

Corso di Percezione Robotica (PRo)



Modulo B. Fondamenti di Robotica

Architetture di supervisione e controllo di robot

Cecilia Laschi

cecilia@arts.sssup.it



Modulo B. Architetture di supervisione e controllo di robot

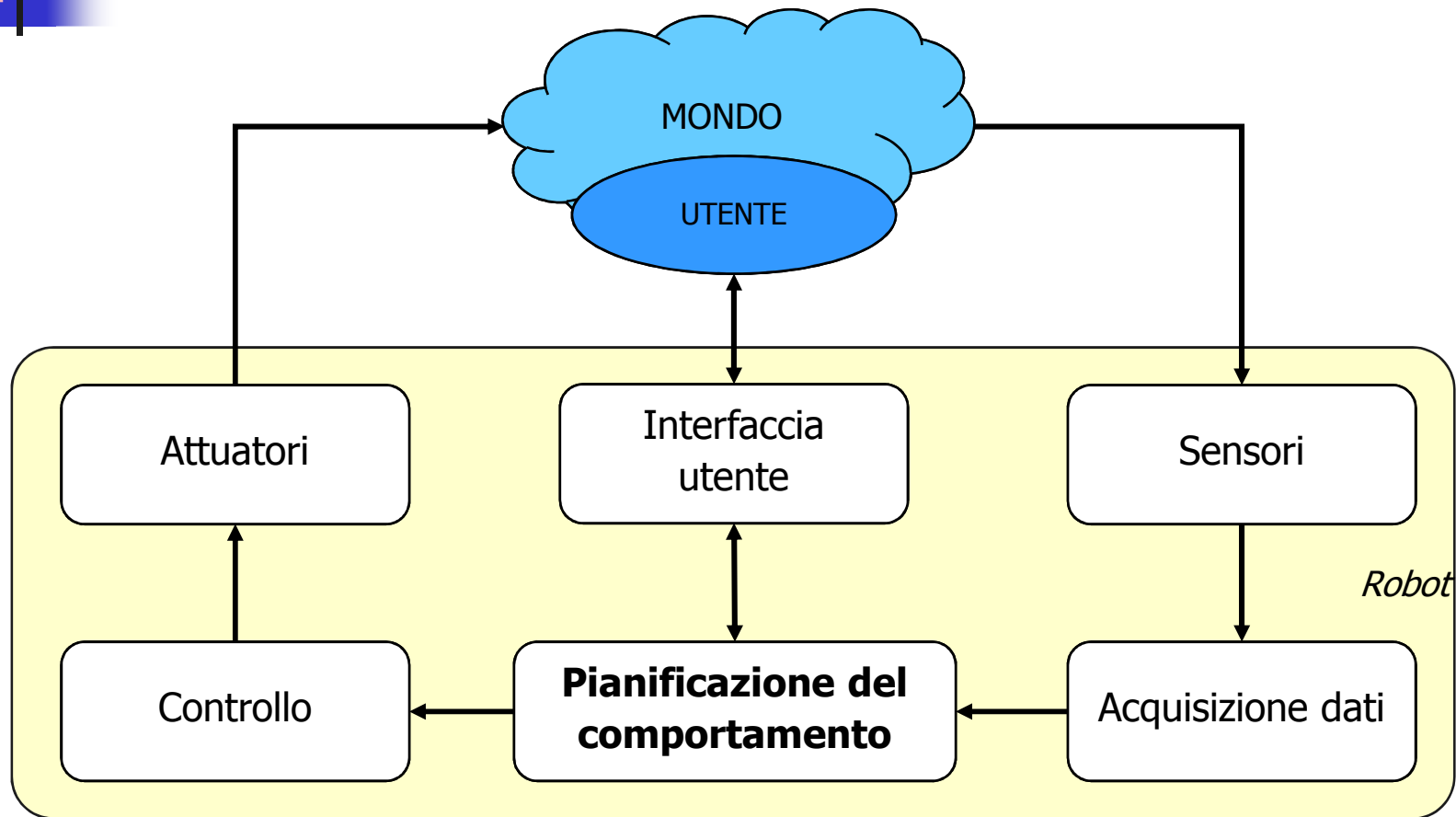
- Autonomia e Supervisione di un Robot
- I paradigmi per la supervisione dei robot
 - Approccio tradizionale vs approccio reattivo: dalla teleoperazione all'autonomia
 - Architetture Gerarchiche
 - Architetture Reattive
 - Architettura Subsumption
 - Architetture Ibride
 - Architetture Distribuite
 - Schemi di comportamento anticipatorio

Riferimenti bibliografici:

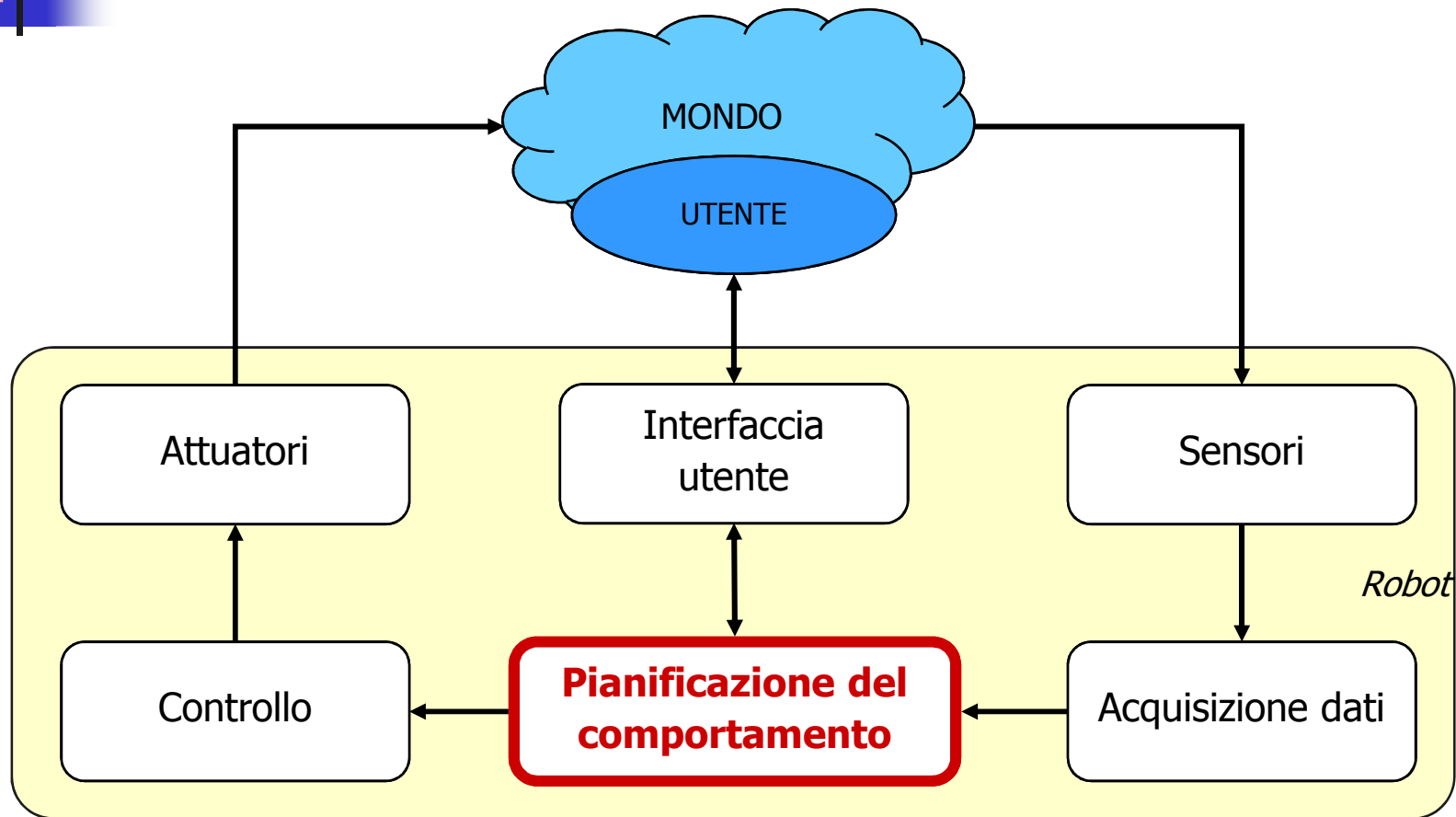
R. Murphy, *Introduction to AI Robotics*, MIT Press (Intr. Parte I, Cap.1 e 4)

R. Brooks, *Cambrian Intelligence*, The MIT Press, 2005

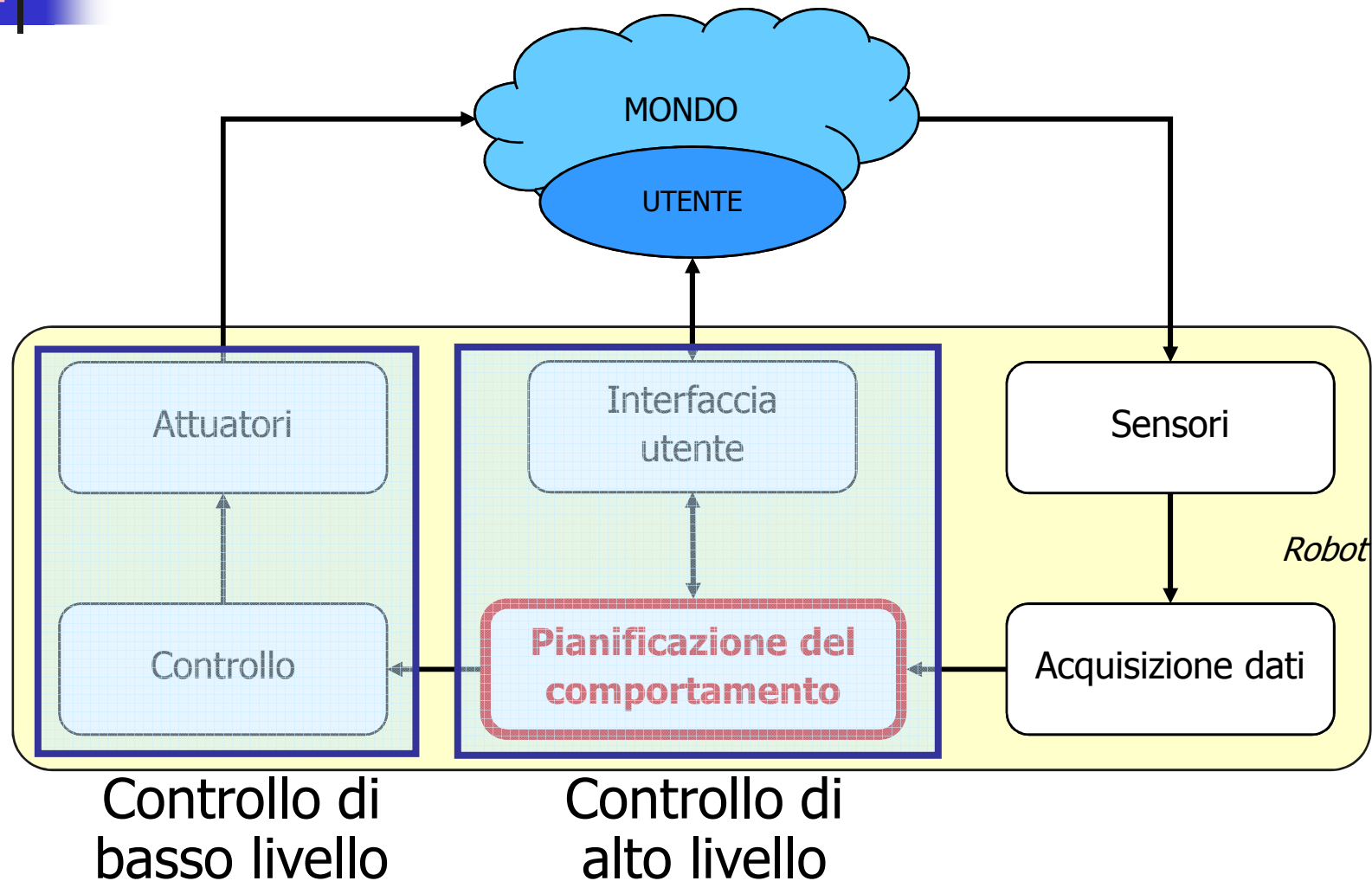
Schema tipico di un sistema robotico



Schema tipico di un sistema robotico



Schema tipico di un sistema robotico





Controllo di basso livello e controllo di alto livello

- Controllori di basso livello: agiscono direttamente sull'effettore per controllarne la dinamica, come ad esempio i controllori PID per il controllo della posizione, velocità e coppia di un motore
- Controllori di alto livello (**supervisor**, **pianificatori**, ecc.) hanno il compito di pianificare e supervisionare il comportamento complessivo del robot



Definizione di robot

- Dal Robot Institute of America:
“**Manipolatore multifunzionale riprogrammabile** progettato per spostare materiali, parti, utensili o altri dispositivi, per mezzo di movimenti variabili programmati per l’esecuzione di un dato numero di compiti”
- Caratteristiche:
 - Ambiente di lavoro strutturato e noto a priori
 - Ripetitività del compito
 - Accuratezza e velocità

Schema di uno scenario robotico industriale

Ambiente strutturato sui bisogni del robot

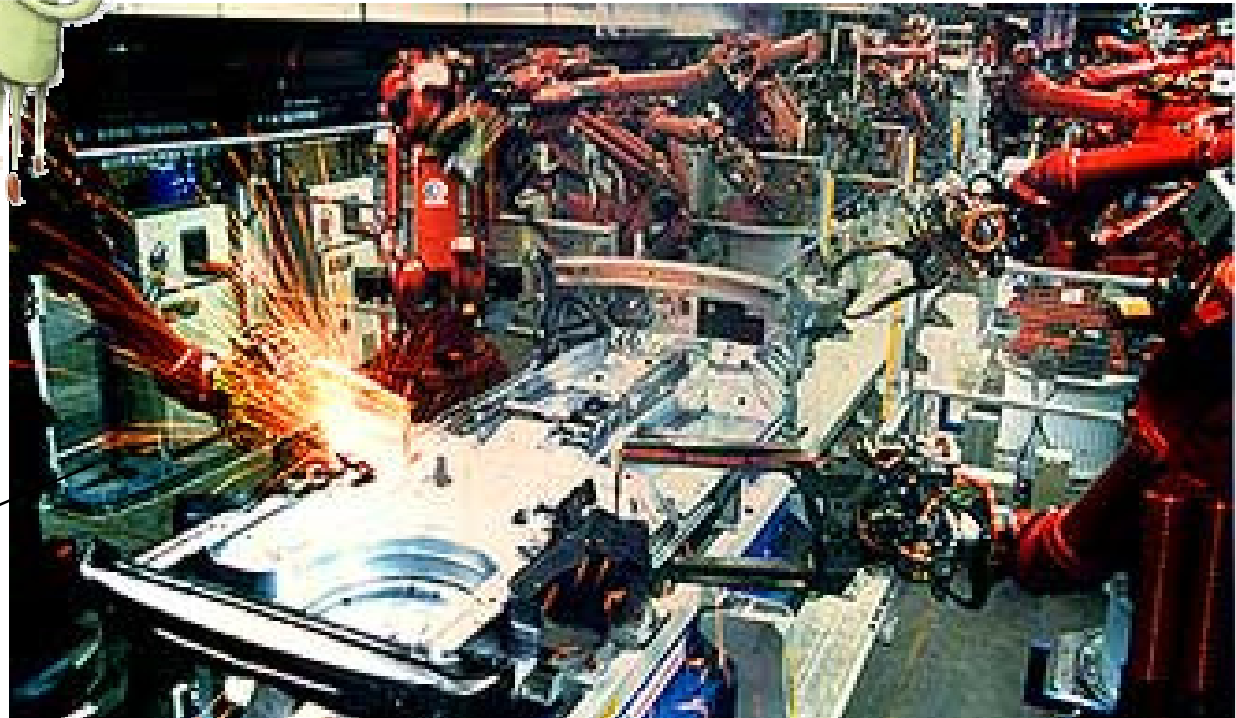
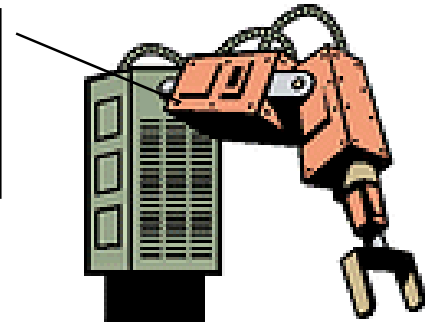
Manipolatori ad elevate prestazioni in termini di accuratezza, ripetibilità, velocità, robustezza

Procedure ben definite ripetitive

Operatori esperti (formati all'uso)

Posizioni predefinite degli oggetti da manipolare

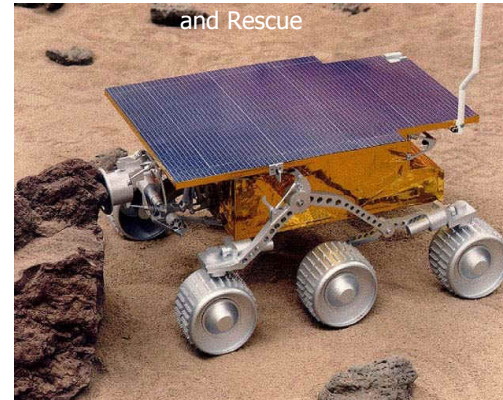
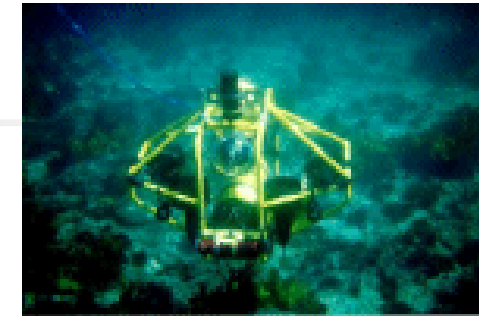
Presenza umana umana nell'ambiente di lavoro ben delimitata



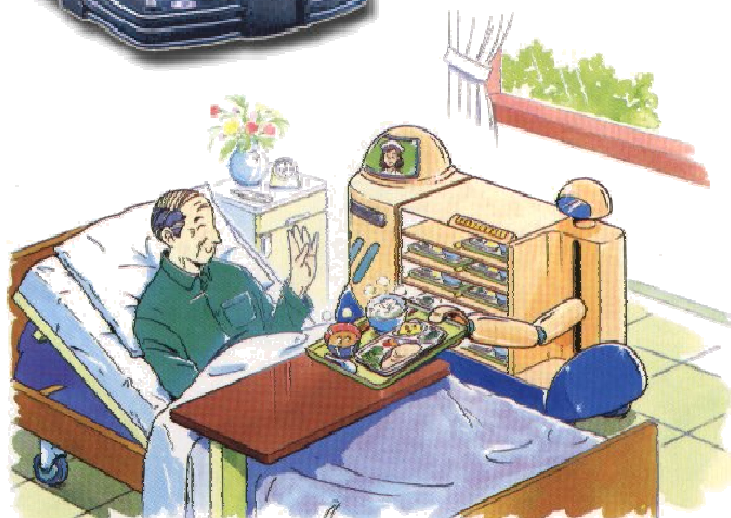
I robot fuori dalle fabbriche...



