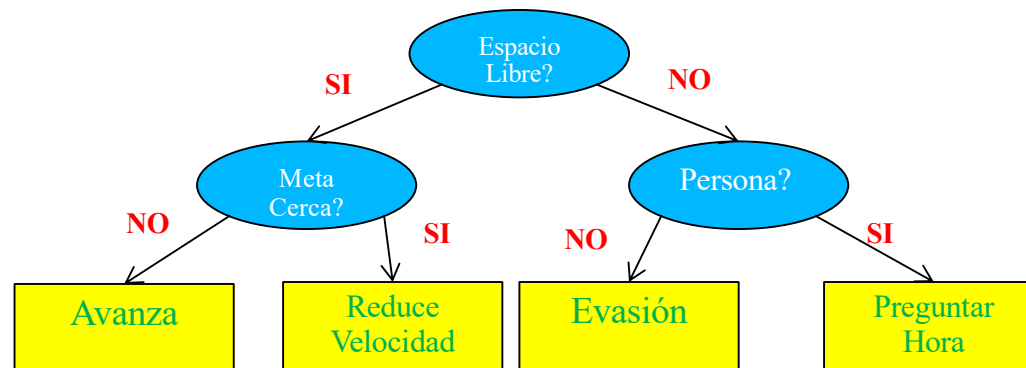


Close: 1



# Árboles de Decisión

- Utilizados para tomar decisiones mediante las observaciones del ambiente.
- Las observaciones a realizar dependen de las observaciones anteriores, cuya jerarquía (orden) se establece a través de las ramas del árbol.
- Los nodos indican la observación (pregunta) a realizar y la respuesta llevará a realizar (solicitar) la siguiente observación de tal manera que cuando se llegue a una hoja, esa será la decisión que el sistema tomará (control de alto nivel).



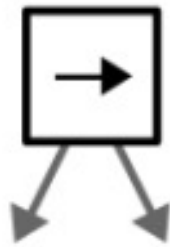
**Sequence**

**Fallback**

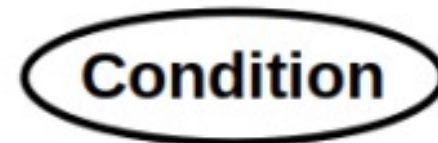
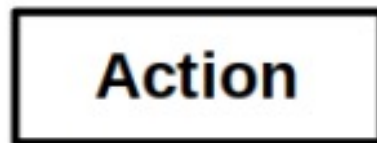
**Parallel**