Servizi



Ambienti ostili



- Condivisione dello spazio di lavoro tra uomo e robot
- Maggiori capacità percettive
- Comportamento reattivo



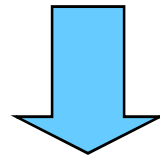
Definizione di robot autonomo

- Macchina capace di accettare ed eseguire **autonomamente** comandi o missioni in ambienti **non completamente strutturati senza l'intervento dell'uomo**
- Problematiche:
"pianificare dinamicamente i comportamenti del robot in un ambiente di lavoro non noto a priori e variabile nel tempo in funzione della richiesta di esecuzione di un determinato compito"



Sistema di supervisione di un Robot

- Un robot autonomo è una macchina capace di pianificare ed eseguire azioni in modo autonomo in un ambiente di lavoro non noto a priori e variabile nel tempo



Supervisione o pianificazione del comportamento di un robot



Livelli di autonomia di un robot

- Robot autonomo: il robot pianifica ed esegue autonomamente le proprie azioni
- Robot non autonomo: il robot è comandato passo passo da un operatore (teleoperazione)
- Robot semi-autonomo: controllo condiviso tra utente e robot; possono esistere diversi livelli di semi-autonomia

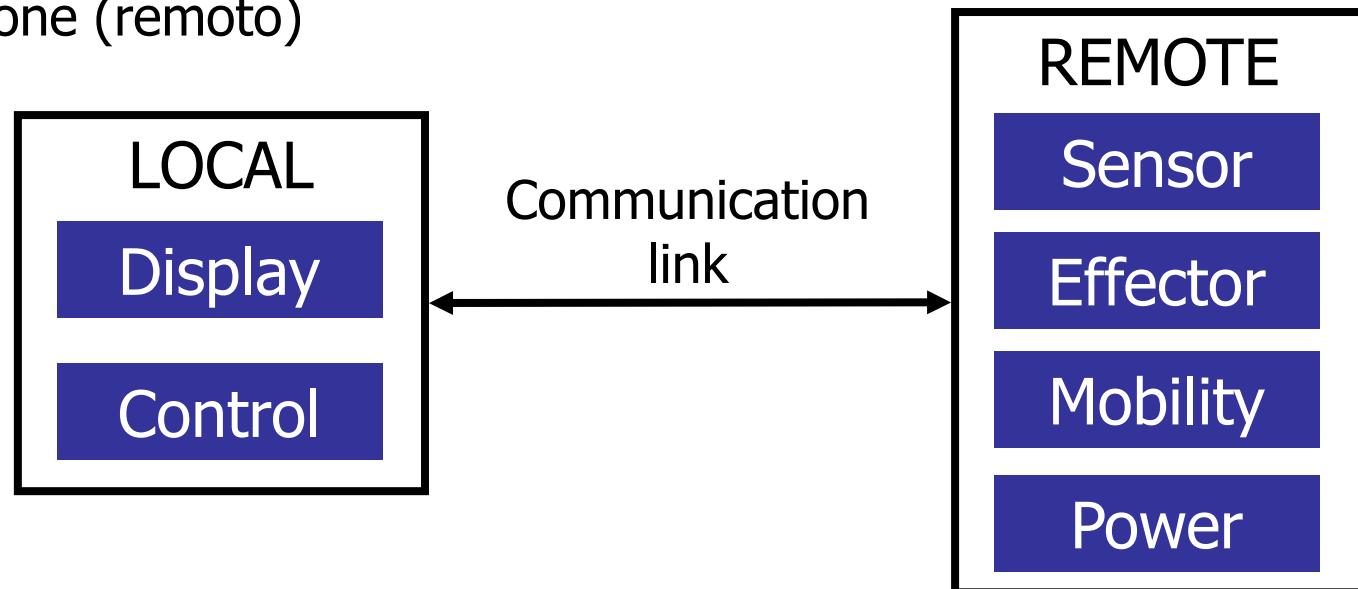
La teleoperazione di un robot

- La teleoperazione di un robot si ha quando un operatore umano controlla un robot da una postazione remota (robot non autonomo)
- Generalmente l'operatore (locale) controlla il robot (remoto) da una stazione di controllo che fornisce strumenti per la guida (es. joystick) e il monitoraggio (display) del robot



La teleoperazione di un robot

- Operatore umano (locale)
 - Display (locale)
 - Interfaccia di controllo e supervisione
- Canale di comunicazione
- Robot (remoto)
 - Sensori/Acquisizione dati sensoriali (remoto)
 - Attuazione (remoto)





I paradigmi per la supervisione di robot

- “Un paradigma è un insieme di assunzioni teoriche e di tecniche risolutive che caratterizza un approccio ad una classe di problemi”
- Nessun paradigma ha validità assoluta: alcuni problemi si affrontano meglio con certi paradigmi piuttosto che con altri
- Scegliere il paradigma giusto per affrontare un problema rende spesso più semplice giungere alla migliore soluzione possibile



I paradigmi per la supervisione di robot

- Tradizionalmente ci sono tre paradigmi principali utilizzati per affrontare il problema della supervisione o pianificazione dei comportamenti dei robot:
 - Paradigma gerarchico
 - Paradigma reattivo
 - Paradigma ibrido (deliberativo/reattivo)



I paradigmi per la supervisione di robot

- I tre paradigmi differiscono per il modo in cui le principali funzioni primitive di un robot sono organizzate
- Le principali funzioni (primitive) di un robot sono:
 - Percezione (SENSE)
 - Pianificazione (PLAN)
 - Azione/Attuazione (ACT)



I paradigmi per la supervisione di robot

- I tre paradigmi possono essere descritti in due modi:
 - descrivendo le relazioni tra le funzioni primitive
 - descrivendo il modo con il quale le informazioni sensoriali sono elaborate e distribuite ai moduli del sistema (locale/globale)



I paradigmi per la supervisione di robot

PLAN

SENSE

ACT



I paradigmi per la supervisione di robot

ROBOT PRIMITIVES	INPUT	OUTPUT
SENSE	Sensor data	Sensed information
PLAN	Information (sensed or cognitive)	Directives
ACT	Sensed information or directives	Actuator commands



I paradigmi per la supervisione di robot

- Gerarchico: S-P-A

- Reattivo: S-A

- Ibrido: P, S-A

PLAN

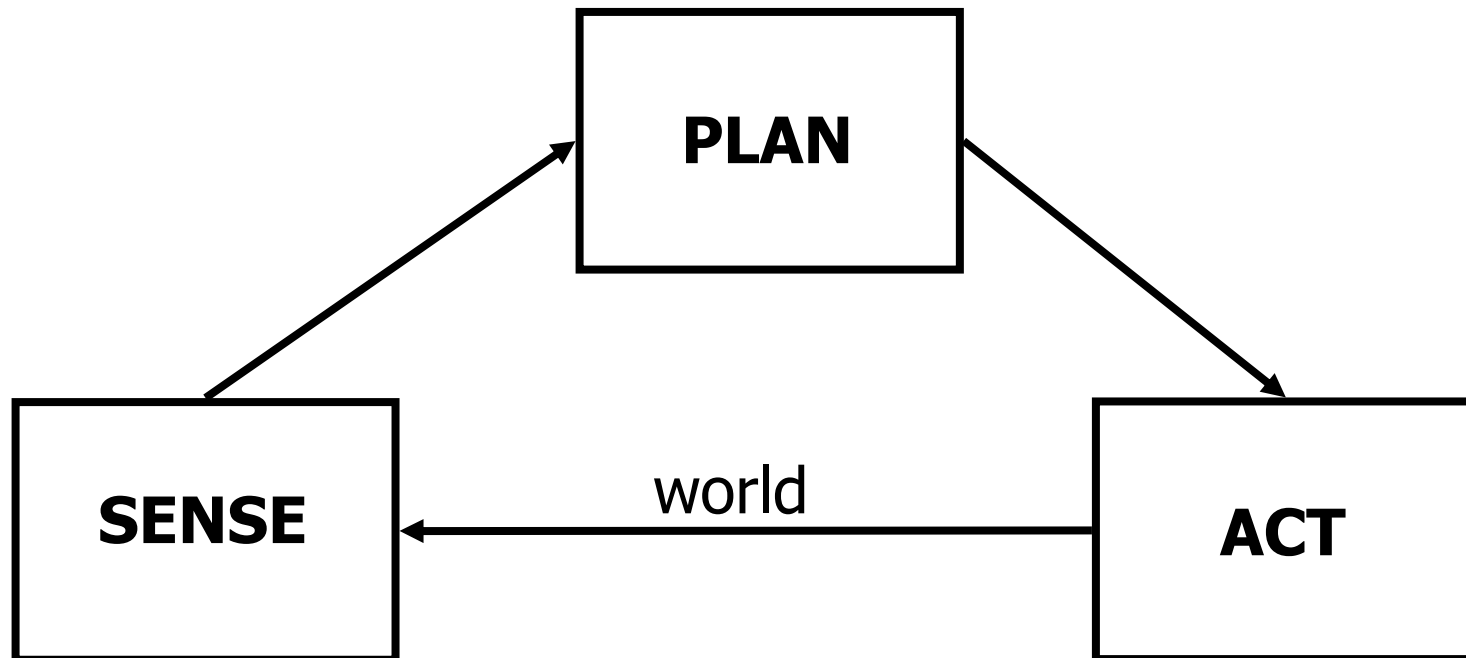
SENSE

ACT



Il paradigma gerarchico

- Gerarchico: S-P-A



Il paradigma gerarchico

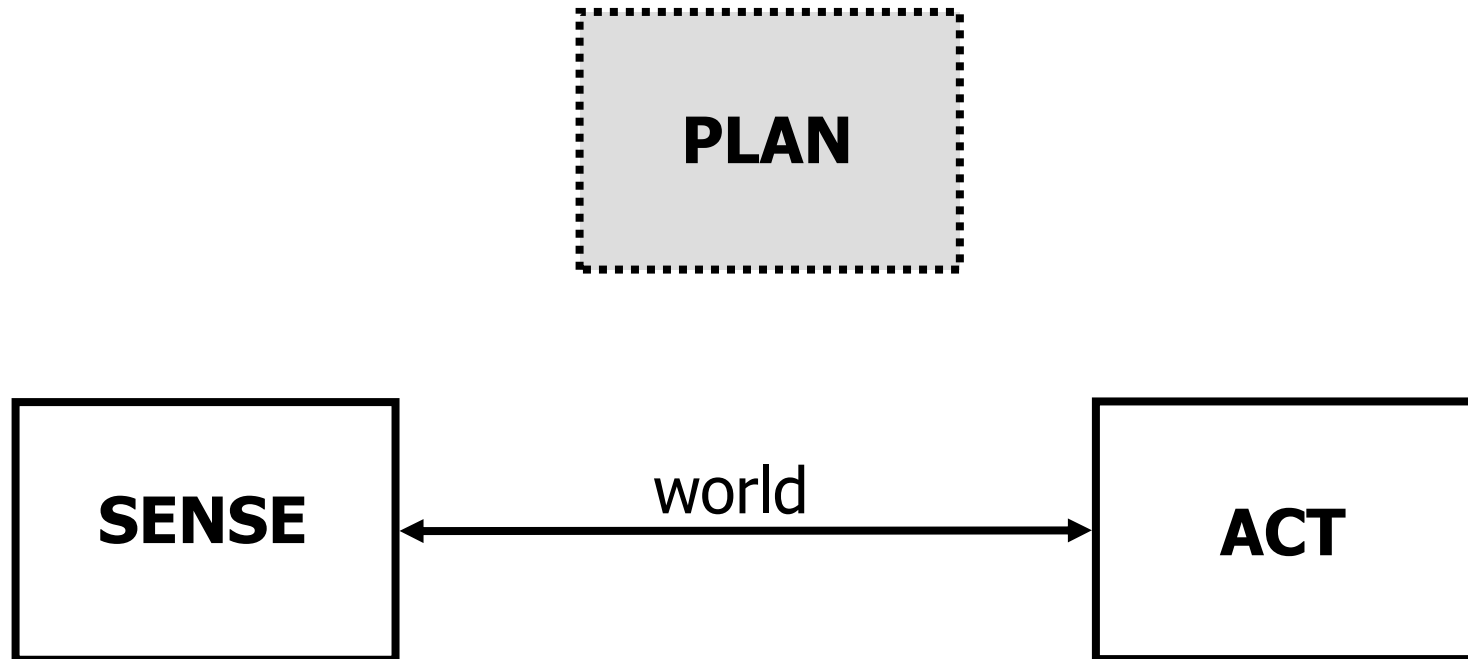
ROBOT PRIMITIVES	INPUT	OUTPUT
SENSE	Sensor data	Sensed information
PLAN	Information (sensed or cognitive)	Directives
ACT	Sensed information or directives	Actuator commands

```
graph TD; SENSE[SENSE] --> SI[Sensed information]; PLAN[PLAN] --> DIR[Directives]; ACT[ACT] --> AC[Actuator commands]; SI --> PLAN; DIR --> ACT;
```



Il paradigma reattivo

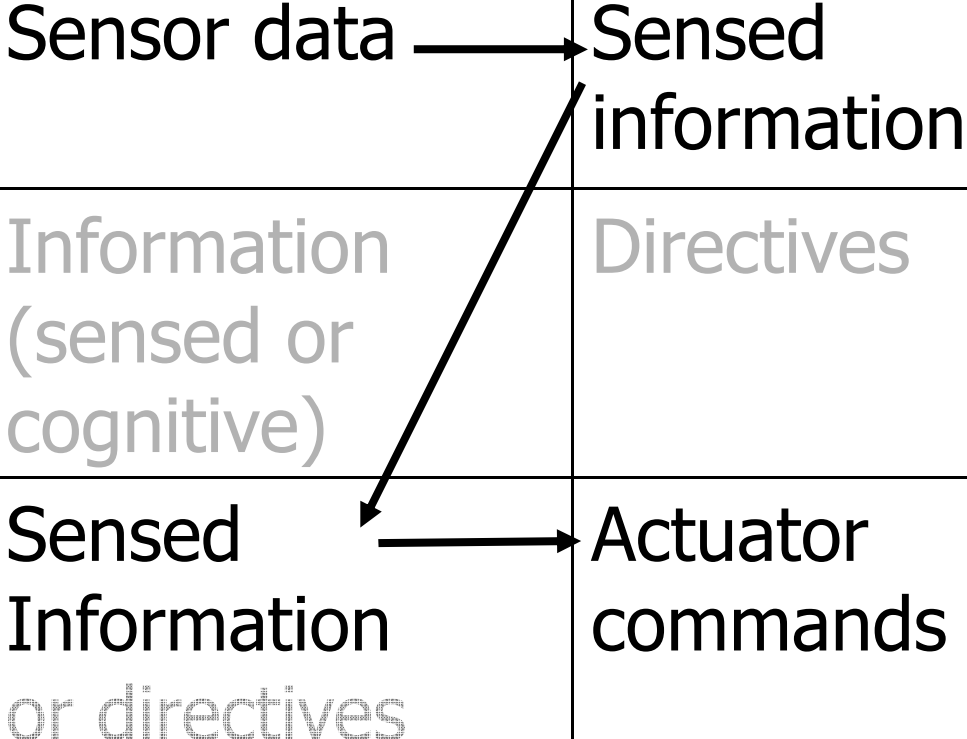
- **Reattivo: S-A**





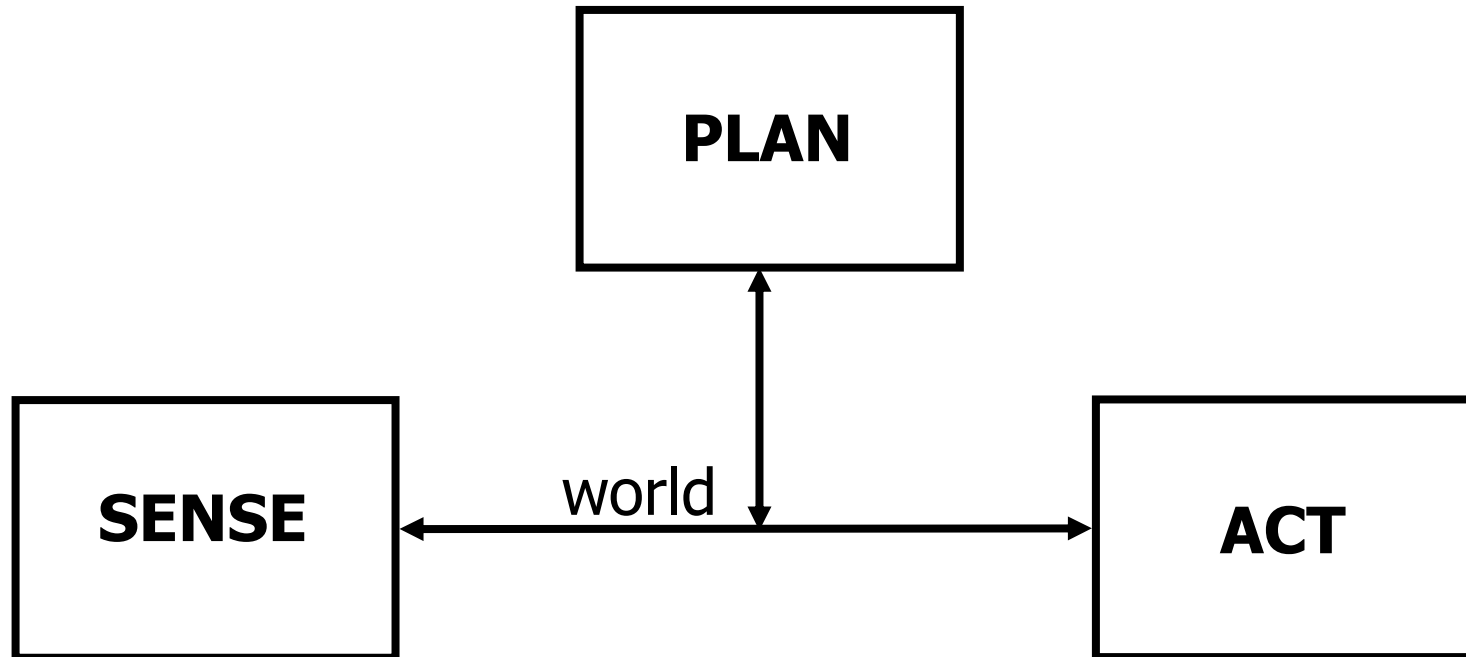
Il paradigma reattivo

ROBOT PRIMITIVES	INPUT	OUTPUT
SENSE	Sensor data	Sensed information
PLAN	Information (sensed or cognitive)	Directives
ACT	Sensed Information or directives	Actuator commands



Il paradigma ibrido deliberativo/reattivo

•Ibrido: P, S-A



Il paradigma ibrido deliberativo/reattivo

ROBOT PRIMITIVES	INPUT	OUTPUT
PLAN	Information (sensed or cognitive) →	Directives
SENSE-ACT	Sensor data →	Actuator commands

```
graph TD; PLAN[PLAN] --> Directives[Directives]; SENSE_ACT[SENSE-ACT] --> Actuator_commands[Actuator commands]; Actuator_commands --> SENSE_ACT; Directives --> SENSE_ACT; SENSE_ACT --> Directives;
```



Architetture di supervisione

- Strutture che mettono in relazione in maniera organizzata componenti di base e che definiscono le loro interazioni
- Criteri per la valutazione di architetture:
 - Modularità
 - Applicabilità
 - Portabilità
 - Robustezza

Architetture Gerarchiche: Modello tradizionale per AI

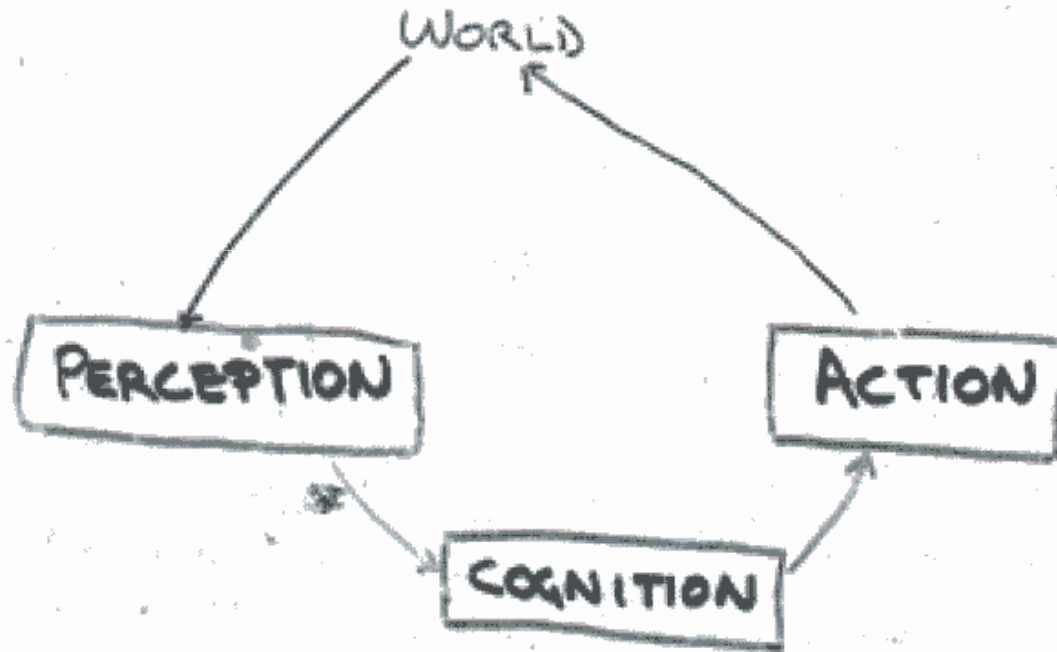


Figure 1: The traditional model where cognition mediates between perceptions and plans of actions.

Tratto da R. Brooks, "Cambrian Intelligence"



Architetture Gerarchiche: Modello tradizionale per AI

- La cognizione è utilizzata per interpretare la percezione e per pianificare le azioni degli attuatori
- Il *modulo percezione* genera una descrizione del mondo, utilizzata dal *modulo cognizione* o modulo “pensante” che produce una sequenza di azioni per il *modulo azione*

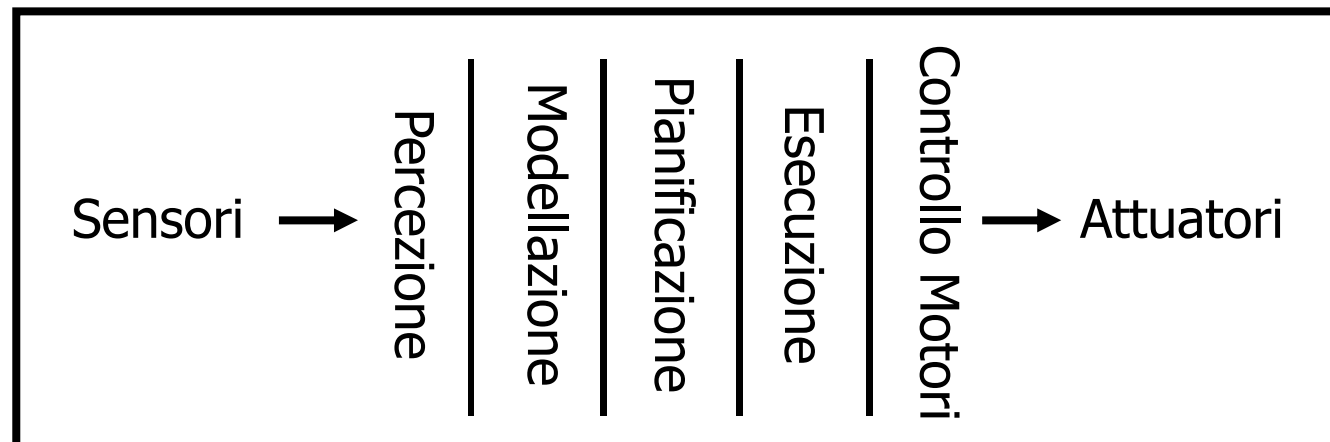


I modelli Tradizionali: Architetture Gerarchiche

- Nelle architetture gerarchiche la percezione viene utilizzata per stabilire e mantenere una corrispondenza tra il **modello interno del mondo** (o mappa) e il mondo esterno.
- Tipicamente il modello del mondo contiene:
 - una rappresentazione a priori dell'ambiente in cui il robot opera
 - l'informazione sensoriale percepita
 - altre informazioni necessarie per l'esecuzione del compito
- La rappresentazione del mondo viene modificata ogni volta che il robot percepisce l'ambiente e il piano delle azioni viene stabilito sulla base di tale rappresentazione

I modelli Tradizionali: Architetture Gerarchiche

- Suddivisione e distribuzione logica e funzionale dei compiti
- Suddivisione orizzontale e sequenziale della catena di informazioni elaborate dal sistema centralizzato



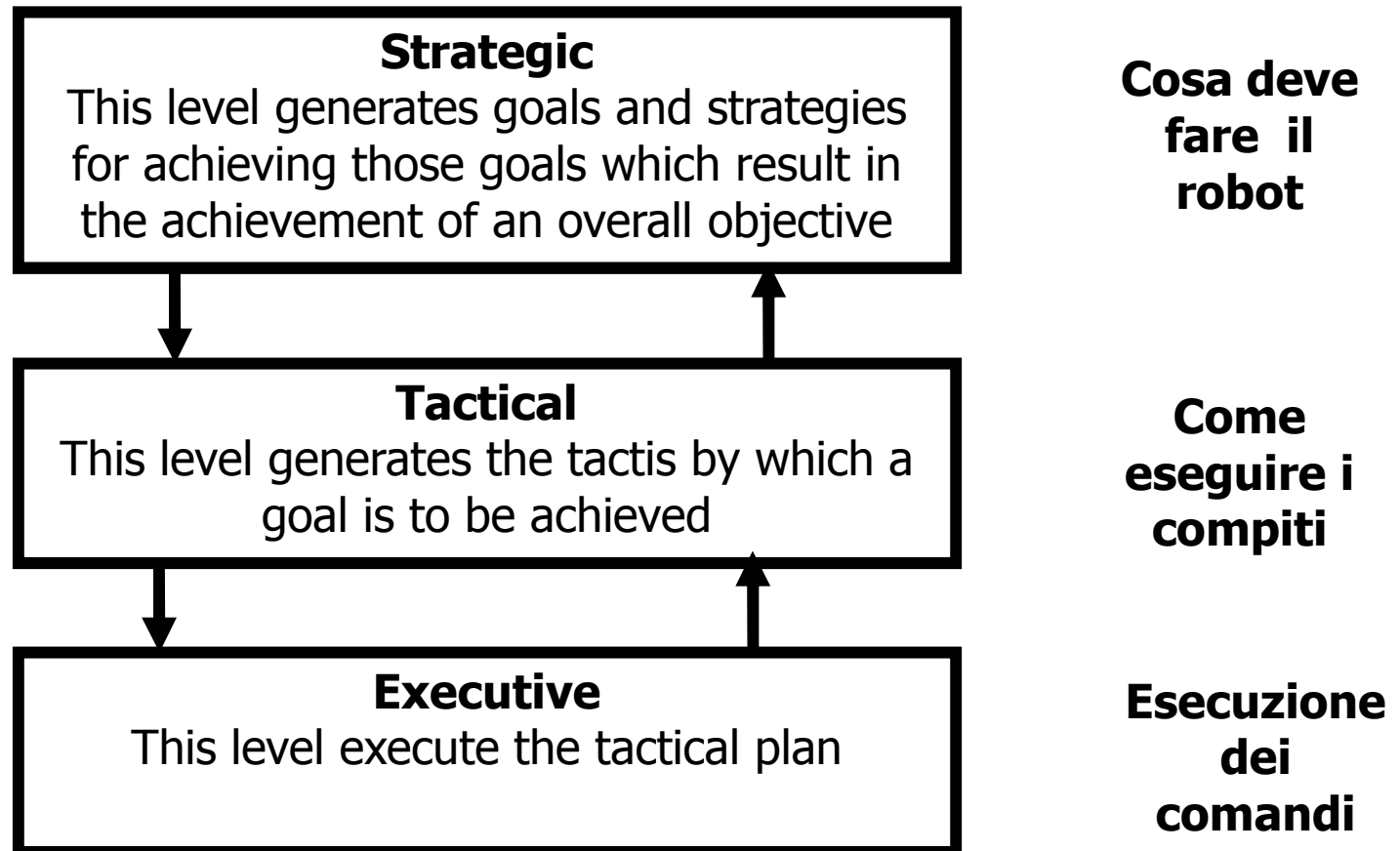


Architetture Gerarchiche

- Generalmente, il modulo Pianificatore è strutturato su tre livelli:
 - Strategico
 - Tattico
 - Esecutivo
- Il livello più alto o strategico genera una strategia in base al compito che il robot deve eseguire
- Il livello intermedio o tattico genera i comandi interpretando istruzioni provenienti dal livello più alto o livello strategico
- Il livello più basso o livello esecutivo riceve macro comandi generati dal livello intermedio e si occupa del controllo in tempo reale degli attuatori



Architetture Gerarchiche



Architettura su tre livelli per il pianificatore del sistema

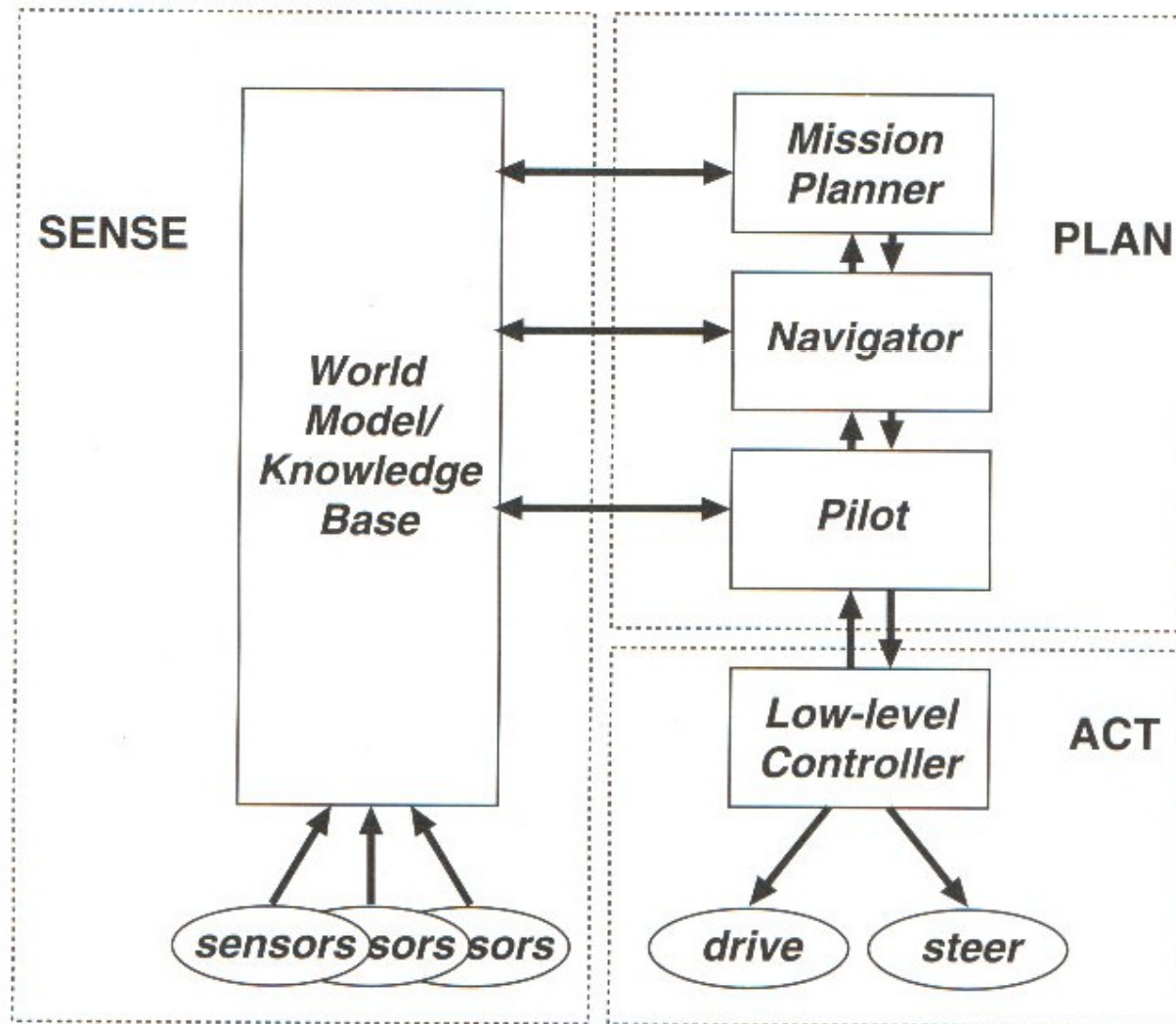


Architetture Gerarchiche

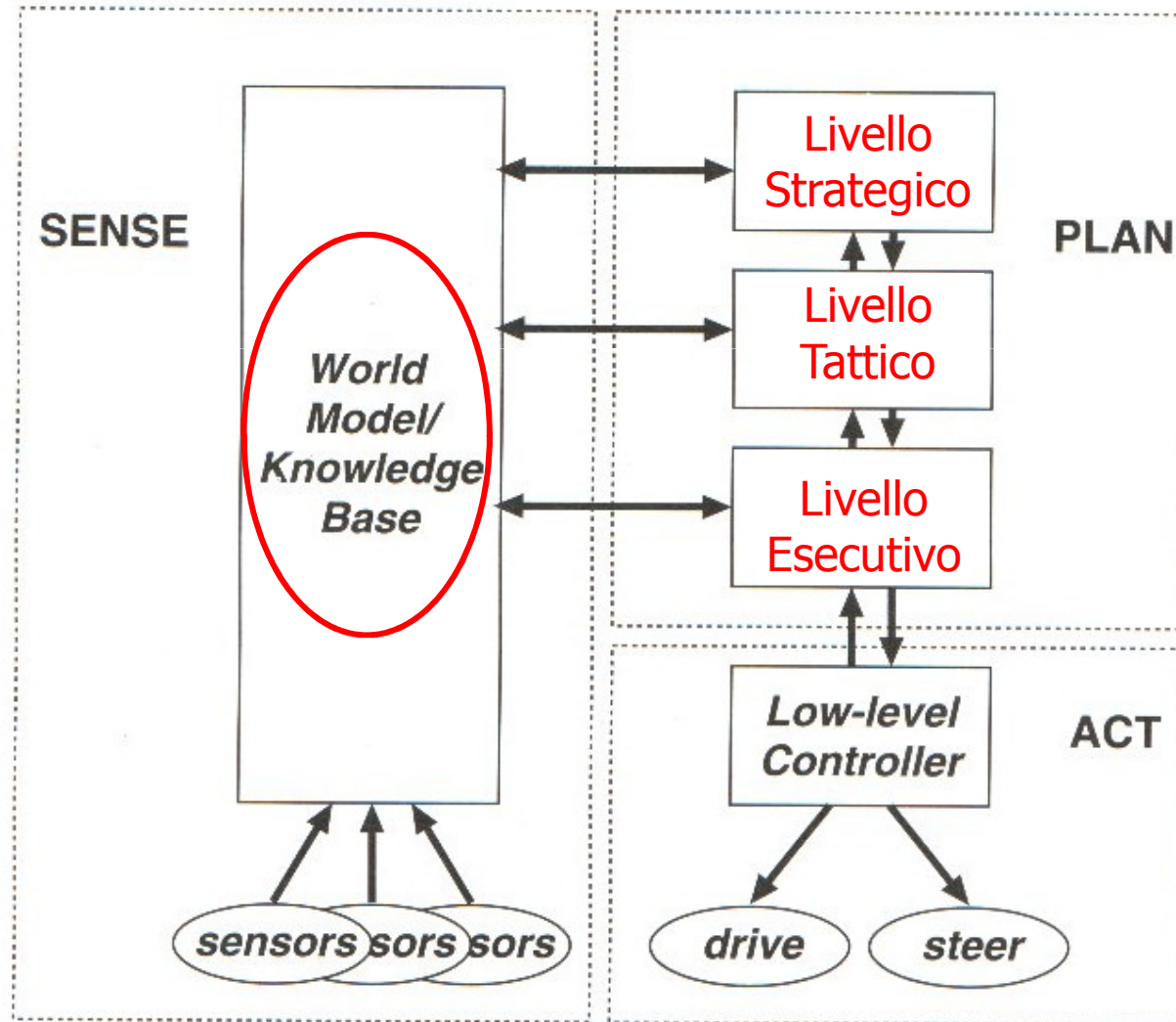
Esempio per il task: *"prendi la bottiglia dal frigorifero"*

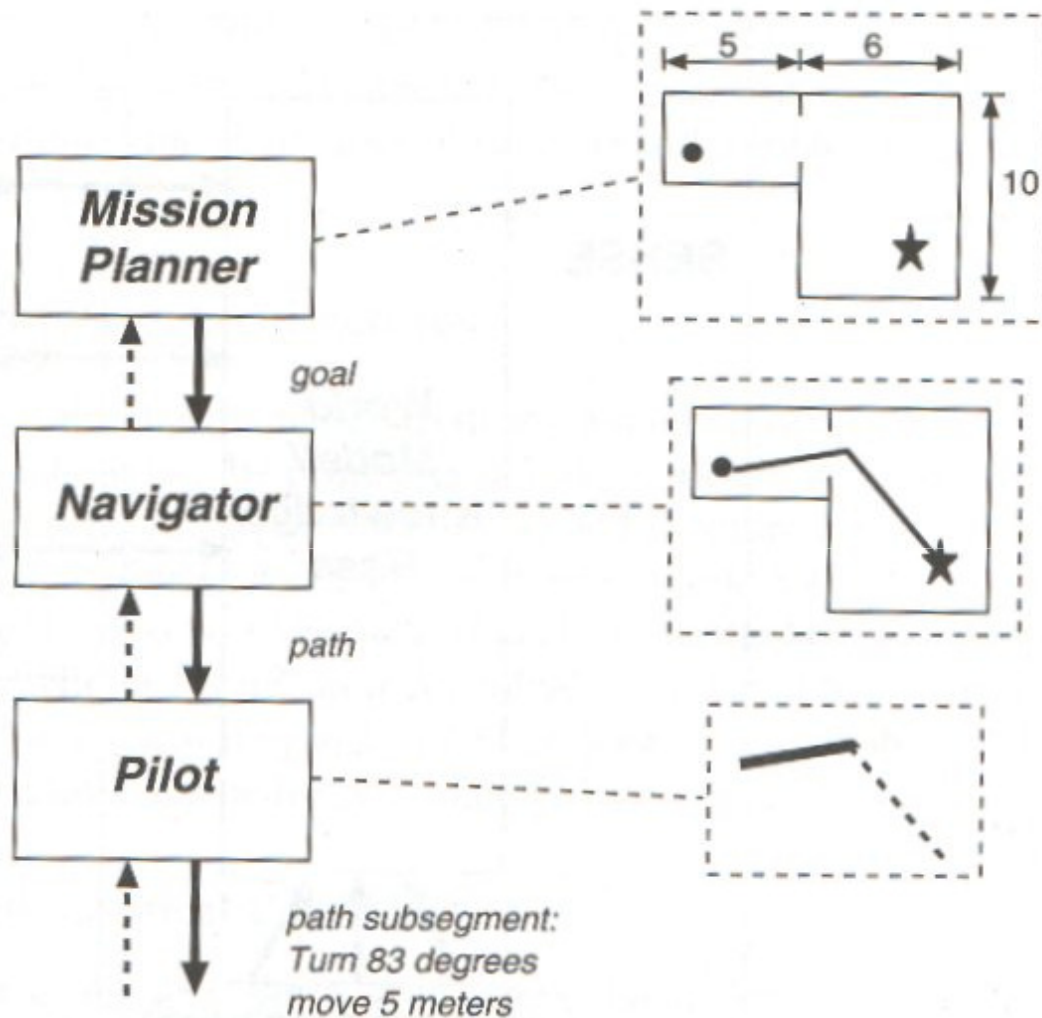
- **Livello strategico:** vai in cucina, vai davanti al frigorifero, apri al frigorifero, prendi la bottiglia...
- **Livello tattico:**
 - Vai in cucina: `muovi_base(X1,Y1); muovi_base(X2,Y2)...`
 - Apri il frigorifero: `muovi_braccio(P1), Apri_Mano()....`
- **Livello esecutivo:**
 - `Muovi_base(X1,Y1); muovi_base(X2,Y2); muovi_braccio(P1)...`

Nested Hierarchical Controller



Nested Hierarchical Controller





- Il modulo Mission Planner riceve una missione da un operatore umano (es. prendi la scatola nella stanza accanto) e la codifica in termini comprensibili per gli altri moduli, inoltre ricava posizione e goal del robot dalla mappa
- Il modulo Navigator riceve queste informazioni e genera un cammino (traiettoria) dalla posizione corrente al goal
- Il modulo Pilot determina le azioni che gli attuatori devono compiere per seguire il cammino pianificato

Figure 2.6 Examination of planning components in the NHC architecture...



Architetture Gerarchiche

Vantaggi

- Funzionamento predicibile ovvero pianificazione a priori dei comportamenti
- Efficienza e stabilità del sistema



Architetture Gerarchiche

Svantaggi

- Alta complessità computazionale dovuta principalmente alla modellazione dell'ambiente e al ragionamento
- Poca adattabilità alle modifiche in tempo reale dell'ambiente o bassa *reattività*
- Basso parallelismo

Architetture di controllo Reattive o basate sul comportamento

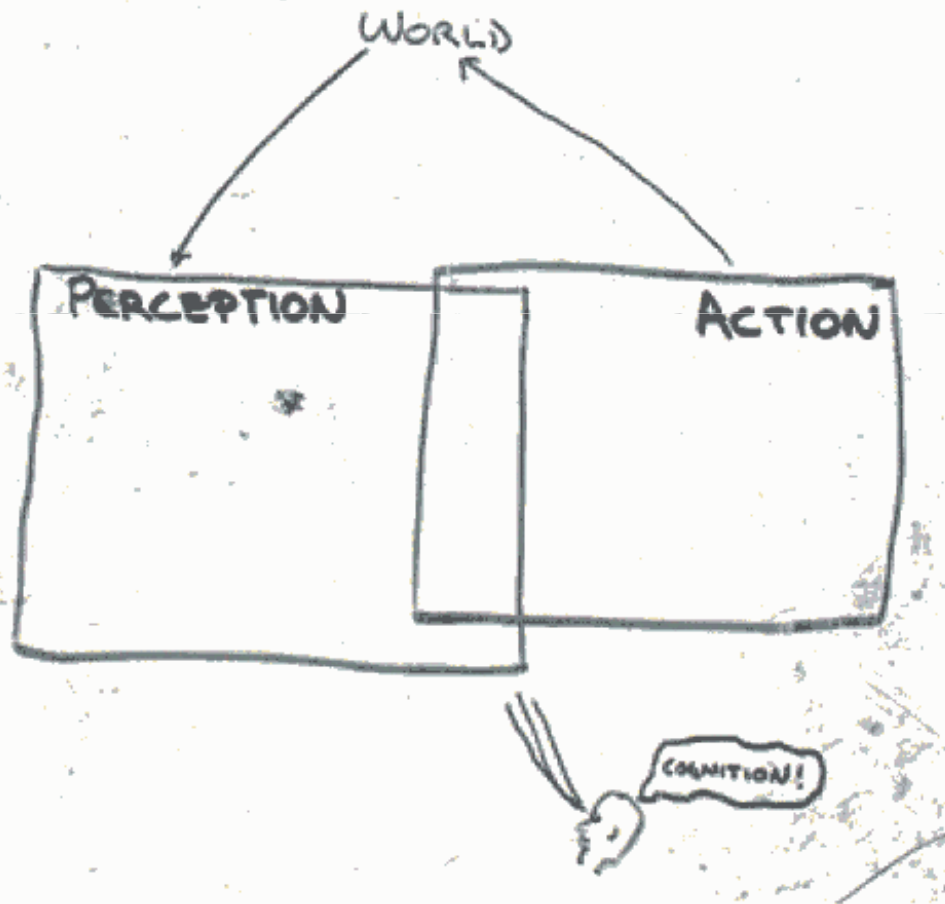


Figure 2: The new model, where the perceptual and action subsystems are all there really is. Cognition is only in the eye of an observer.

Non esiste un modulo
"Cognizione" vero
e proprio e i
sistemi di
percezione e
attuazione
collaborano per
definire i
comportamenti del
robot

da A. Brooks, "Cambrian Intelligence"

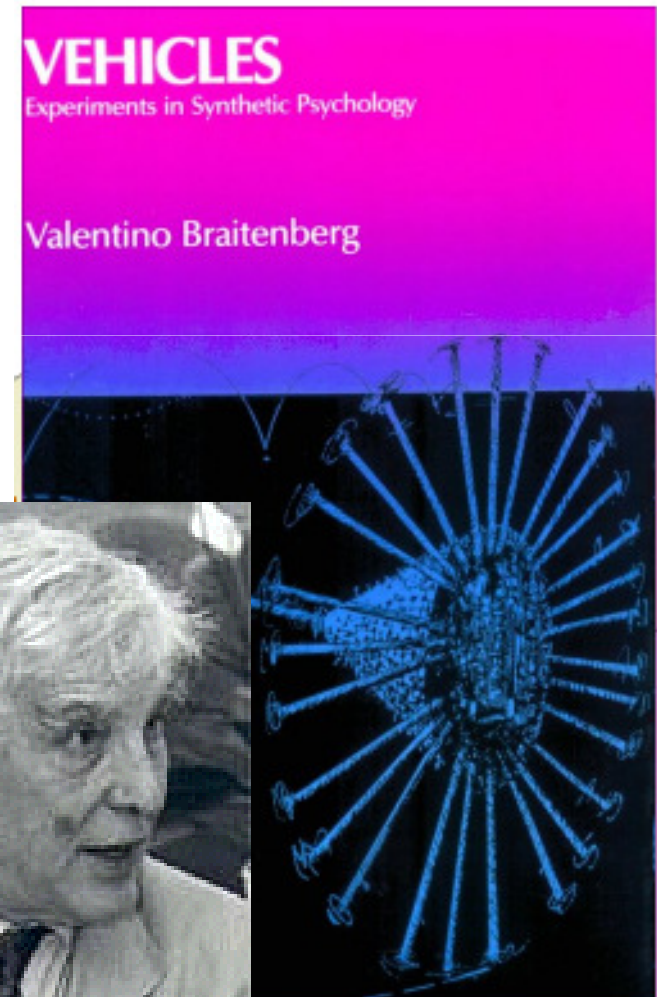


Alcuni esempi tratti da...