**Decorator**

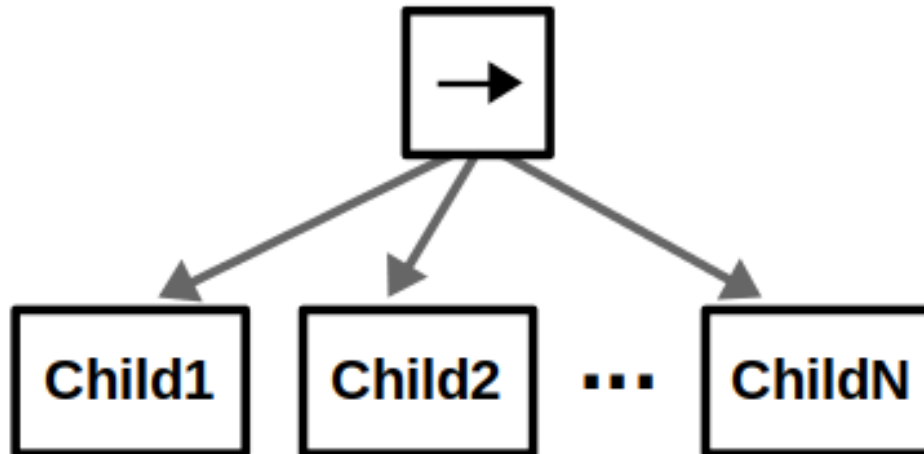
Control  
Nodes



Execution  
Nodes

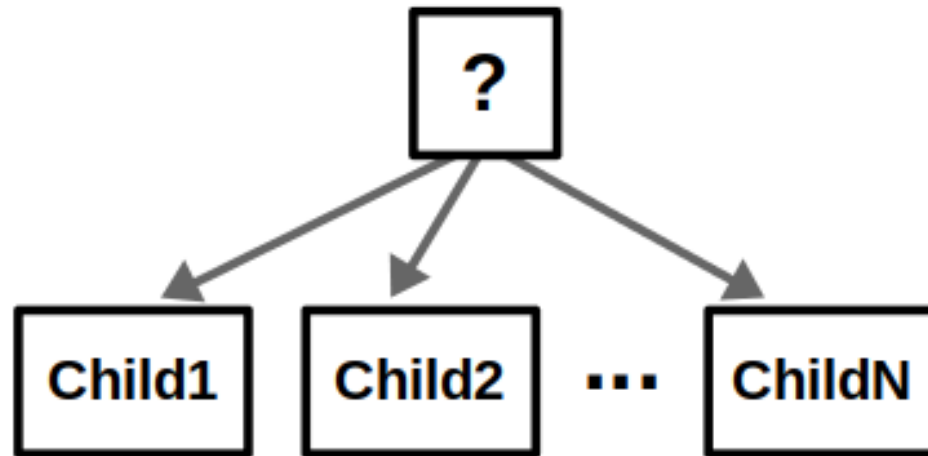


## Sequence



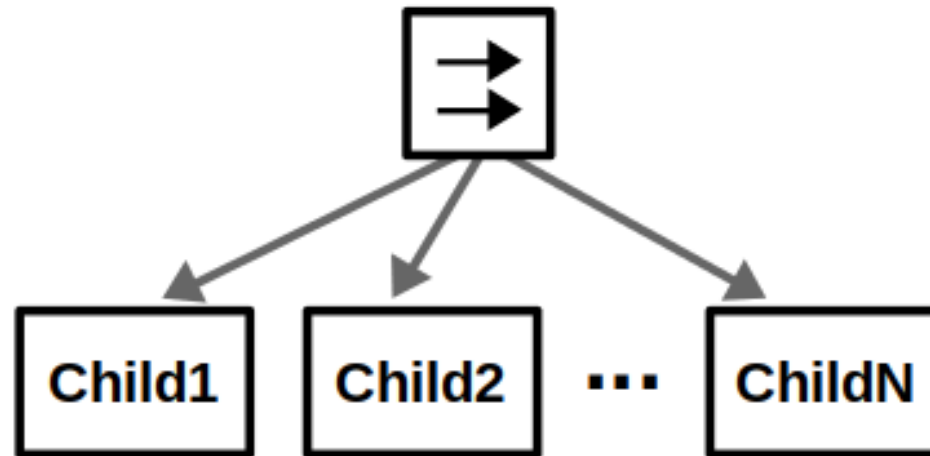
Ejecuta cada nodo hijo en orden hasta que uno genera una señal de fallo. Entonces, el padre generará una respuesta de éxito sólo si todos los nodos hijos generaron una señal de éxito.

## Fallback



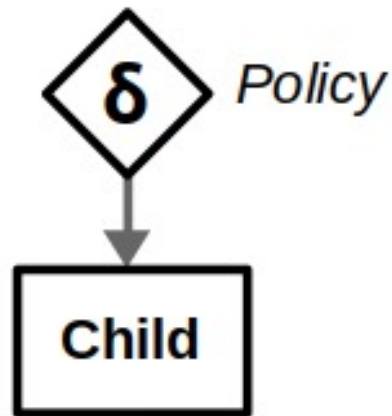
Ejecuta cada nodo hijo en orden hasta que uno genera una señal de éxito. Entonces, el padre generará una respuesta de éxito si algún nodo hijo genera una señal de éxito.

## Parallel



Ejecuta nodos hijos en paralelo. El nodo padre regresará un valor de éxito si al menos M nodos hijos regresan una señal de éxito.