Vehicles Experiment in Synthetic Psychology

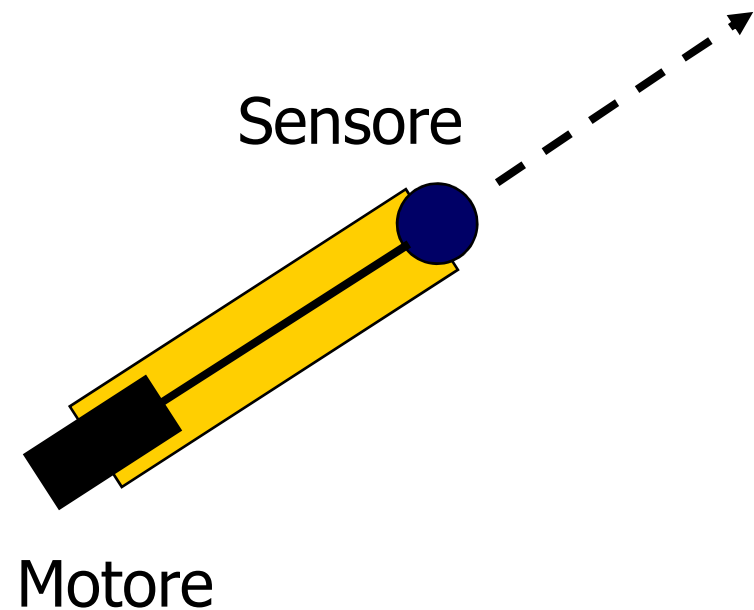
di Valentino Braitenberg
The MIT Press

Director of the
Max Planck Institute For
Biological Cybernetics



Esperimento 1

- Il primo veicolo è equipaggiato con un motore ed un sensore di temperatura: il motore è collegato direttamente al sensore
- Il collegamento è tale che la velocità del motore è proporzionale alla temperatura misurata dal sensore
- Il veicolo si muove sempre lungo la stessa direzione, più velocemente nelle zone calde e più lentamente nelle zone fredde





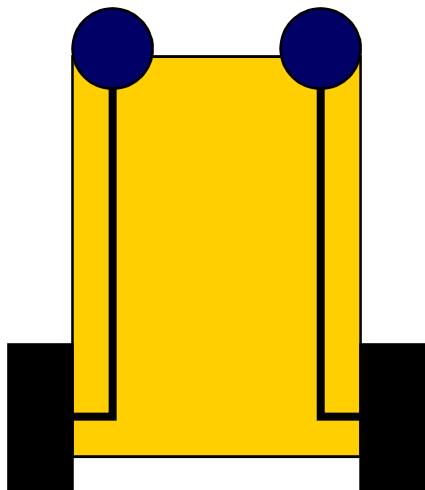
Esperimento 2: paura e aggressione

- Il secondo veicolo è equipaggiato con due motori e due sensori, due coppie diverse per ogni lato del veicolo
- Ancora una volta i motori sono collegati ai sensori ed il collegamento è tale che la forza esercitata dal motore è proporzionale al valore misurato dal sensore
- Seguendo questo schema è possibile costruire due veicoli che assumono due comportamenti diversi a seconda del tipo di connessione sensori-motori

Esperimento 2: paura e aggressione

Veicolo 1

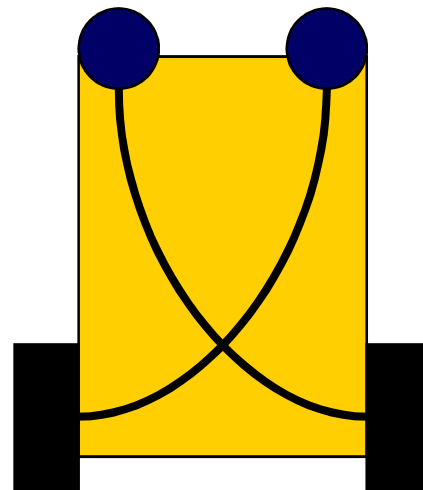
Sensori



Motori

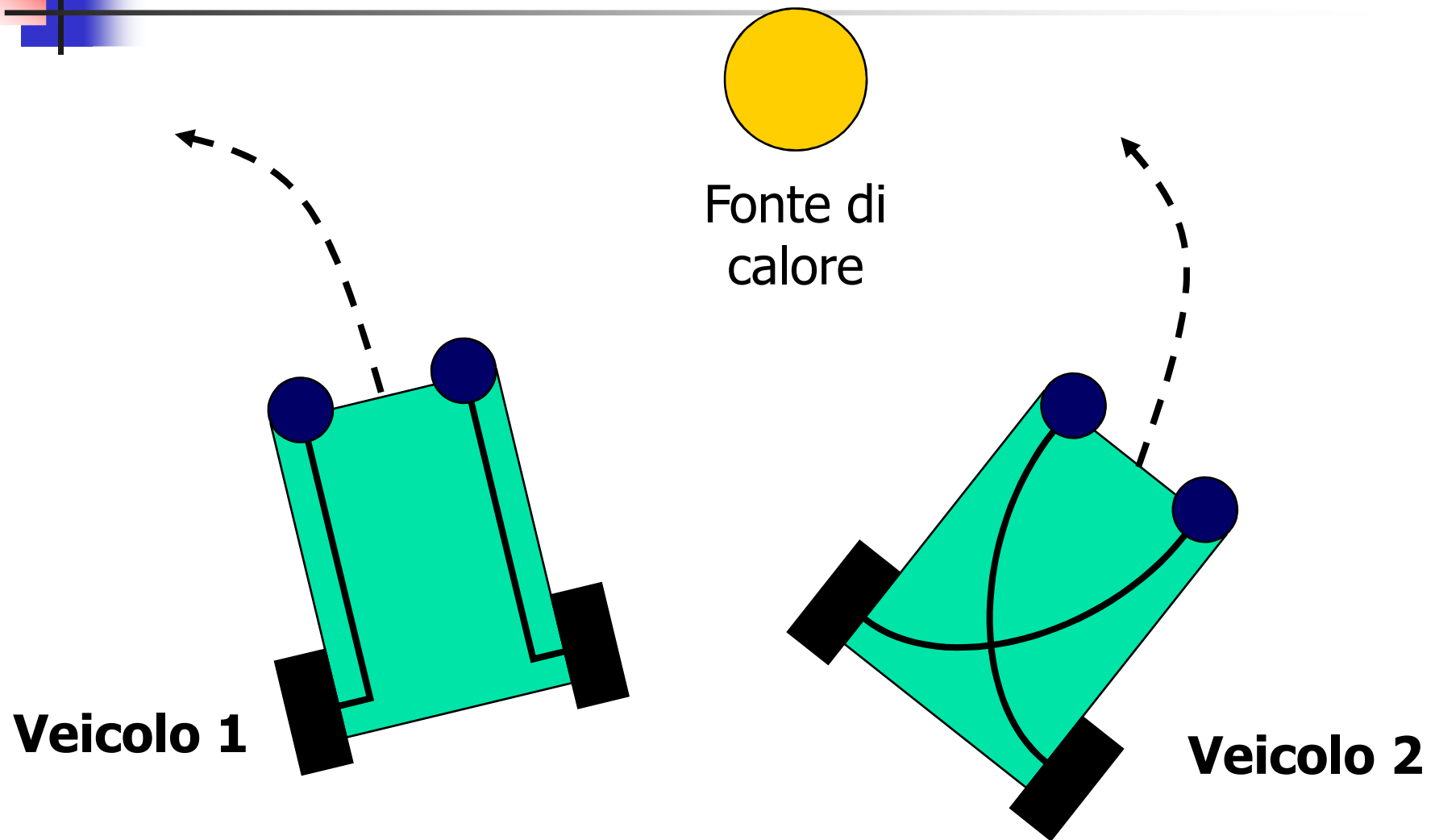
Veicolo 2

Sensori

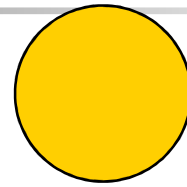


Motori

Esperimento 2: paura e aggressione

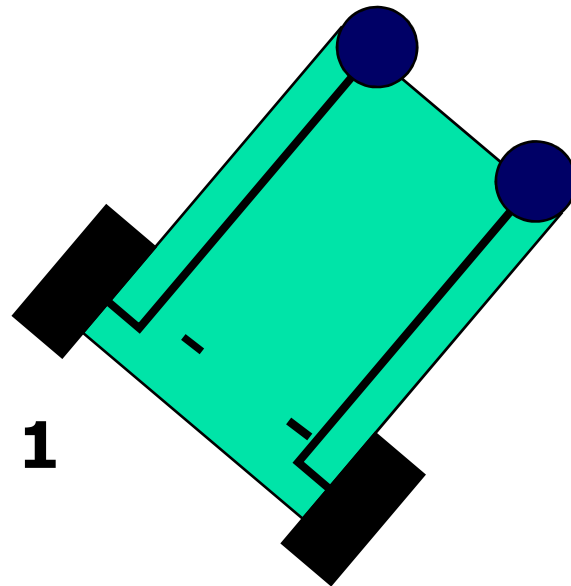


Esperimento 3: amore

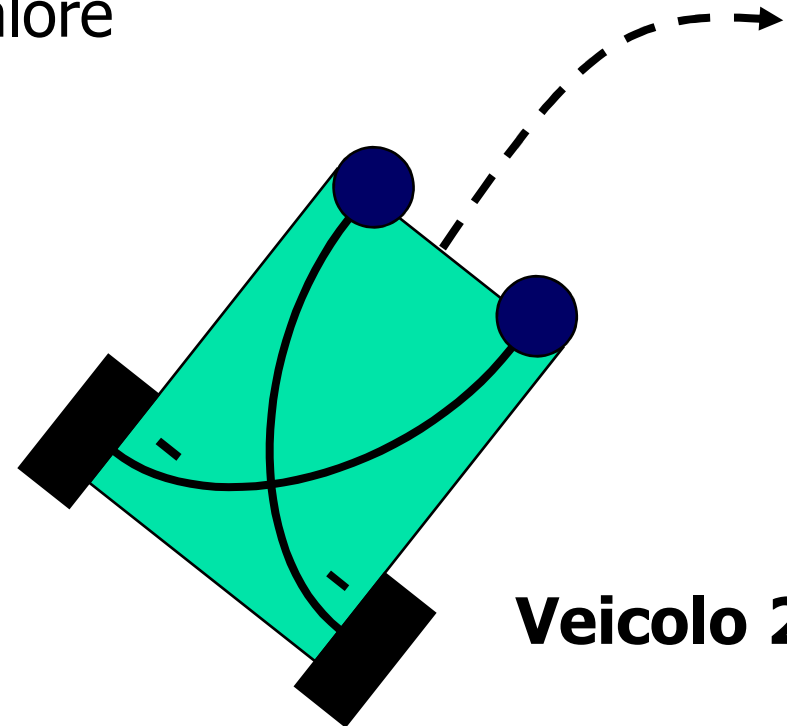


Fonte di calore

Veicolo 1



Veicolo 2



la velocità del motore è
inversamente proporzionale al
valore misurato dal sensore

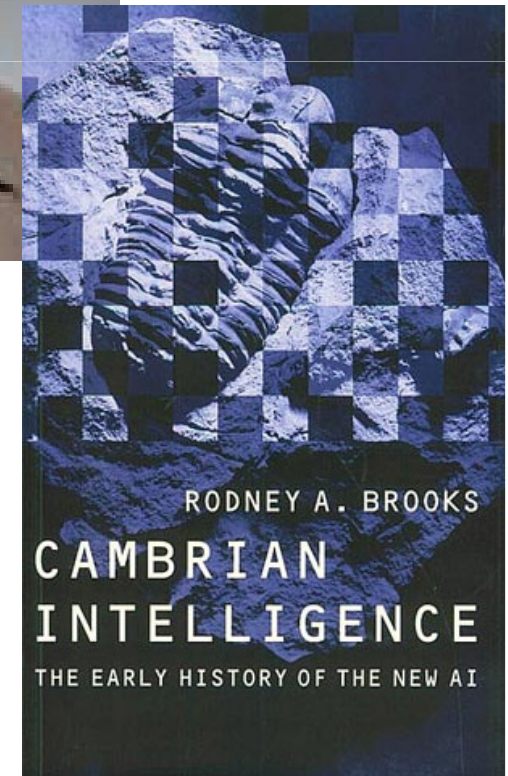
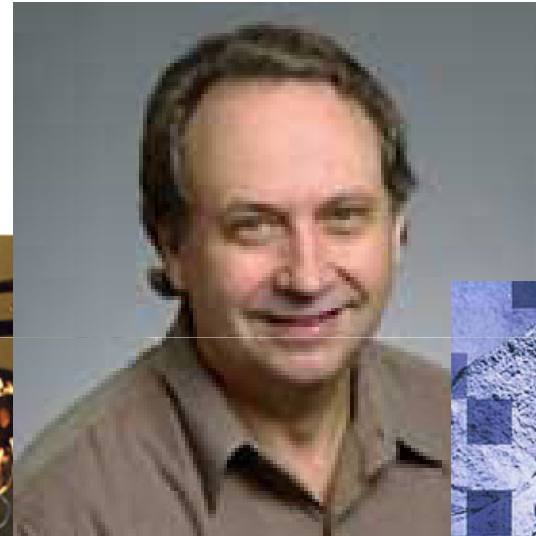


Architetture di controllo Reattive o basate sul comportamento

- I comportamenti del robot sono reazioni alle informazioni percepite dall'ambiente
- Il modulo di base di tali sistemi è costituito quindi da un **comportamento (behavior)** che è ottenuto da una relazione diretta tra sensori e attuatori
- Si parla di **behaviour-based robotics** o **sistemi reattivi**, ovvero sistemi capaci di rispondere in tempo reale agli stimoli provenienti dall'ambiente circostante

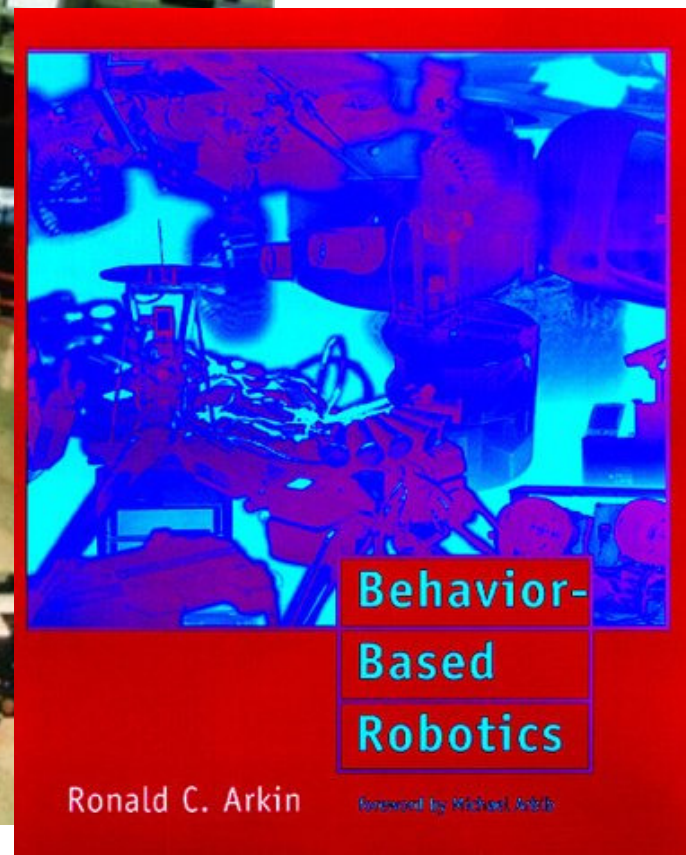
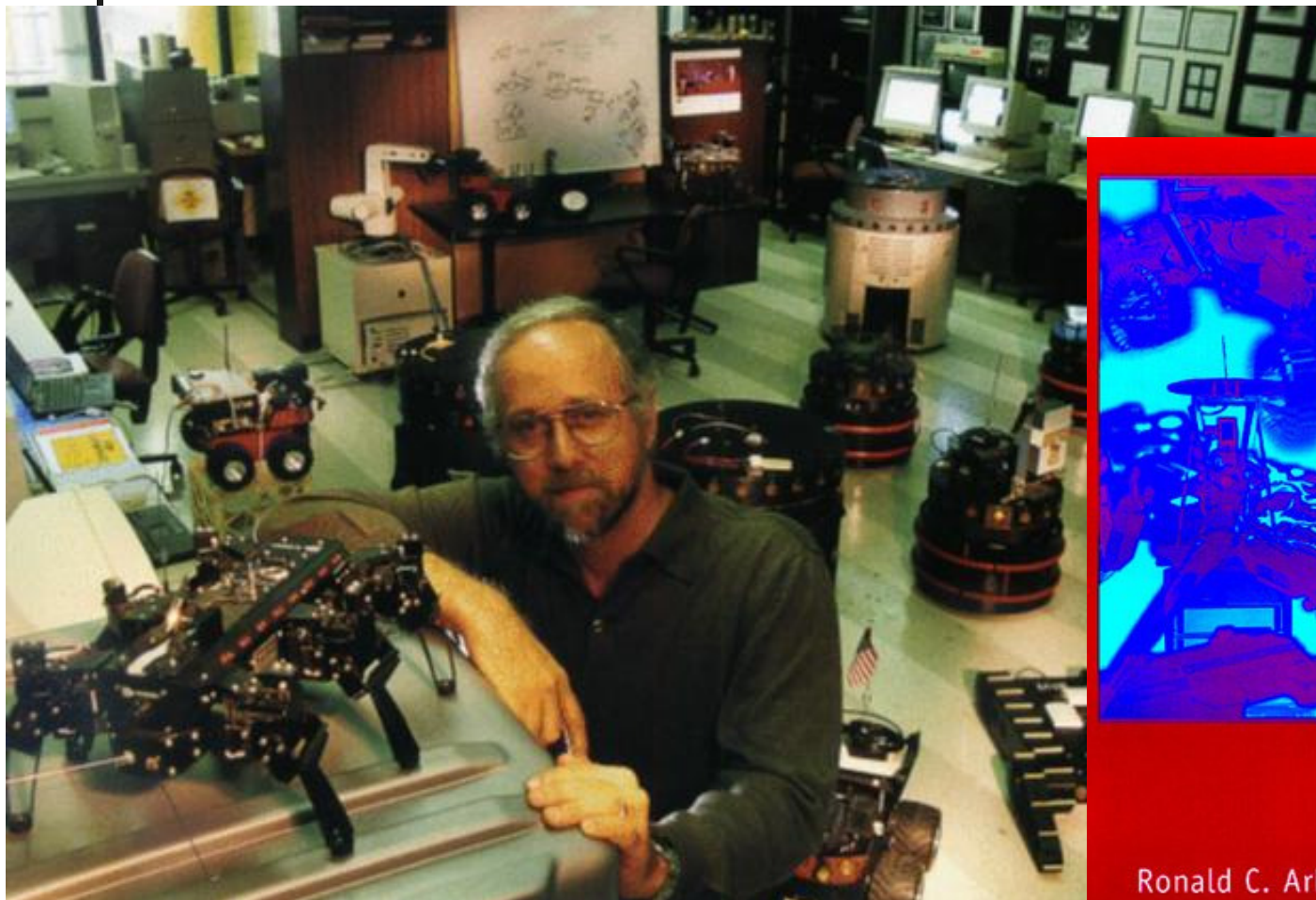
Rodney Brooks

Director of the Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, MIT



Ronald Arkin

Georgia Institute of Technology



Dalle architetture gerarchiche a quelle reattive

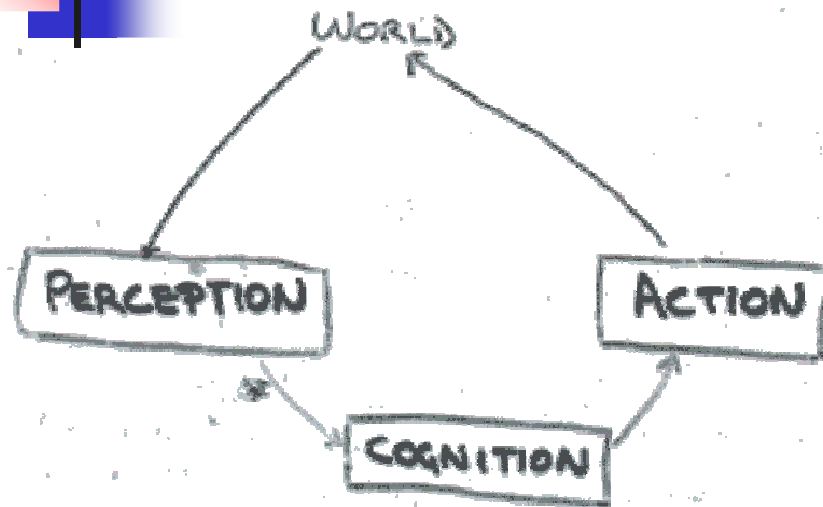


Figure 1: The traditional model where cognition mediates between perceptions and plans of actions.

deliberative, model-based

reactive, behavior-based

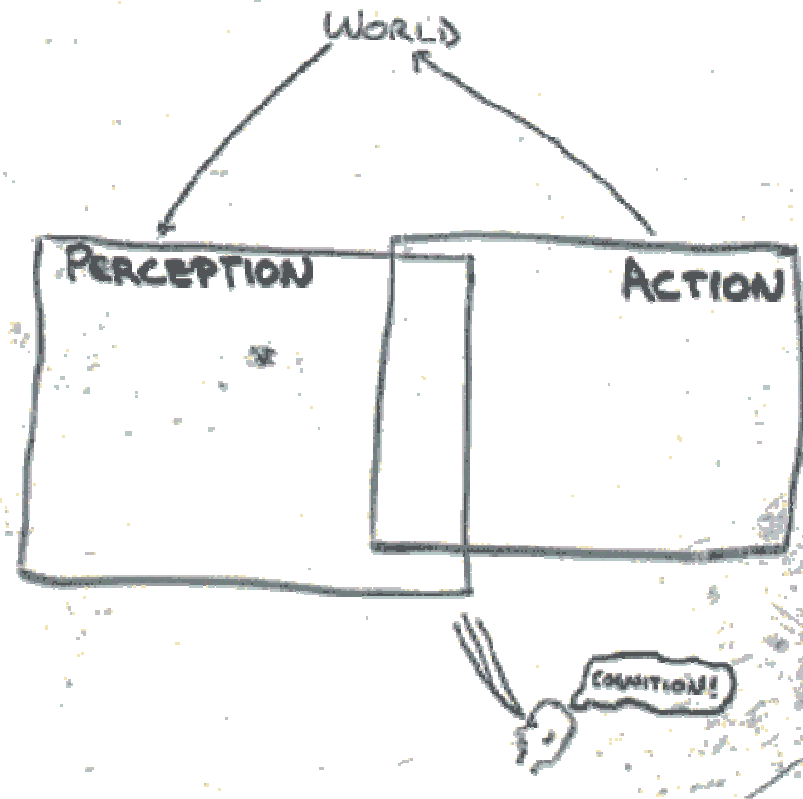


Figure 2: The new model, where the perceptual and action subsystems are all there really is. Cognition is only in the eye of an observer.