## Decorator

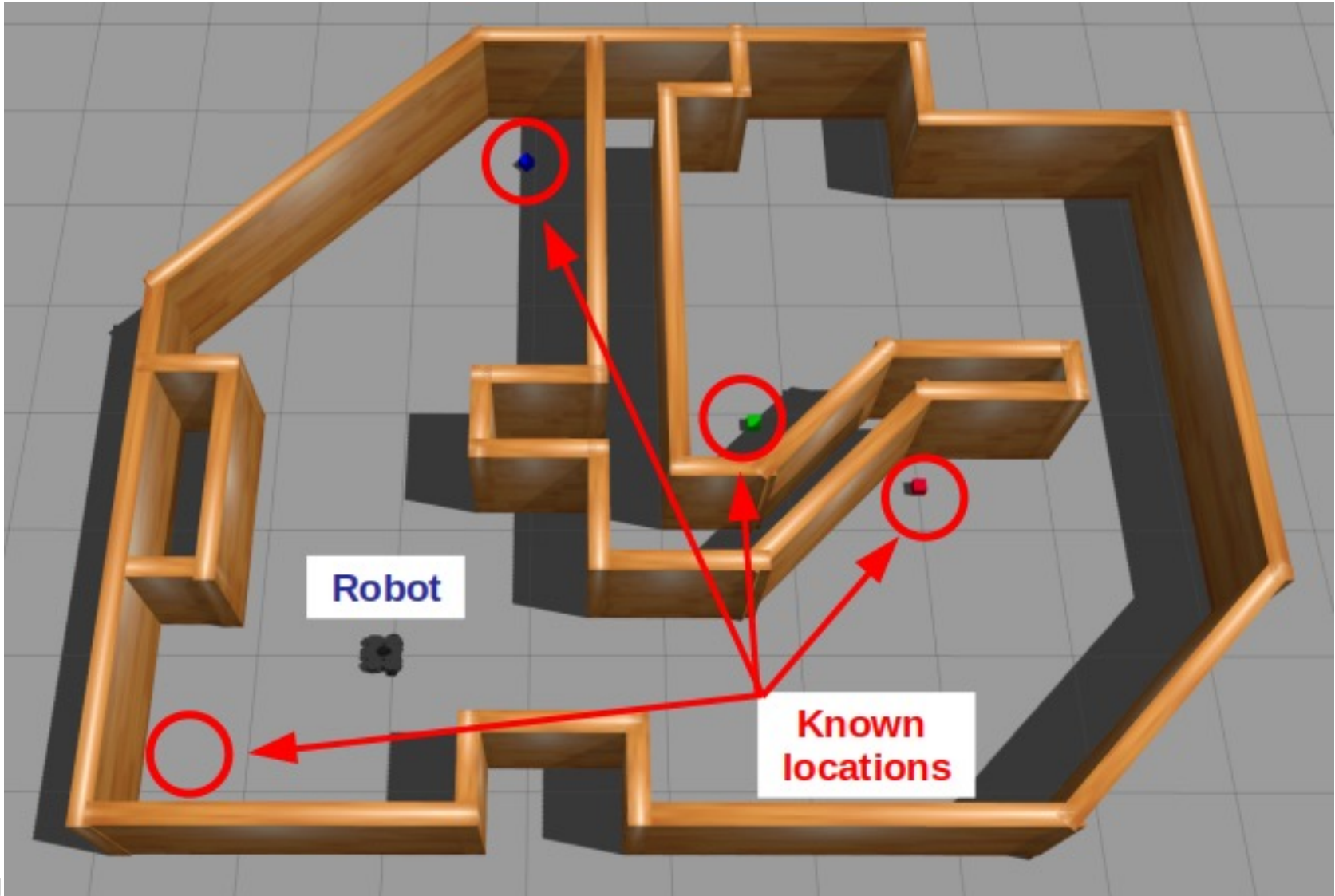


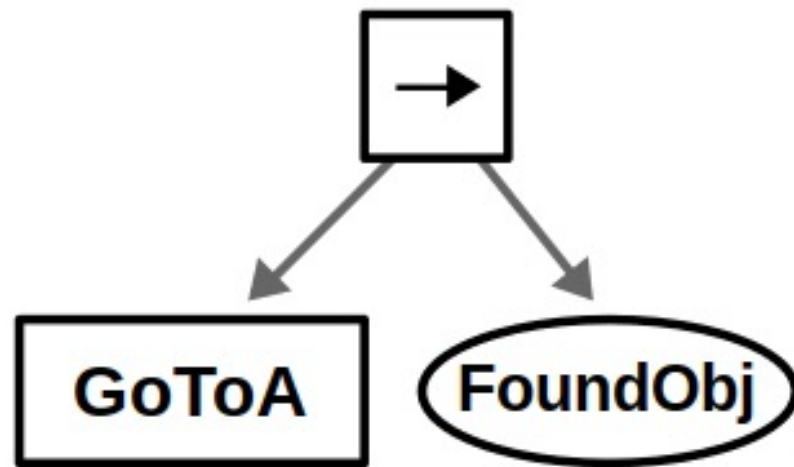
### Common policies:

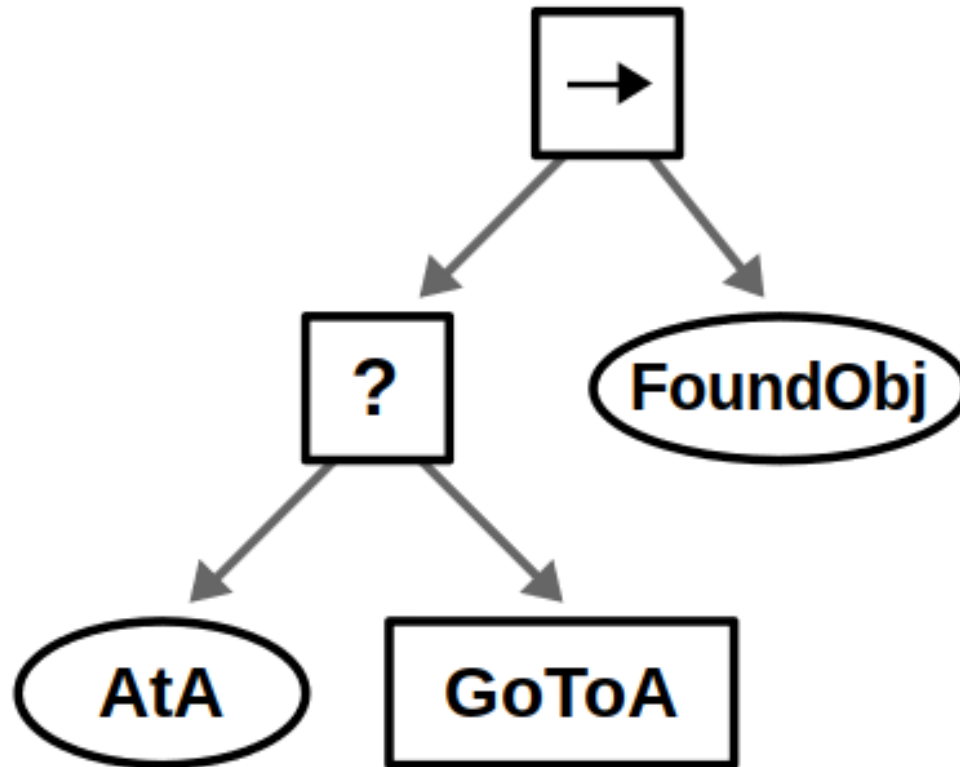
- *Invert*
- *Repeat / Retry*
- *Timeout*
- *Force Failure*
- *Success Is Failure*
- ...