Architetture di controllo Reattive o basate sul comportamento

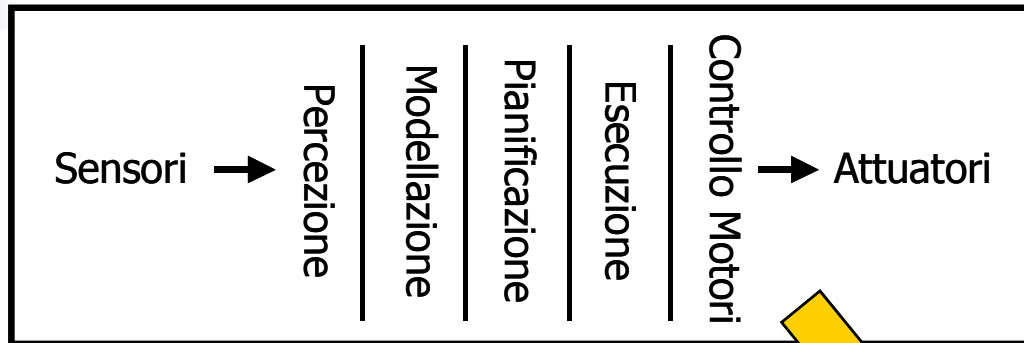
- Il robot interagisce con il mondo attraverso sensori e attuatori
- **Non esiste una rappresentazione del mondo**, (“The world is the best model” di R. A. Brooks, 1986): la conoscenza del mondo non è né modellizzata né memorizzata nel robot ma è estratta in tempo reale dal mondo stesso attraverso i sensori
- Poiché non esiste un modello del mondo, di conseguenza non esiste pianificazione a priori delle azioni del robot



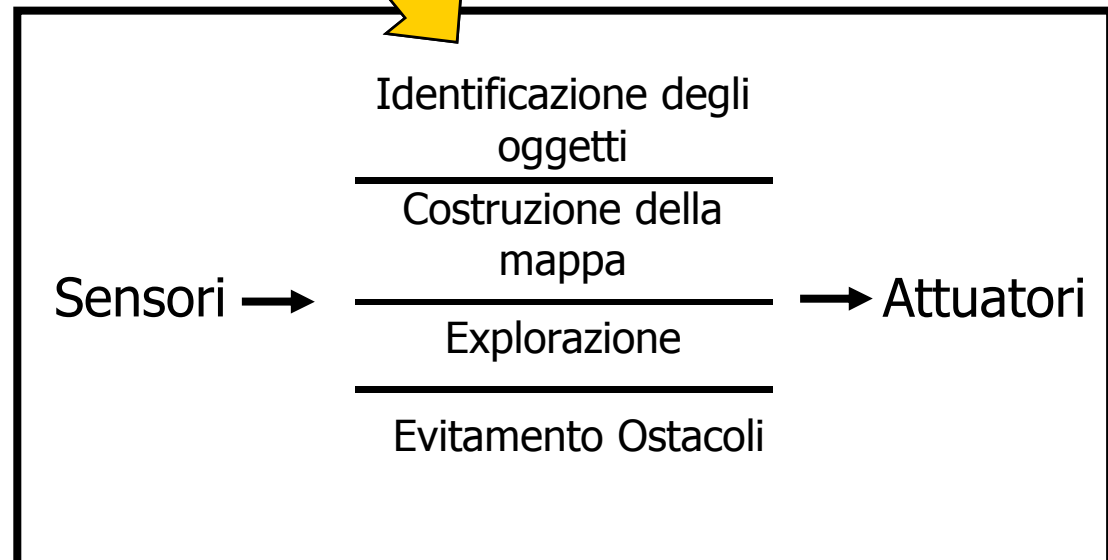
Architetture di controllo Reattive o basate sul comportamento

- Nelle architetture di controllo reattive l'esecuzione di un compito è suddivisa tra moduli ognuno dei quali ha assegnata una specifica competenza e attua un determinato comportamento del robot
- Il comportamento complessivo del robot è determinato dall'insieme dei comportamenti presenti

Dalle architetture gerarchiche alle architetture reattive

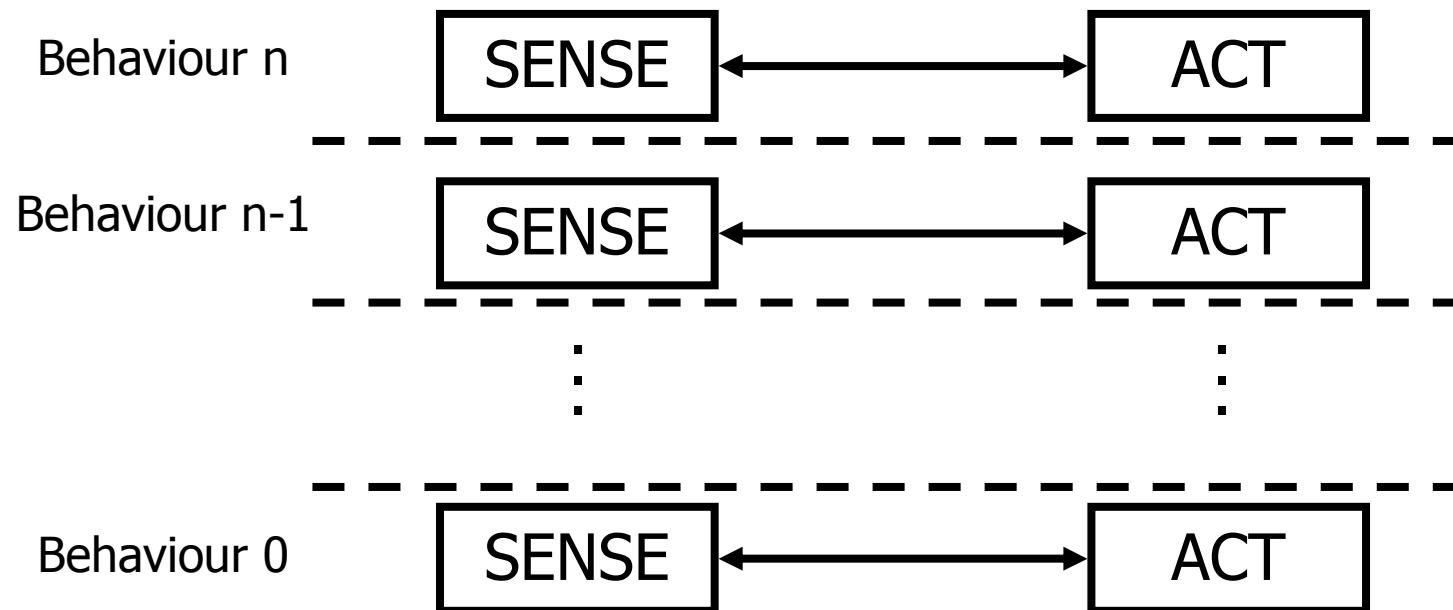


Dalla suddivisione *orizzontale e sequenziale* della catena di informazioni alla suddivisione *verticale e parallela*



Architetture di controllo Reattive o basate sul comportamento

- Decomposizione verticale che produce flussi multipli di informazione ciascuno relativo ad una particolare funzione assegnata al robot.
- In questo modo, ogni sequenza si occupa di uno specifico aspetto nel funzionamento globale del sistema e può svilupparsi parallelamente ad altri processi





Architetture di controllo Reattive o basate sul comportamento

- **Principio di indipendenza:** i vari moduli devono essere mutuamente indipendenti tra loro. Conseguenza immediata all'applicazione di questo principio è l'impossibilità di mantenere un modello del mondo completo, condivisibile tra tutti i moduli.
- **Principio di località:** ciascun sottocompito richiede, per completarsi, solo una parte limitata di tutta l'informazione sensoriale disponibile. Il robot risponde solo ad eventi del mondo senza mantenere stati persistenti: la memoria di cui ha bisogno è realizzata leggendo direttamente la situazione ambientale che gli indica il modo operativo corrente.



Architetture di controllo Reattive o basate sul comportamento

Vantaggi

- Non esiste un modello del mondo
- Alta adattabilità alle modifiche dell'ambiente (risposte in tempo reale)
- Bassa complessità di ogni livello e basso costo computazionale complessivo del sistema
- E' possibile avere parallelismo nel controllo
- L'estensione dei comportamenti è relativamente semplice



Architetture di controllo Reattive o basate sul comportamento

Svantaggi

- Difficoltà nel prevedere a priori il comportamento globale del robot
- Gestione della concorrenza tra moduli
- Aumentando i comportamenti si aumenta anche la complessità della gestione della concorrenza tra moduli con conseguente difficoltà nella risoluzione di conflitti



Un esempio di architettura reattiva: architettura subsumption

Sistema di controllo per la navigazione
senza collisioni di un robot mobile
dotato di sensori ad ultrasuoni

R. A. Brooks, "A Robust Layered Control
System for a Mobile Robot",
Cambrian Intelligence, The MIT Press

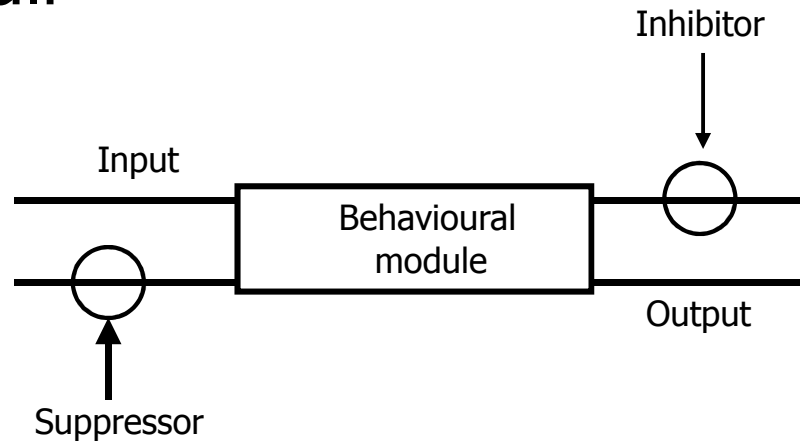


Subsumption Architecture (R. Brooks)

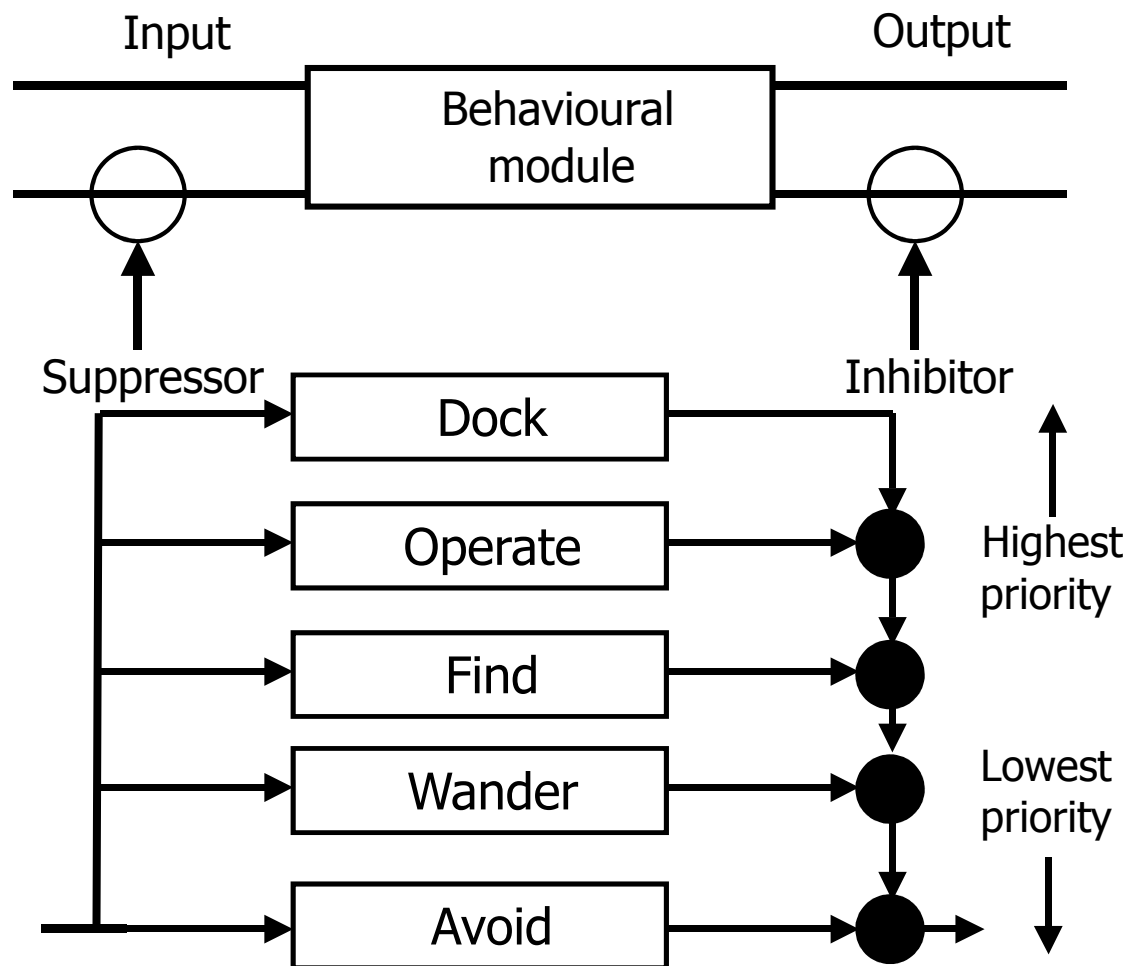
- Nelle architetture subsumption l'esecuzione di un compito è suddivisa tra moduli ognuno dei quali ha assegnata una specifica competenza e attua un determinato comportamento del robot
- I comportamenti sono organizzati in una architettura a strati ed hanno priorità diversa a seconda del loro livello
- Comportamenti a livello più alto (high priority) possono inibire le operazioni o sopprimere l'input dei comportamenti a livello più basso (low priority)

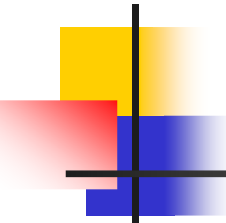
Architettura Subsumption: soppressione e inibizione

- Ogni modulo ha delle linee di output e di input.
- Linee di output di un modulo possono essere collegate a linee di input o di output di altri moduli



Subsumption Architecture (R. Brooks)





Architettura Subsumption: i livelli di competenza dell'architettura

Reason about behavior of objects

Plan changes to the world

Identify objects

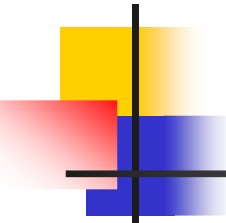
Monitor changes

Build maps

Explore

Wander

Avoid objects



Architettura Subsumption: i livelli di competenza dell'architettura

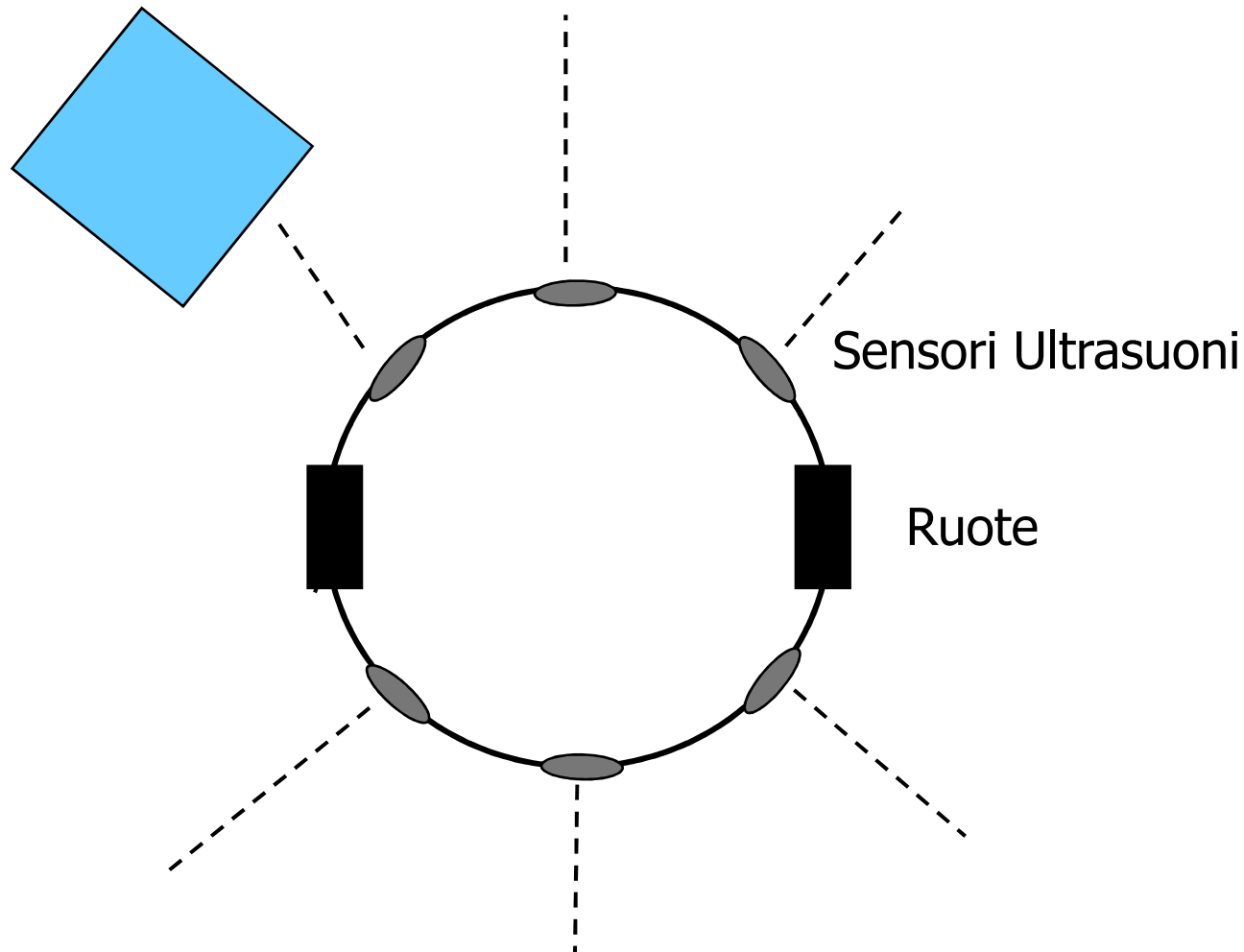
- Livello 0: evitare gli ostacoli
- Livello 1: navigazione casuale nell'ambiente
- Livello 2: esplorazione del mondo e 'identificazione' dei punti di interesse
- Livello 3: costruzione della mappa dell'ambiente (relazioni tra punti)
- Livello 4: rilevazione dei cambiamenti dell'ambiente statico
- Livello 5: ragionamento sul mondo in termini di esecuzione di task in relazione al rilevamento di determinati oggetti
- Livello 6: formulazione ed esecuzione di comportamenti che determinano cambiamenti dello stato del mondo
- Livello 7: ragionamento sui comportamenti degli oggetti e modifica dei piani in accordo



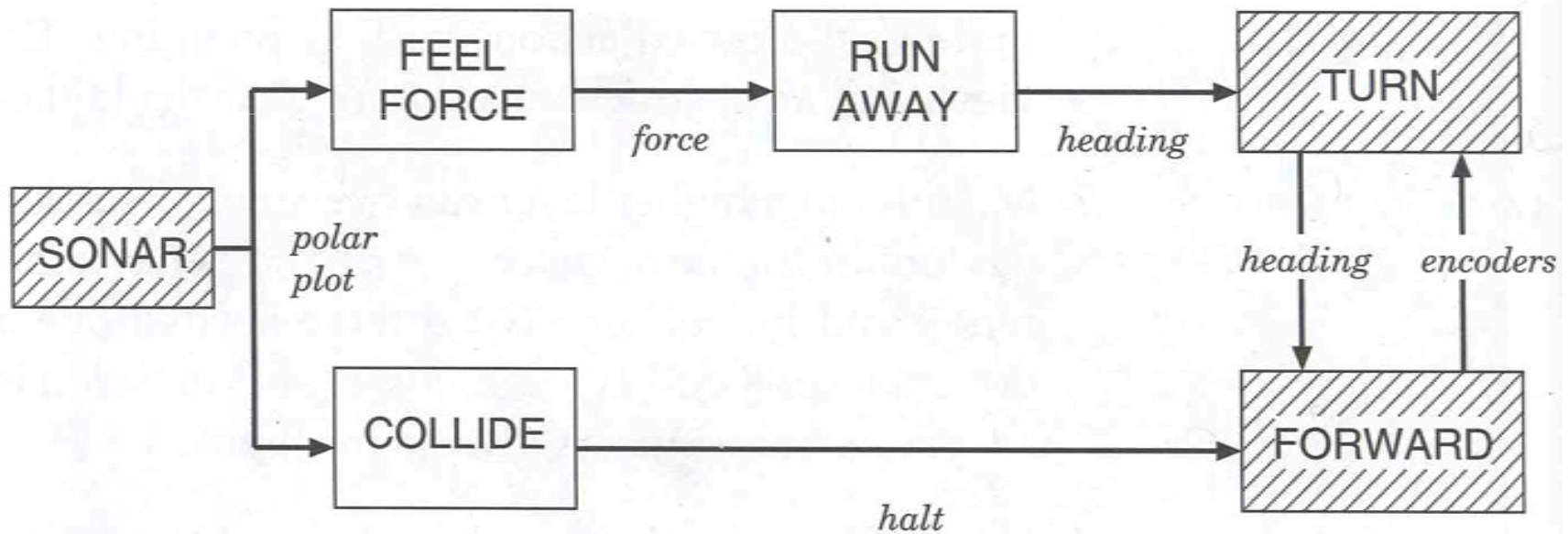
Architettura Subsumption: implementazione del sistema