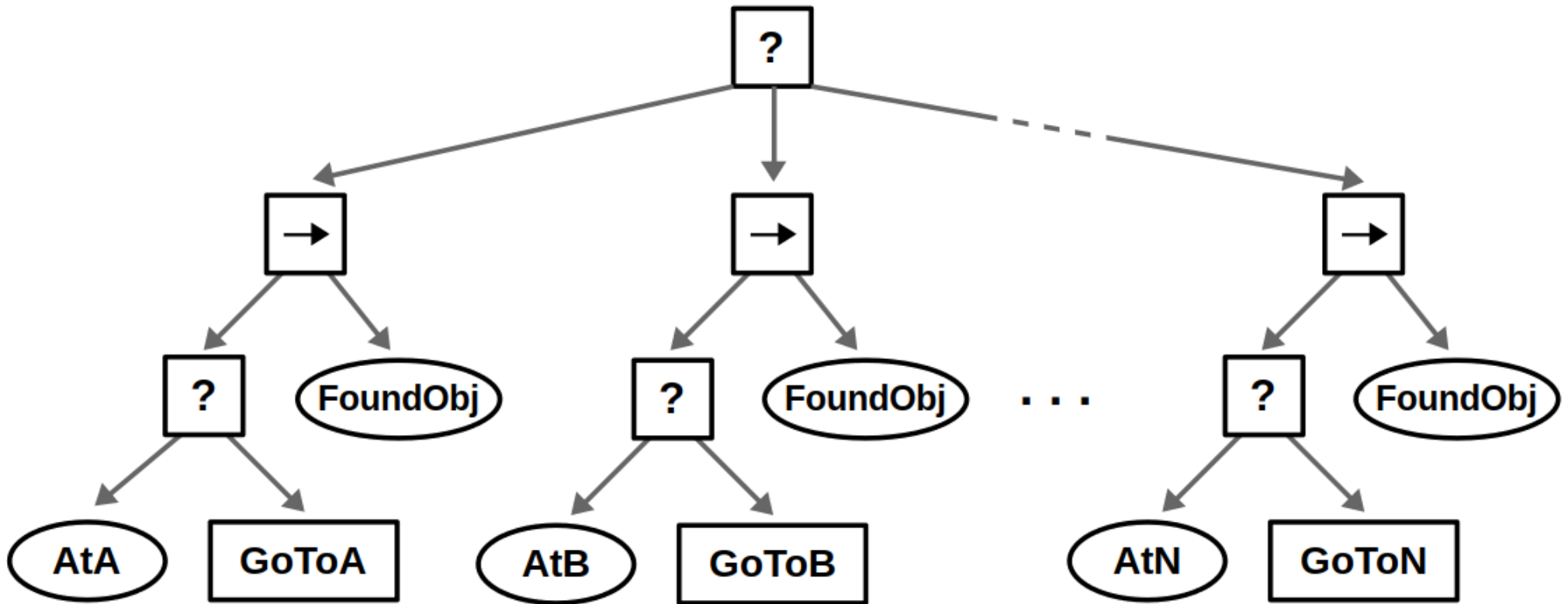
Sólo se tiene un nodo hijo cuyas acciones se implementan con una política propia. Estos nodos se reservan para realizar comportamientos no ordinarios, como el detener el sistema completo. Se recomienda utilizar los otros tipos de nodos para implementar la política de comportamiento.

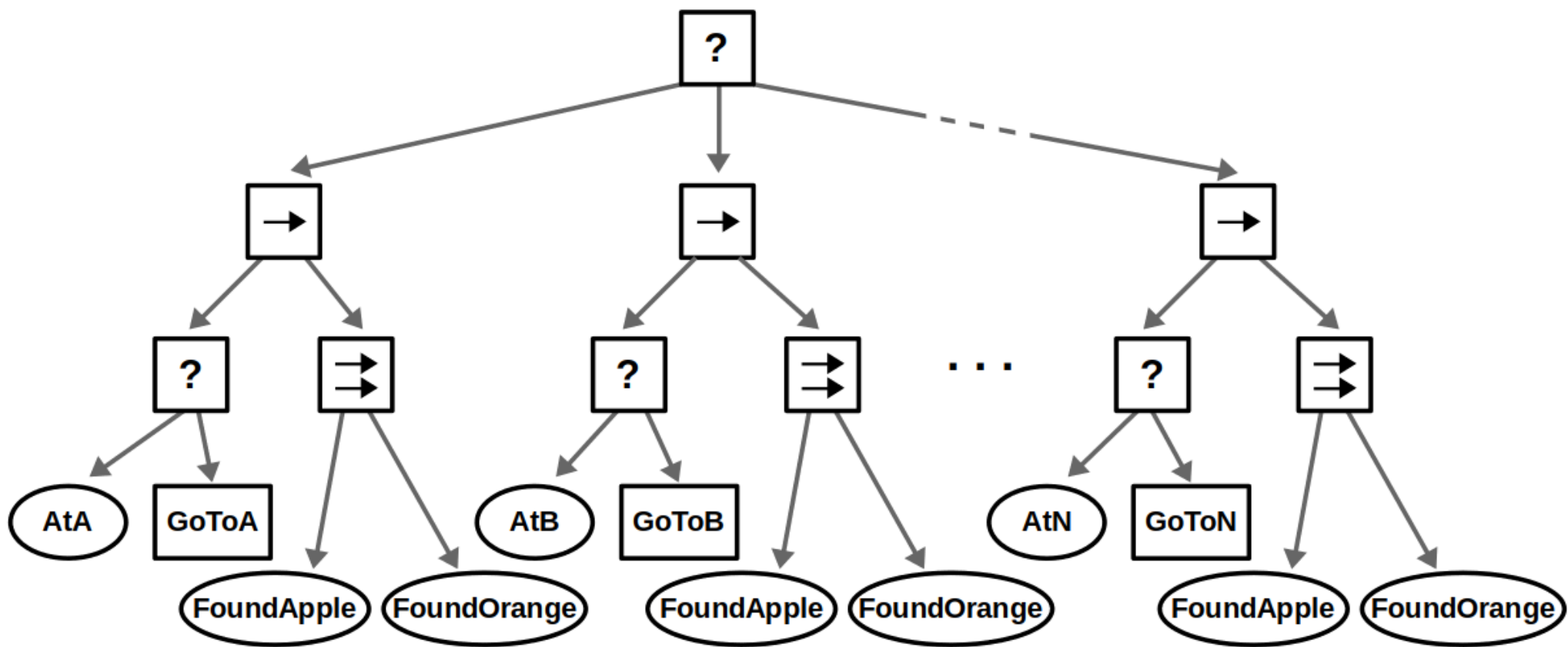




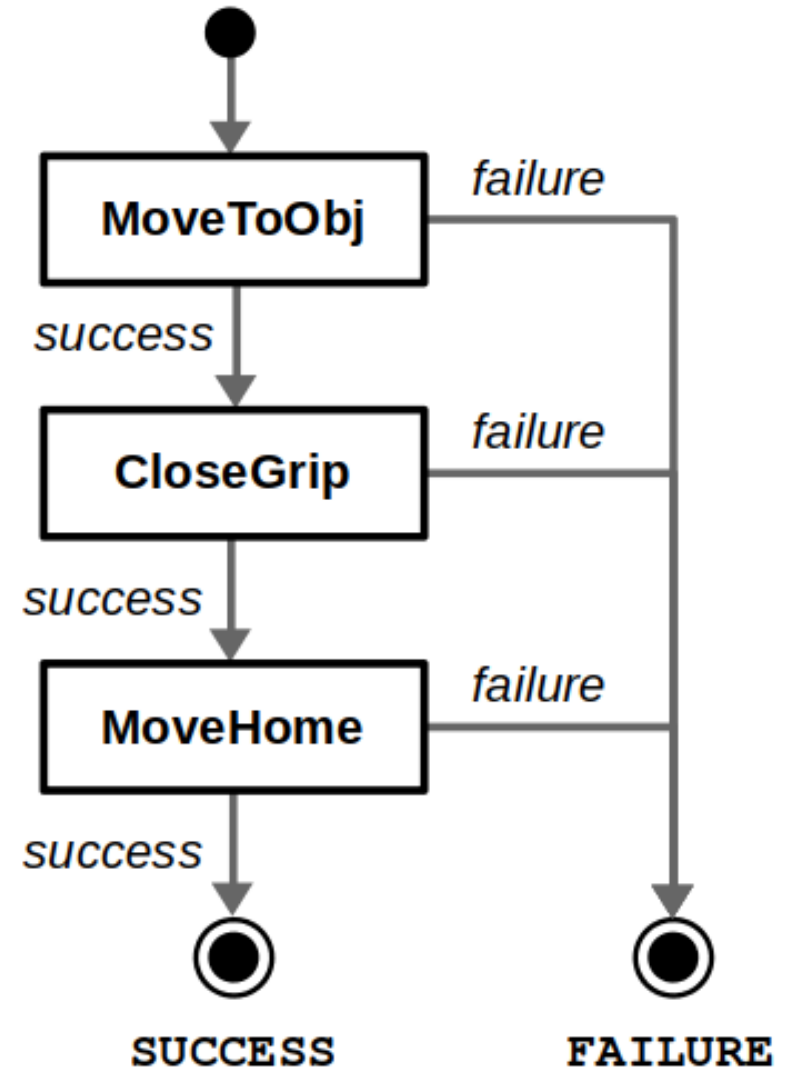
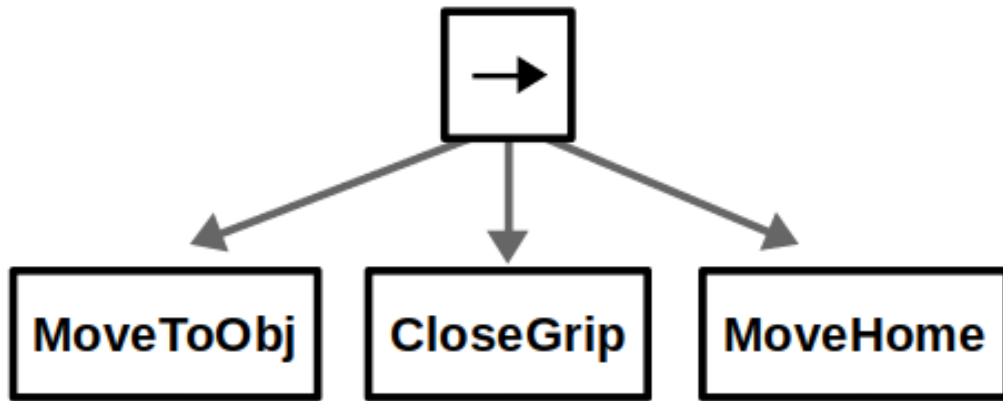