- Ogni strato dell'architettura è implementato con una macchina a stati finiti in grado di inviare messaggi alle altre e di gestire proprie strutture di dati
- Non esiste memoria globale condivisa
- Ogni macchina agisce in maniera asincrona rispetto agli altri, monitorando i propri input e inviando messaggi di output
- Input ai moduli possono essere soppressi e output inibiti dagli output di altri moduli (meccanismo tramite il quale strati superiori assumono il controllo degli stati inferiori)

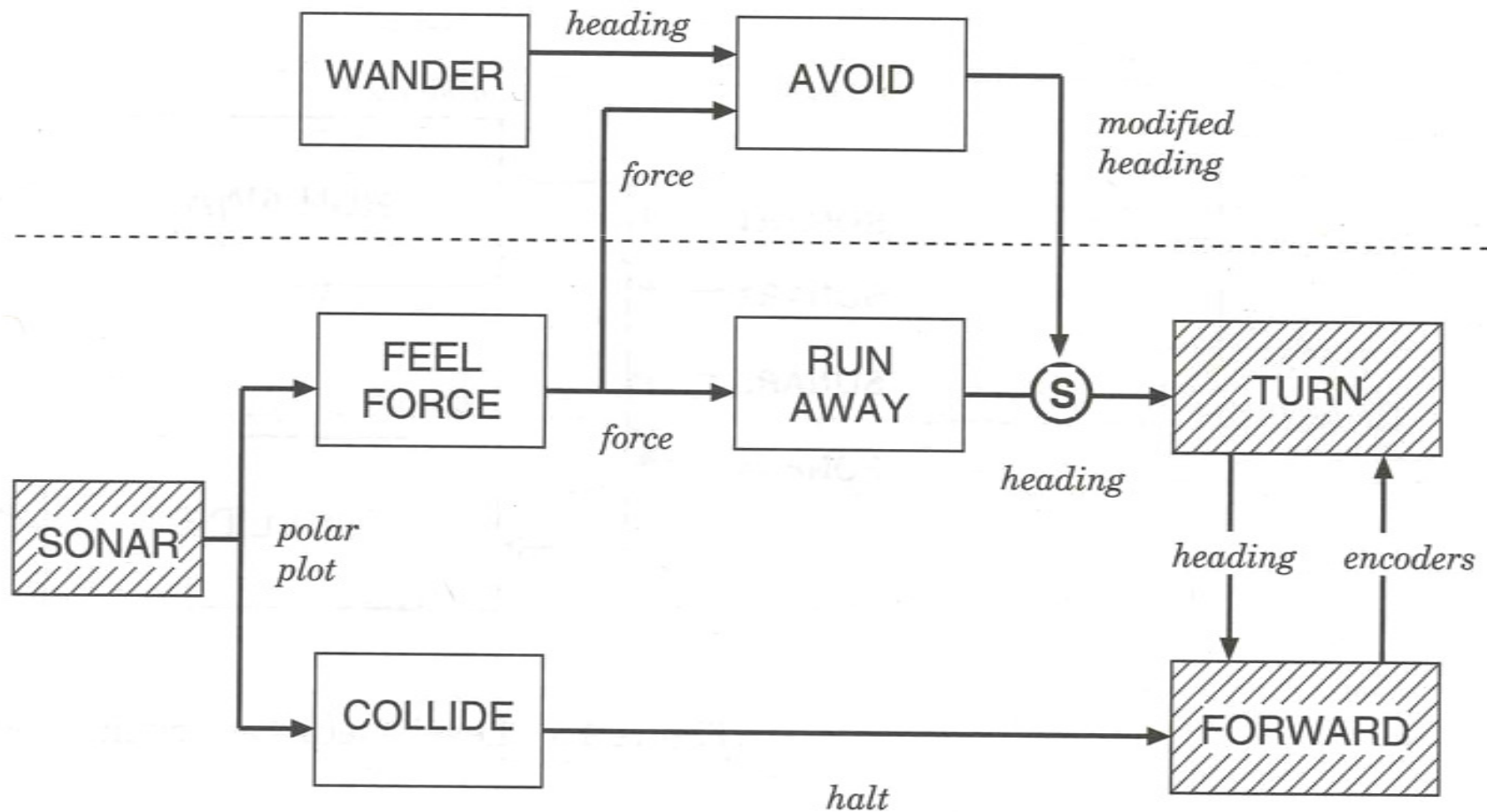
Architettura Subsumption: implementazione del sistema



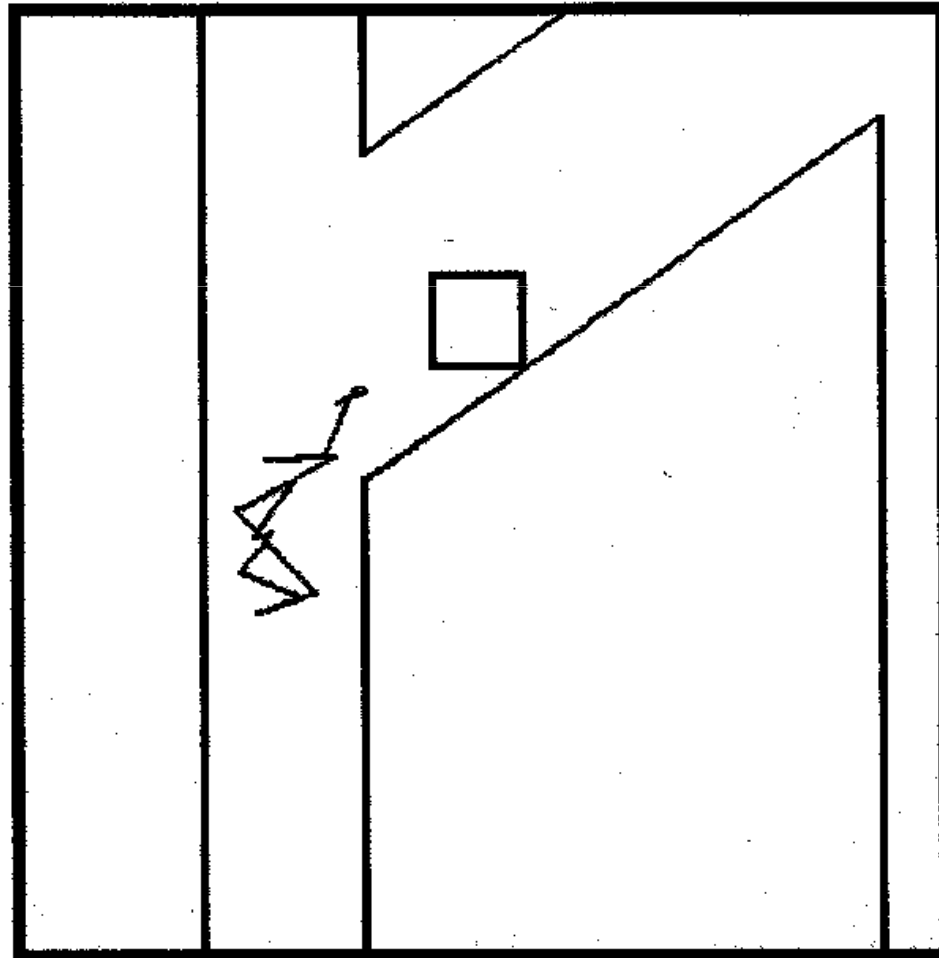
Il livello 0 - Avoid



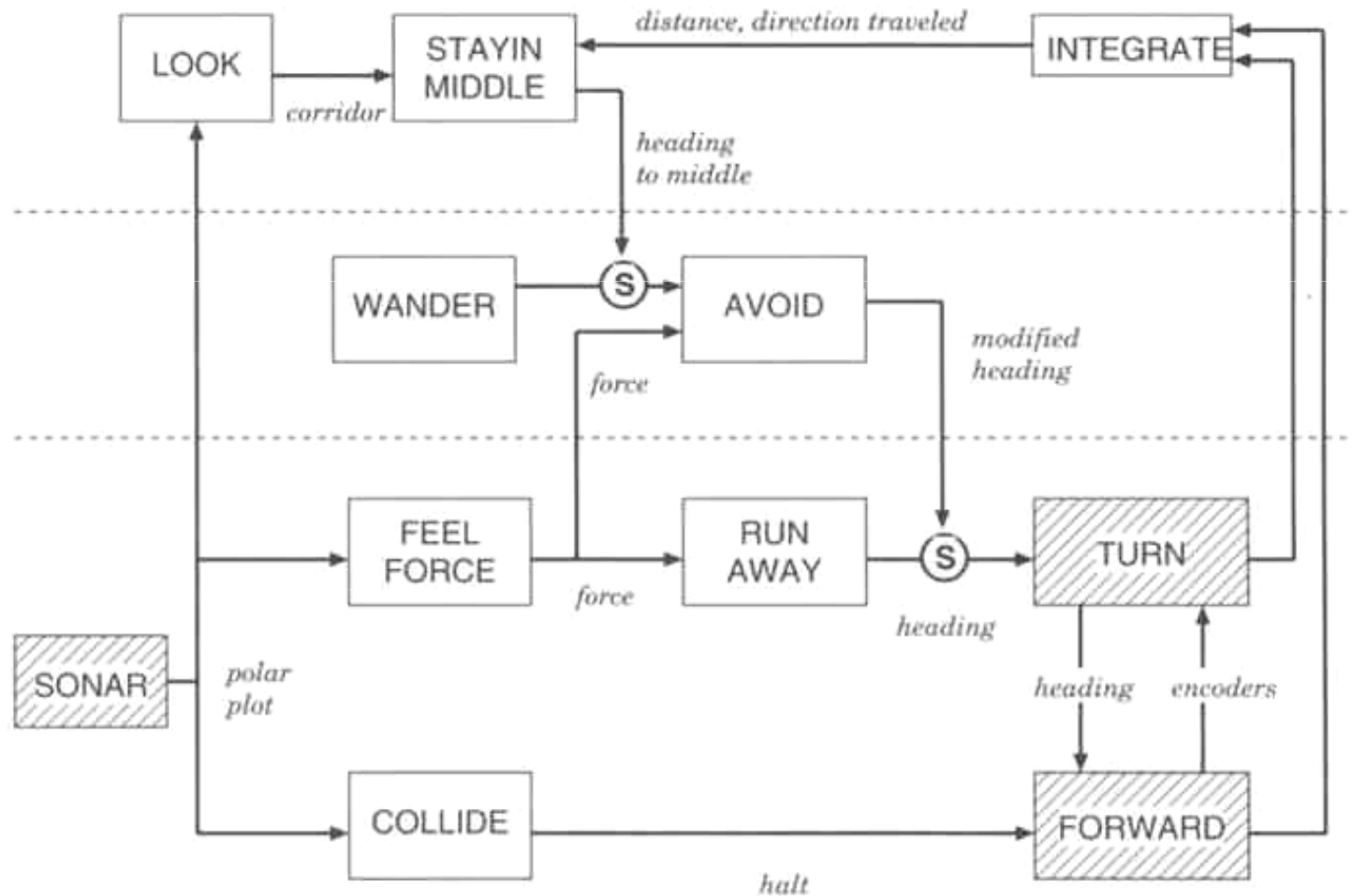
Il livello 1 - Wander



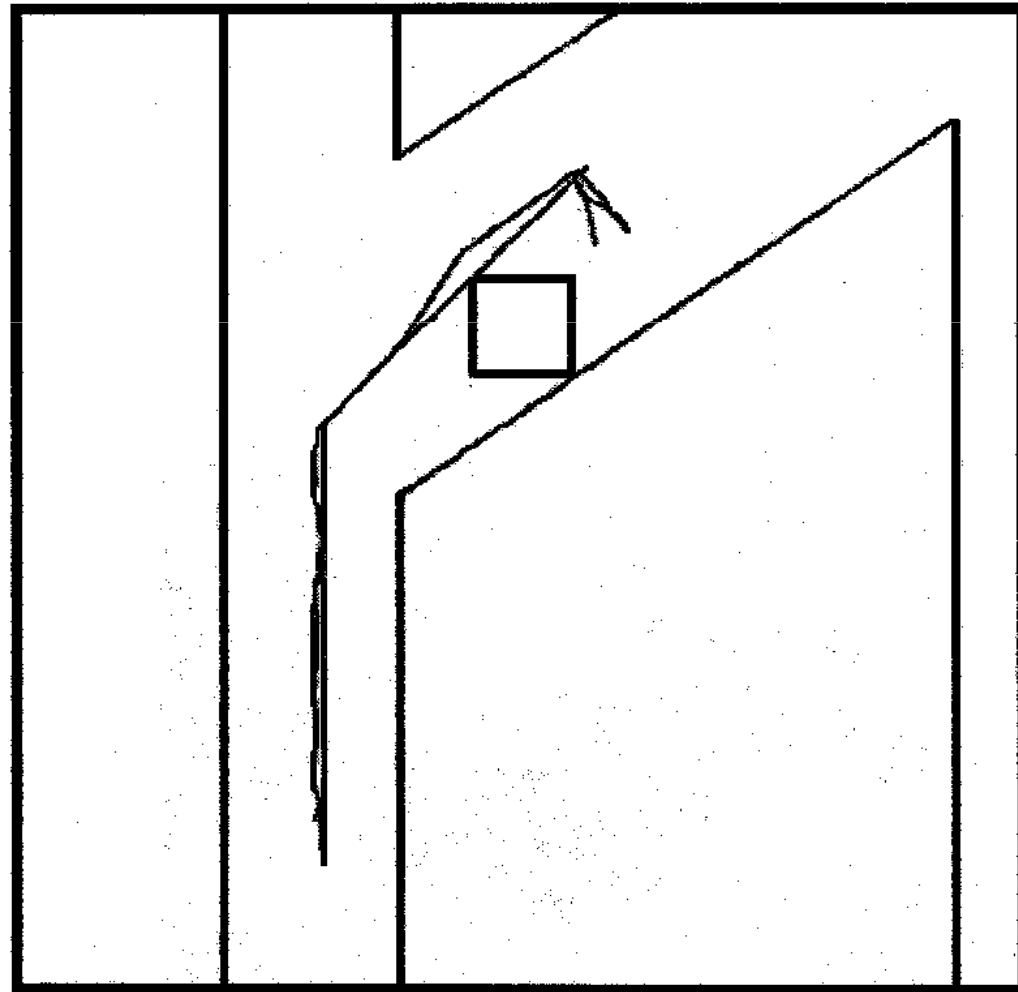
Risultati delle simulazioni del livello 0 e 1



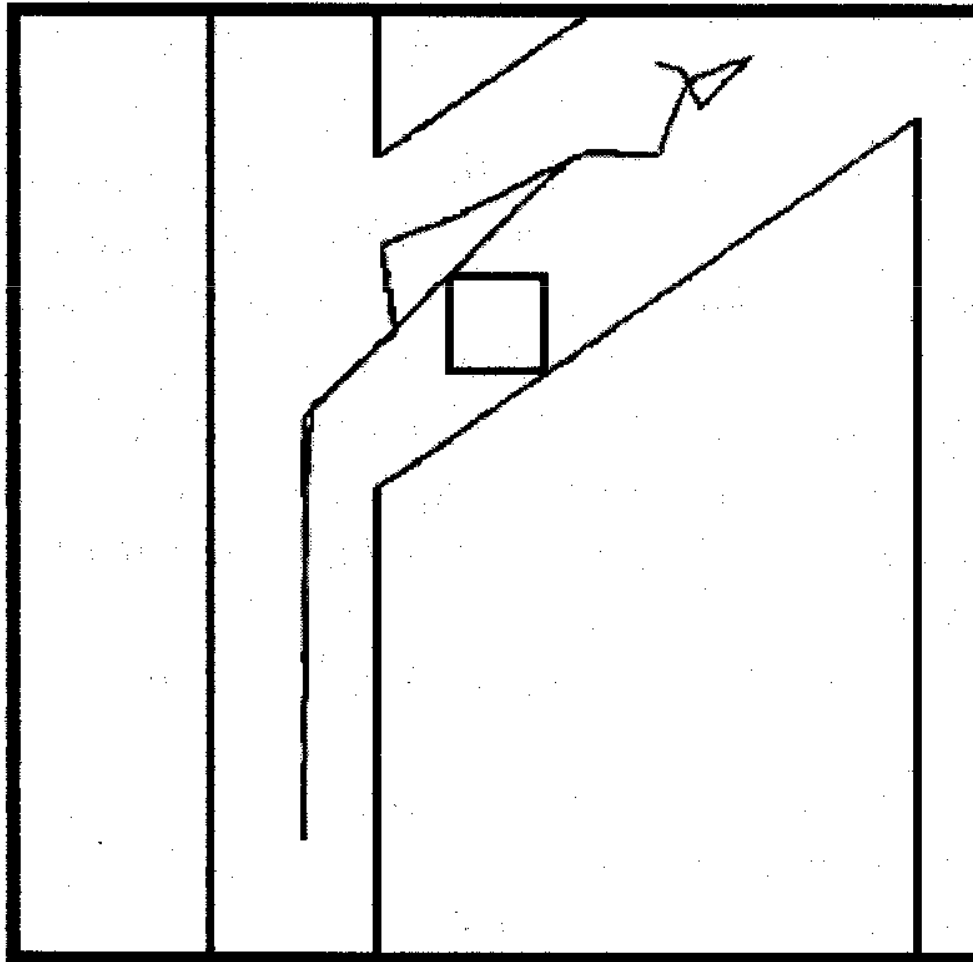
Il livello 2 - Explore



Risultati delle simulazioni del livello 0,1 e 2



Risultati delle simulazioni del livello 0,1 e 2



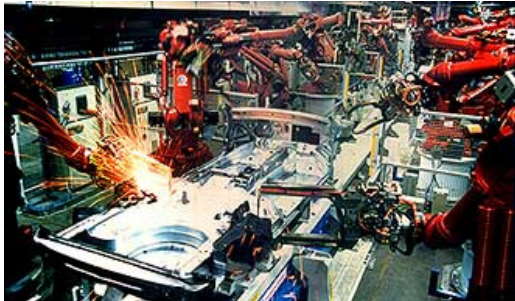


Architetture Ibride

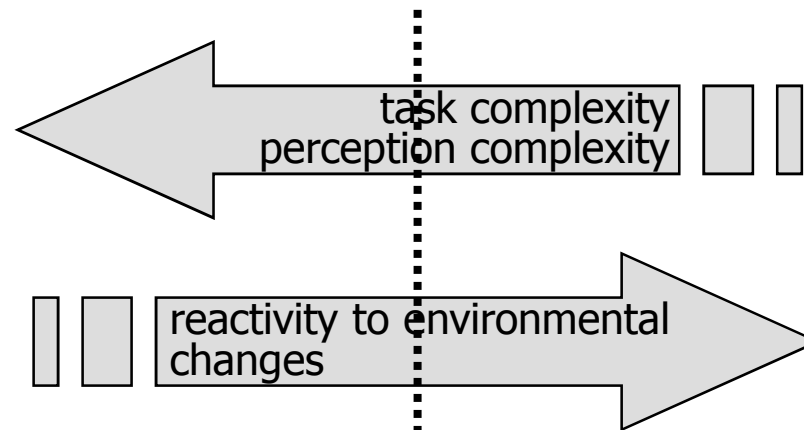
- Un approccio puramente reattivo dota il robot della capacità di eseguire compiti semplici in maniera efficiente, come ad esempio evitare gli ostacoli e adattarsi alle variazioni del mondo, ma non garantisce l'esecuzione di task più complessi, che includono modellizzazione dell'ambiente e comportamenti più complessi
- L'integrazione dei metodi reattivi con i metodi gerarchici combina l'efficienza della pianificazione con la flessibilità dei sistemi di controllo reattivo

Architetture Ibride

deliberative,
model-based



- Sequential structure
- use of models of the environment



hybrid reactive-
deliberative approaches
(Arkin, Mataric, Gat)