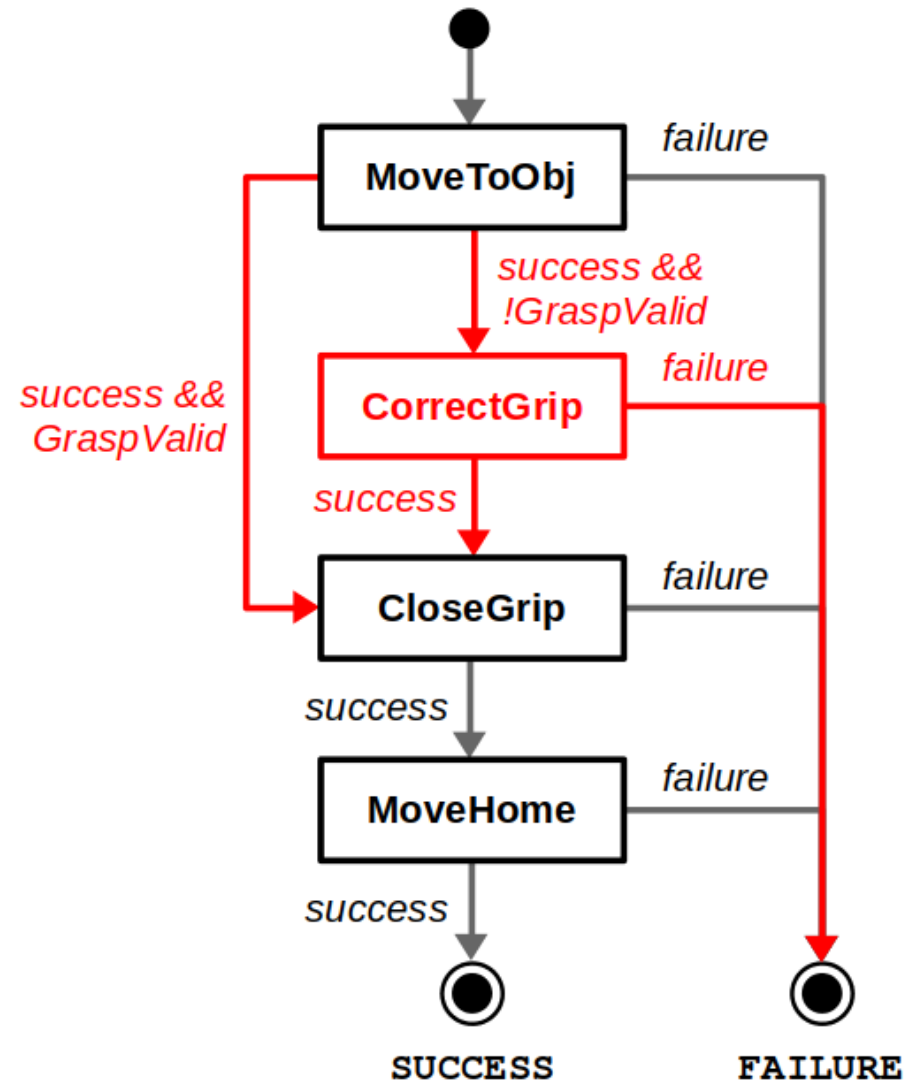
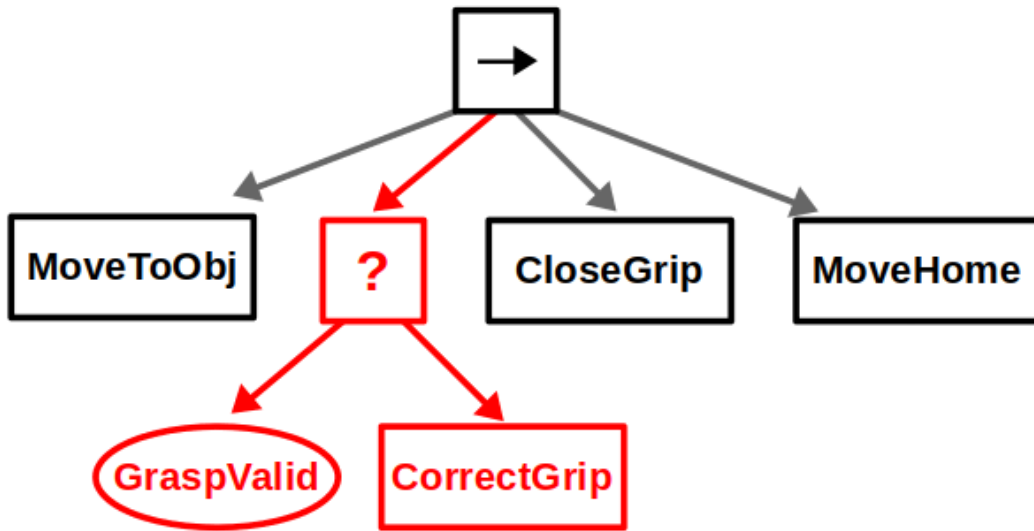






¿Diferencia entre Máquina de Estados y  
Árbol de Decisión?







**¿Se puede generar una máquina de estados o un árbol de decisión de manera automática?**

**Aprendizaje por refuerzo.**

**Procesos de Decisión de Markov  
MDPs.**

# Referencias

1. Kaijie Zhu, Qiquan Quan, Dewei Tang, Yachao Dong, Kaiyi Wang, Bo Tang, Qi Wu, Zongquan Deng, A Mars quadcopter capable of autonomous flight and sample collection: Structure and avionics, *Acta Astronautica*, Volume 214, 2024, Pages 712-721.
2. Brooks R. (1989) A robot that walks. Emergent behaviors from a carefully evolved network. MIT AI Lab Memo 1091.
3. Brooks R. (1991) Intelligence without reason. Proceedings of IJCAI-91, pp. 569-595.
4. KhatibM, Simeon T. (1997) Sensor-based motion planning and control for the HILARE mobile robot. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'97).
5. Murphy R.R. (2000) Introduction to AI Robotics. MIT Press.
6. Nilsson N.J. (1984) Shakey the robot. Technical report 323, SRI AI Center.
7. Thrun S., Bennewits M., Burgard W., Cremers A.B., Dellaert F., Fox D., Hähnel D., Lakameyer G., Rosenberg C., Roy N., Schulte J., Schulz D., Steiner W. (1999) Experiences with two deployed interactive tour-guide robots. *Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics, FSR'99*. Pittsburgh, PA, USA. August 1999.
8. Thrun S. (2000) Probabilistic algorithms in robotics. *AI Magazine* 21(4), pp. 93-109.
9. Honda-url: [http://www.honda-robots.com/index\\_ns.html](http://www.honda-robots.com/index_ns.html)
10. <https://robohub.org/introduction-to-behavior-trees/>
11. Penrose, R. (1991). The emperor's new mind. *RSA Journal*, 139(5420), 506-514
12. Brooks, R. A. (1990). Elephants don't play chess. *Robotics and autonomous systems*, 6(1-2), 3-15.