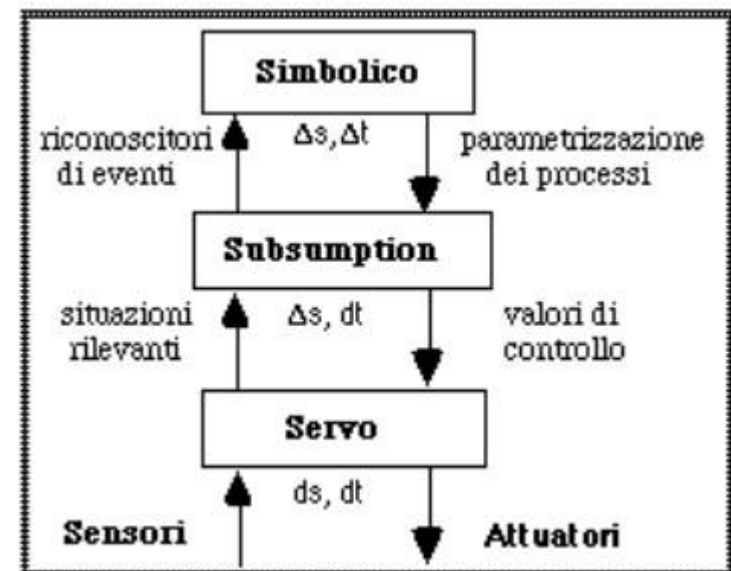
reactive,
behavior-based



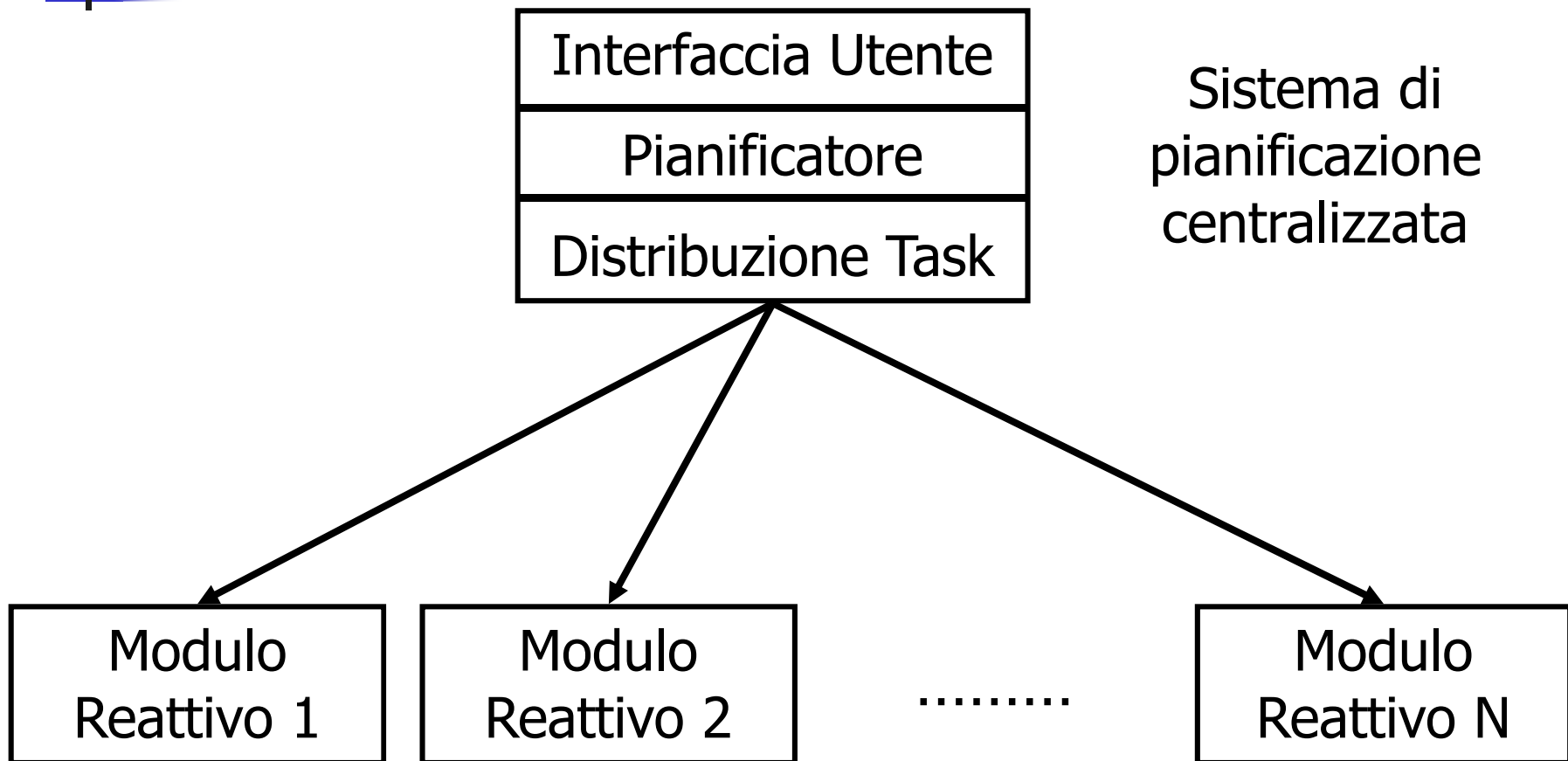
- layered, parallel and asynchronous structure
- no use of global, long-term symbolic models of the environment

Architetture Ibride

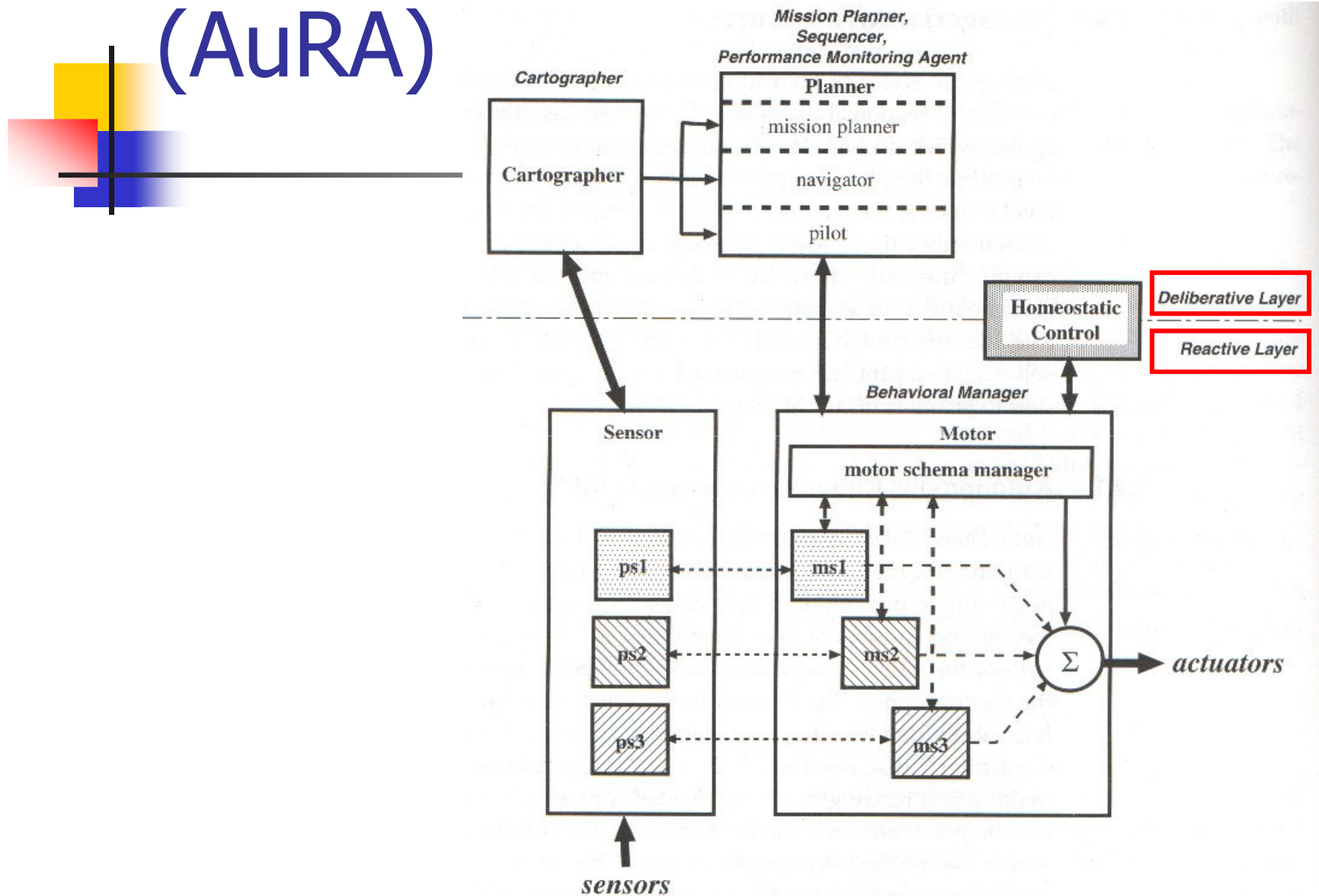
- Tipicamente una architettura ibrida comprende un modulo pianificatore strategico e un modulo pianificatore tattico per la gestione dei comportamenti di un robot.
- Il pianificatore strategico pianifica a lungo termine le azioni del robot, individuando la sequenza di sotto-obiettivi da realizzare per raggiungere il goal e passando i risultati per l'esecuzione al pianificatore tattico.
- Il pianificatore tattico inizializza e monitora i comportamenti prendendosi cura degli aspetti temporali per la loro coordinazione.



Schema generale di una architettura ibrida



Autonomous Robot Architecture (AuRA)



By Ronald Arkin

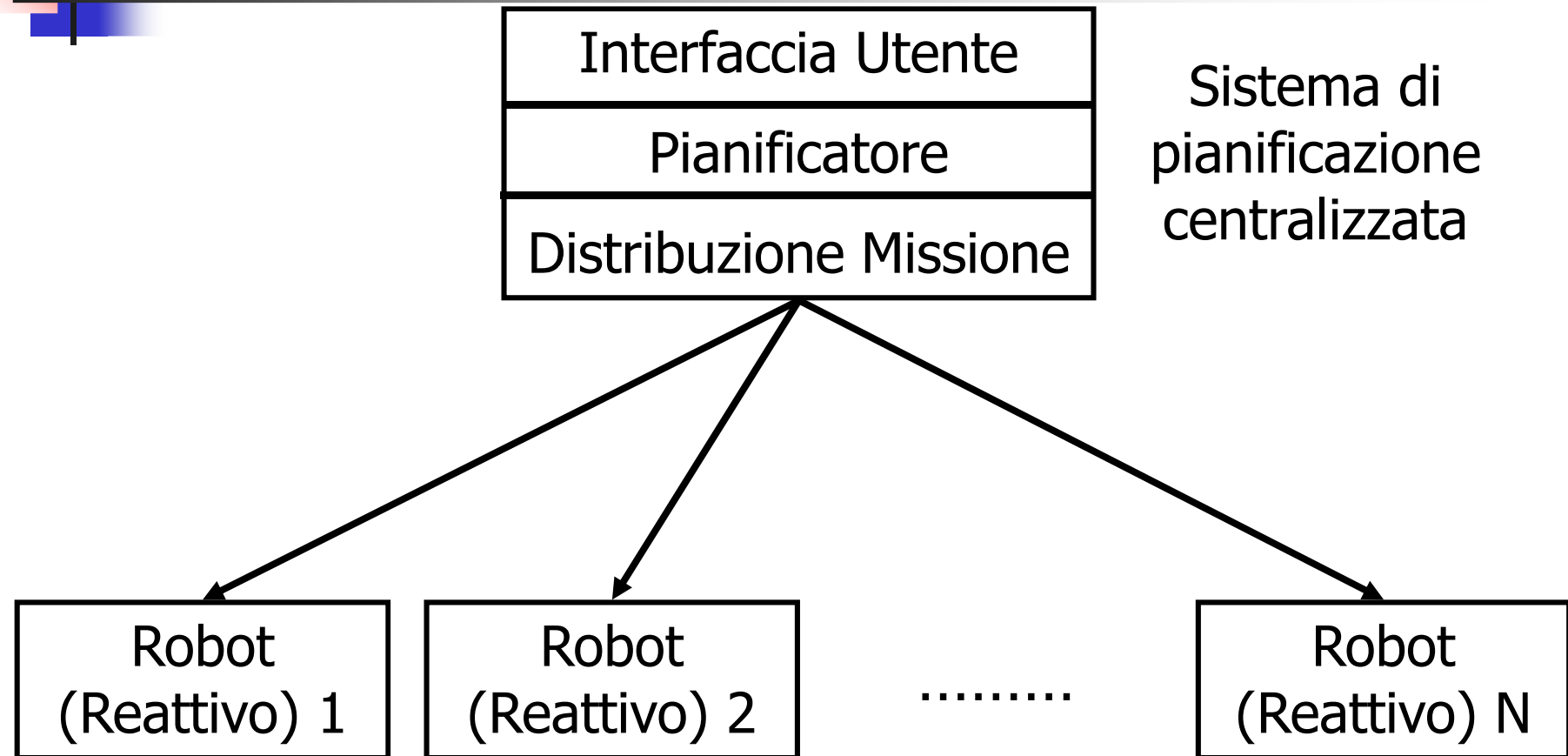
Figure 7.3 Layout of AuRA, showing the five subsystems.



Architetture decentralizzate o distribuite

- Un approccio alternativo all'uso di un unico sistema robotico per l'esecuzione di compiti è l'uso di un gruppo di sistemi robotici, ciascuno di complessità inferiore, che cooperano per l'esecuzione dello stesso compito.
- L'intelligenza è distribuita tra i vari sistemi, ognuno dei quali è autonomo

Architetture distribuite (eventualmente ibride) per robot cooperanti



Traditional classification of robotic architectures

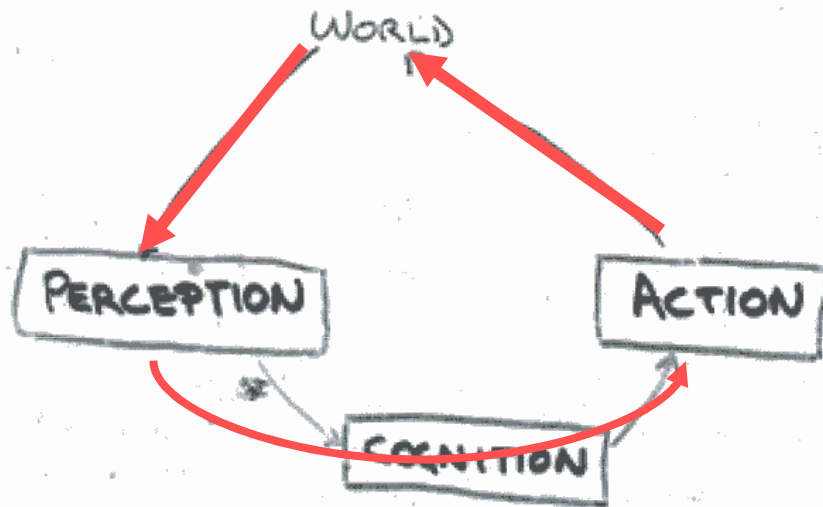


Figure 1: The traditional model where cognition mediates between perceptions and plans of actions.

deliberative, model-based

reactive, behavior-based

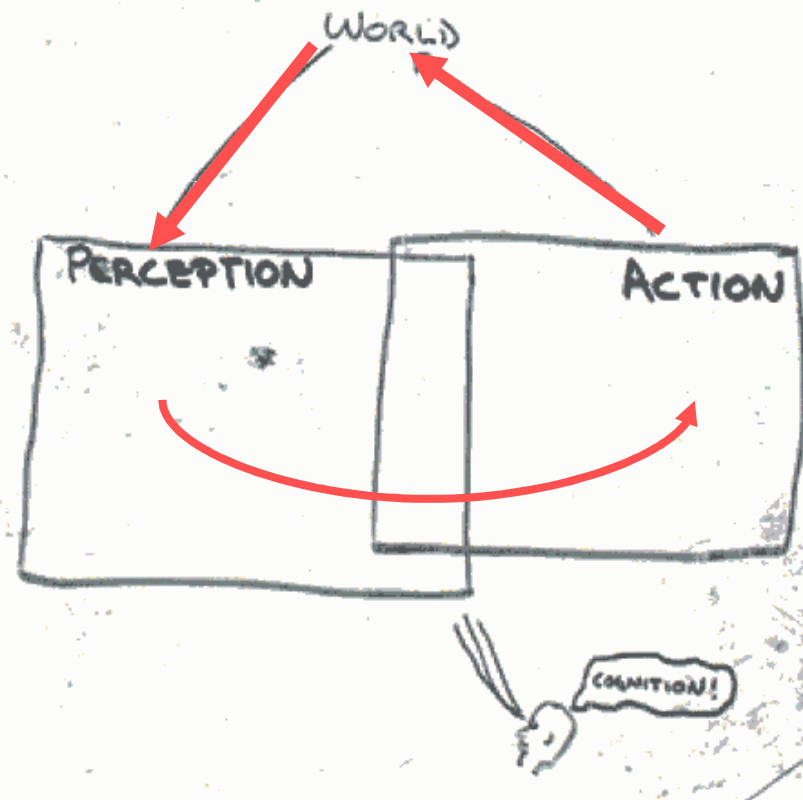
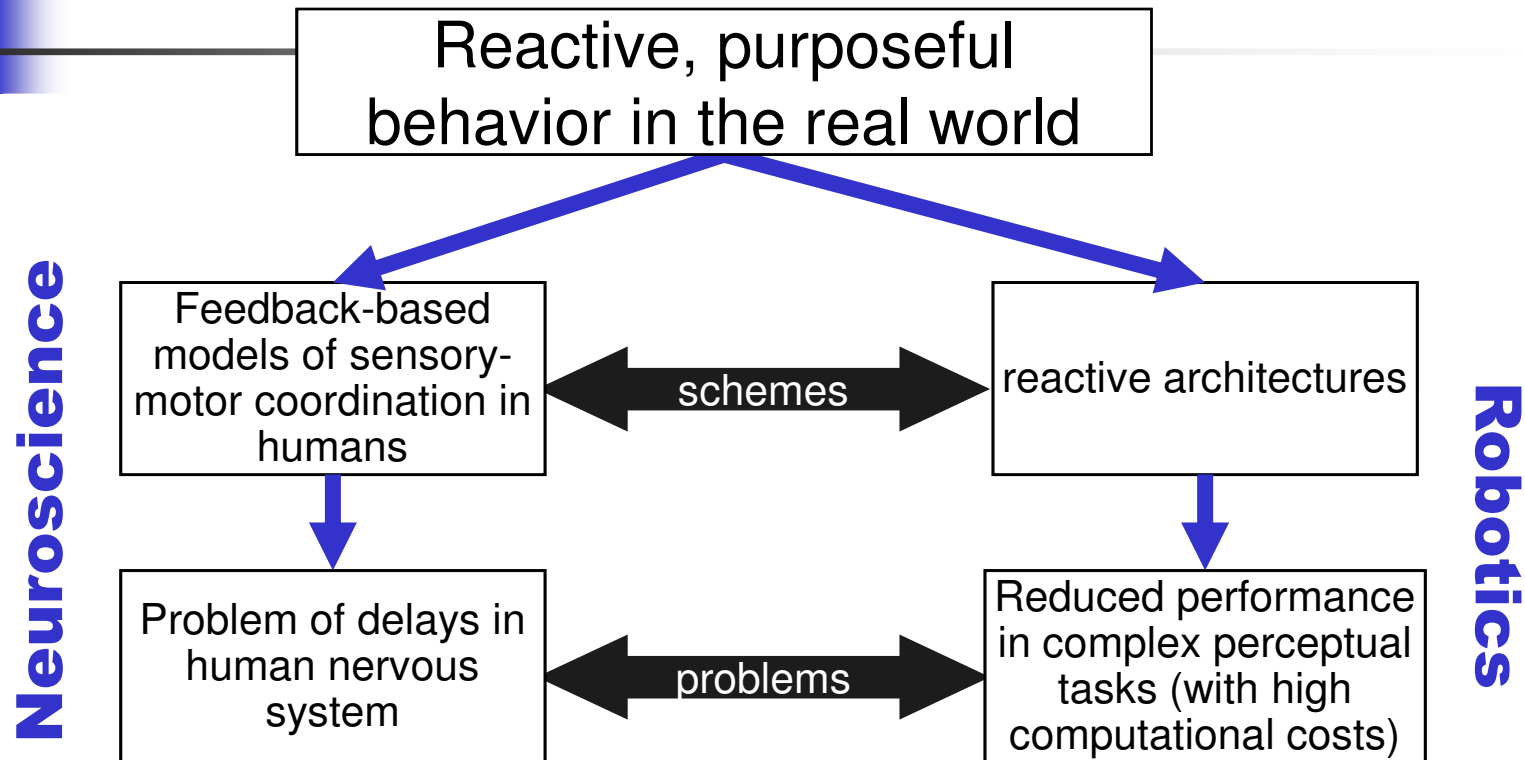


Figure 2: The new model, where the perceptual and action subsystems are all there really is. Cognition is only in the eye of an observer.

R. Brooks, "Cambrian Intelligence",
MIT Press, 2000

A parallel feedback-based explanation in Neuroscience



Delays in human nervous system

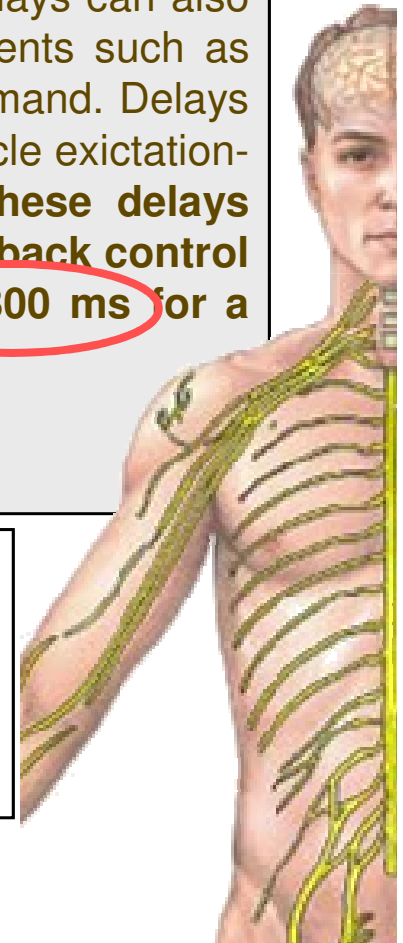
“In motor control **delays** arise in **sensory transduction**, **central processing**, and in the **motor output**. Sensor transduction latencies are most noticeable in the visual system where the retina introduces a delay of 30-60 ms, but sensory conduction delays can also be appreciable. Central delays are also present due to such ill-defined events such as neural computation, decision making and the bottlenecks in processing command. Delays in the motor output result from motorneuronal axonal conduction delays, muscle excitation-contraction delays, and phase lags due to the inertia of the system. **These delays combine to give an unavoidable feedback delay within the negative feedback control loop, and can lie between about 30 ms for a spinal reflex up to 200-300 ms for a visually guided response.**”

R.C. Miall, D.J. Weir, D.M. Wolpert, J.F. Stein, “Is the cerebellum a Smith predictor?”, *Journal of Motor Behavior*, vol. 25, no. 3, pp. 203-216, 1993

“Fast and coordinated arm movements cannot be executed under pure feedback control because biological feedback loops are both too slow and have small gains”

M. Kawato, Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 718-727(1999). Elsevier Science Ltd.

- A. Berthoz, *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris, 1997
- R.S. Johansson, “Sensory input and control of grip”, in M. Glickstein (Ed.), *Sensory Guidance of Movements*. John Wiley, Chichester, UK, pp. 45-59, 1998





Anticipation in neuroscience

1. Sensory anticipation for obtaining fast perception-action cycles

- **R.C. Miall and D.M. Wolpert**, Forward Models for Physiological Motor Control. *Neural Networks*, vol. 9, no. 8, pp. 1265-1279, 1996
- **M. Kawato**, Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 718-727(1999). Elsevier Science Ltd.
- **R.S. Johansson**, Sensory input and control of grip. In *Sensory Guidance of Movements*, John Wiley, Chichester, UK, pp. 45-59, 1998

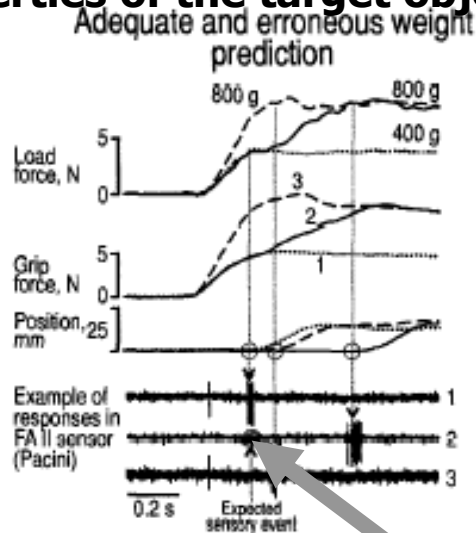
2. Motor anticipation and preparation

- **A. Berthoz**, *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris, 1997
- **M.F. Land and D.N. Lee**, Where we look when we steer. *Nature*, no. 369, pp. 742-744, 1994
- **F. Lacquaniti and C. Maioli**, The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching. *The Journal of Neuroscience*, vol. 9, pp. 134-148, 1989

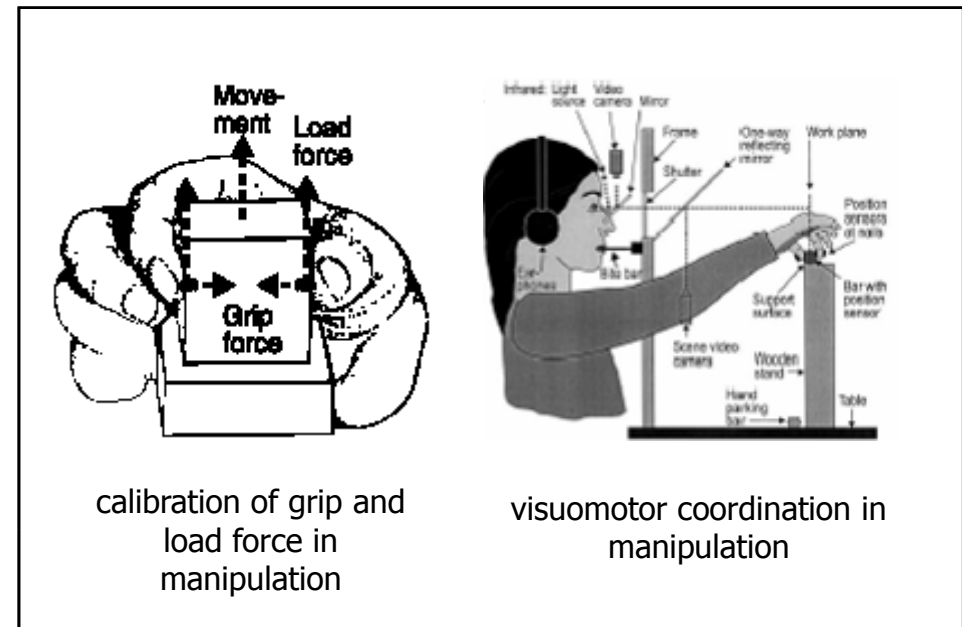
Sensory anticipation proposed by Johansson

“Because of the long time delays with feedback control the swift coordination of fingertip forces during self-paced everyday manipulation of ordinary ‘passive’ objects must be explained by other mechanisms.

Indeed, the brain relies on feedforward control mechanisms and takes advantage of the stable and predictable physical properties of these objects by parametrically adapting force motor commands to the relevant physical properties of the target object.”

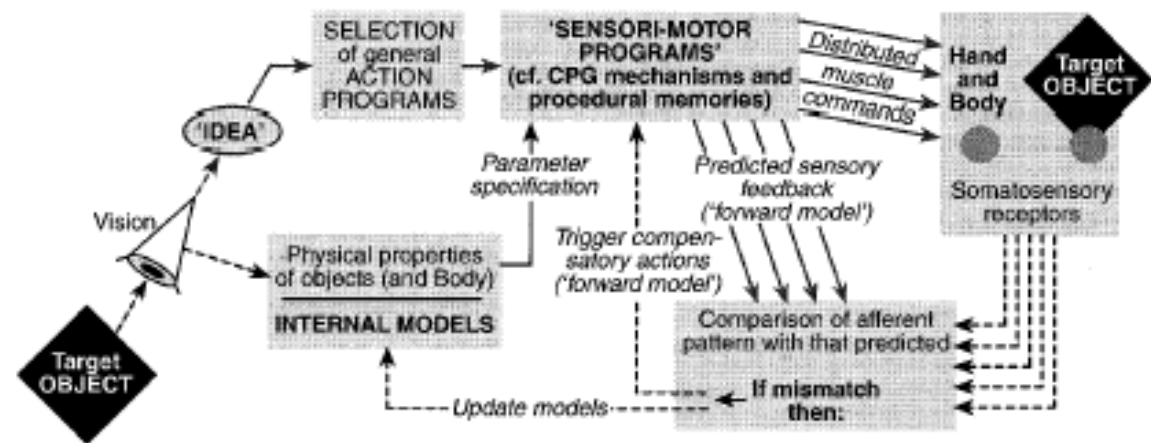


expected sensory event



calibration of grip and load force in manipulation

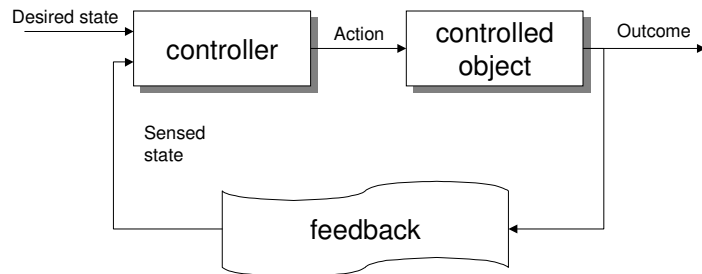
visuomotor coordination in manipulation



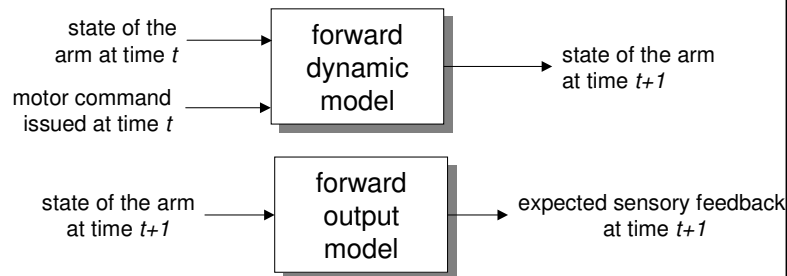
corrections are generated when expected sensory inputs don't match the actual ones

The Smith Predictor

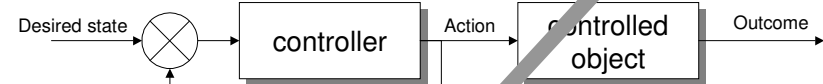
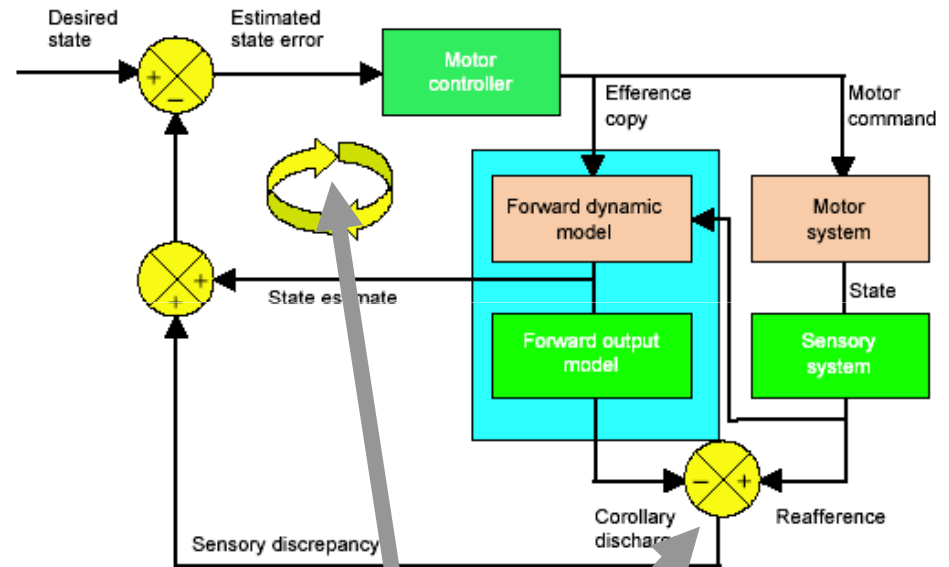
Problem: negative feedback mechanisms of human sensorimotor coordination are too slow, due to conduction and processing delays



Idea: to use sensory anticipations, obtained by forward models of the arm dynamics and of the sensory output, to compensate time delays

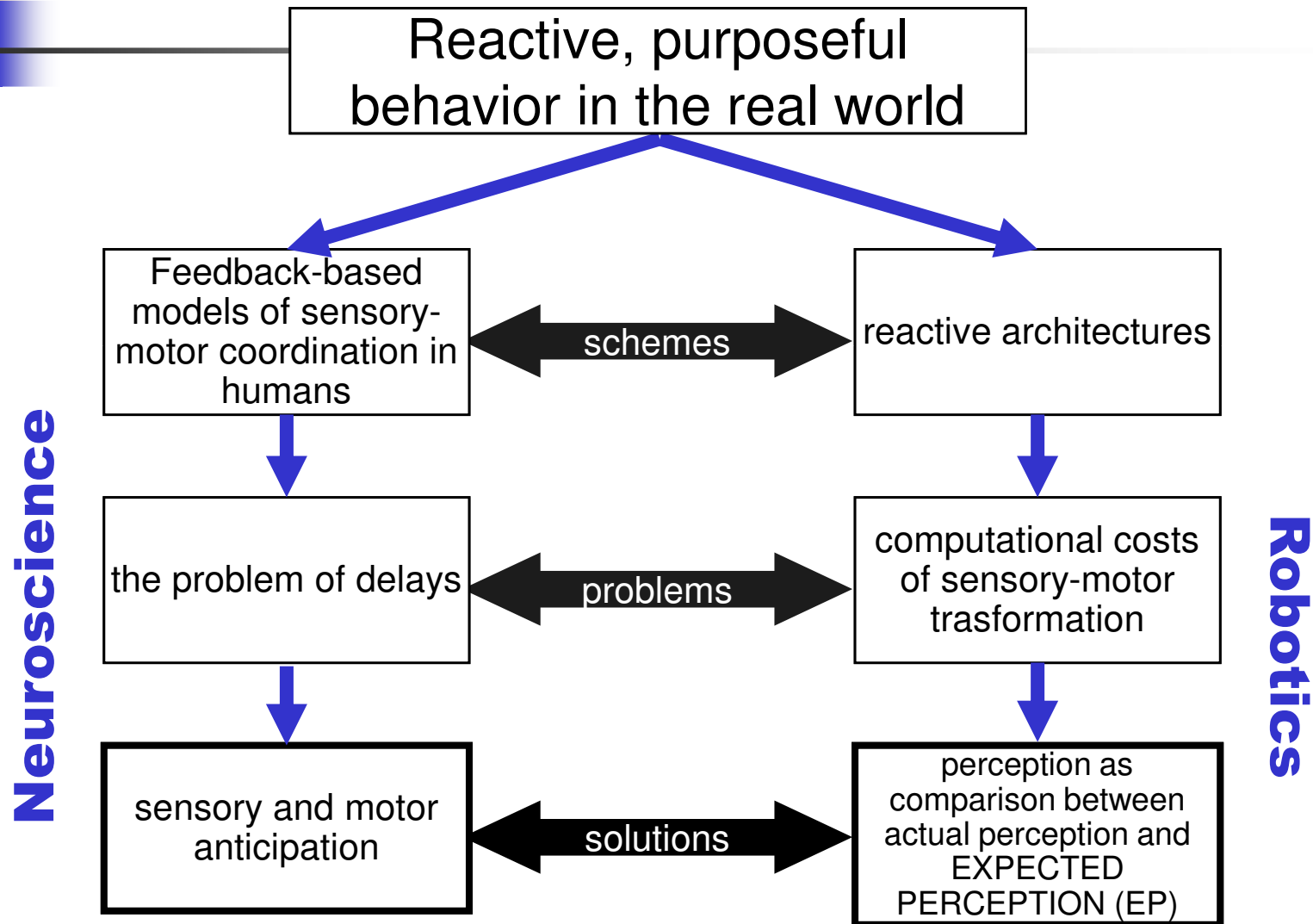


The Smith Predictor

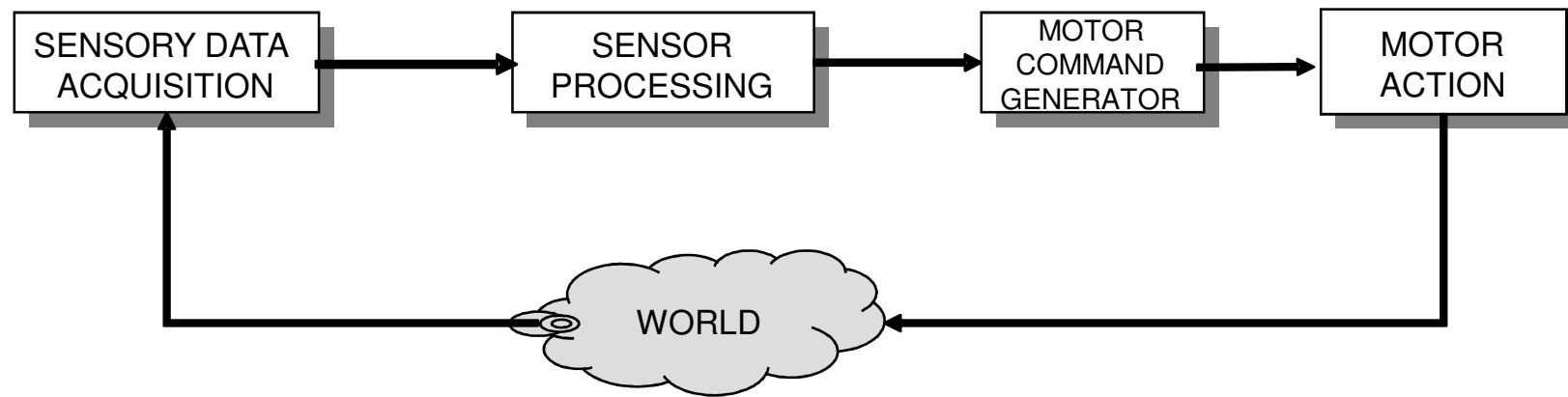
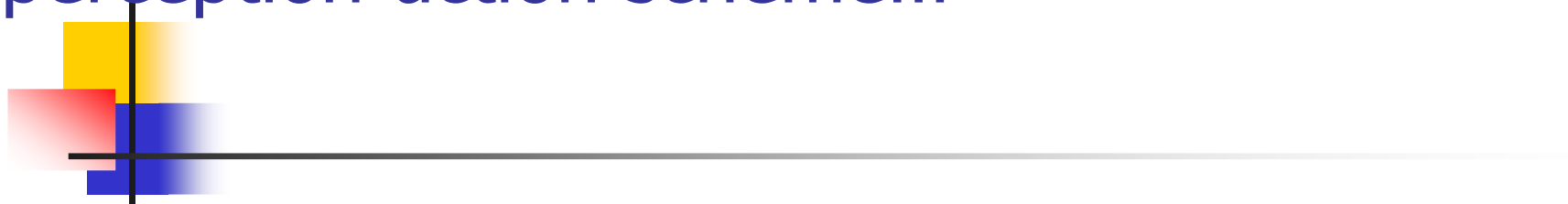


When the actual sensory feedback comes, it is compared with the expected one to check if the inner cycle works properly. In the inner loop, the sensory feedback is replaced by an estimated one, generated on the basis of internal models.

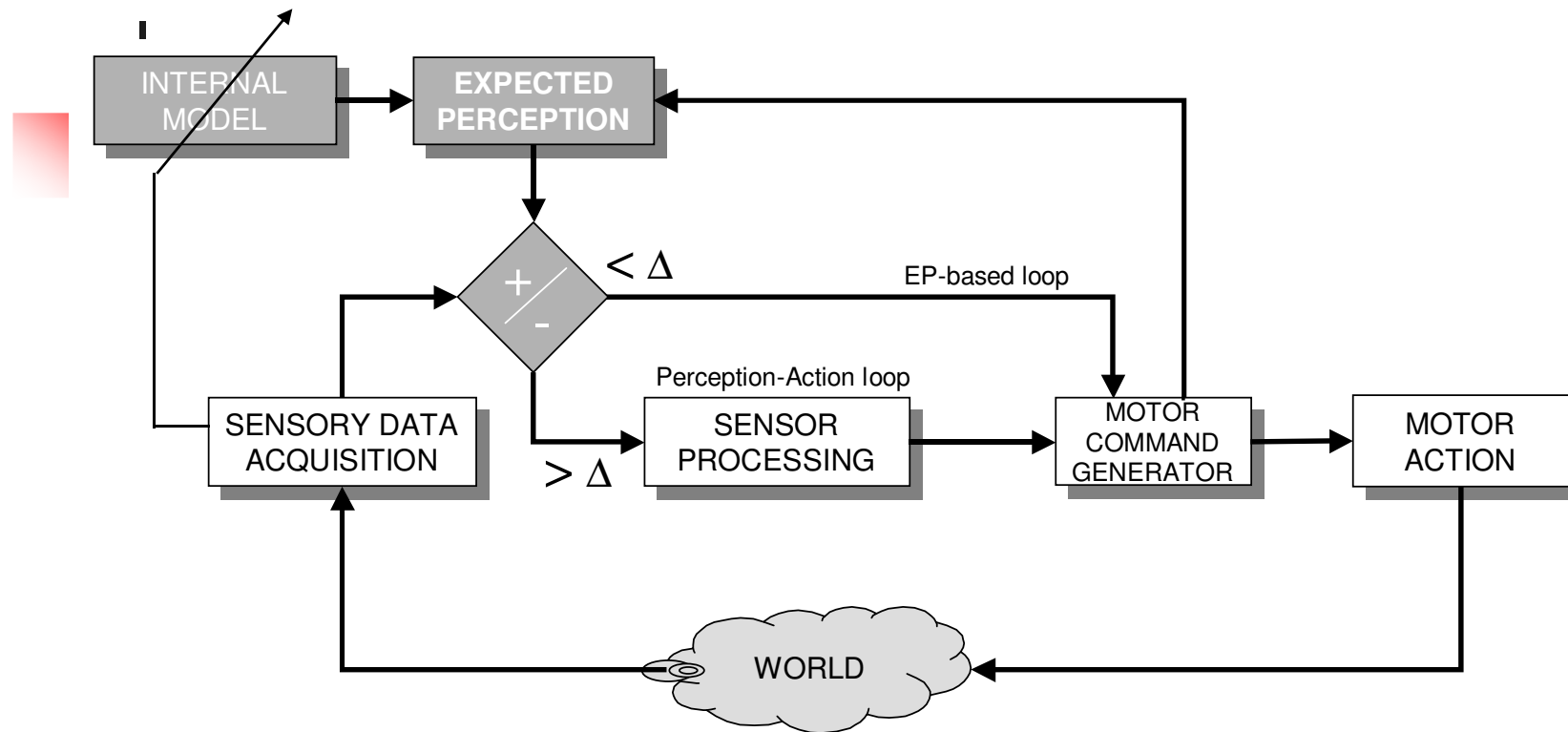
A parallel between Neuroscience and Robotics



From the traditional sequential feedback-based perception-action scheme...



...to the proposed EP-based scheme



C. Laschi, G. Asuni, E. Guglielmelli, G. Teti, R. Johansson, M.C. Carrozza, P. Dario, "A Bio-inspired Neural Sensory-Motor Coordination Scheme for Robot Reaching and Preshaping" *Autonomous Robots* Vol.25, 2008, pp. 85--101

E. Datteri, G. Teti, C. Laschi, G. Tamburrini, P. Dario, E. Guglielmelli, "Expected perception: an anticipation-based perception-action scheme in robots", *IROS 2003, 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, October 27 - 31, 2003.

E. Datteri, G. Teti, C. Laschi, G. Tamburrini, P. Dario, E. Guglielmelli, "Expected perception in robots: a biologically driven perception-action scheme", *ICAR 2003, 11th International Conference on Advanced Robotics*, Coimbra, Portugal, June 30 - July 3, 2003.

E. Datteri, G. Teti, G. Tamburrini, C. Laschi, P. Dario, E. Guglielmelli, "Expected perception: an experimental application in robotic sensory-motor coordination", *Workshop "Embodied Artificial Intelligence - special issues on the design principles"*, Zurich, Switzerland, October 7th, 2002.

Examples of different behaviors in a pushing task

1. without visual feedback

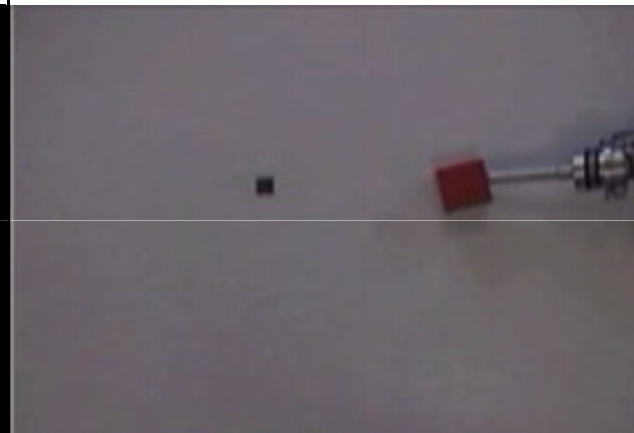
Expected Perception

A control strategy that makes no use of feedback



The motion of the red cube is not determined only by the arm motion, but additional factors (e.g. friction) can interfere

2. with reactive feedback-based scheme



At each step, the difference between the position of the red cube and the destination point is calculated. When necessary, a corrective command is issued

3. with an EP scheme

Expected Perception

An EP-based visuo-motor coordination strategy



The red cube is localized and the trajectory is replanned only when the error between EP and actual image exceeds a given threshold