



Robótica Móvel Inteligente: Da Simulação às Aplicações no Mundo Real

Denis Fernando Wolf

Eduardo do Valle Simões

Fernando Santos Osório

Onofre Trindade Junior

Universidade de São Paulo – USP - ICMC

Grupo de Sist. Embarcados, Evolutivos e Robóticos

LRM – Laboratório de Robótica Móvel

INCT – Sistemas Embarcados Críticos

INCT
SEC

**Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
em Sistemas Embarcados Críticos**



LRM
Laboratório de Robótica Móvel

Robótica Móvel Inteligente: Da Simulação às Aplicações no Mundo Real

Denis Fernando Wolf

Eduardo do Valle Simões

Fernando Santos Osório

Onofre Trindade Junior

Universidade de São Paulo – USP - ICMC

Grupo de Sist. Embarcados, Evolutivos e Robóticos

LRM – Laboratório de Robótica Móvel

INCT – Sistemas Embarcados Críticos

Julho/2009

INCT
SEC

**Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
em Sistemas Embarcados Críticos**

Fundamentos de Robótica Móvel

- **Introdução à Robótica:**

Robôs Manipuladores e Robôs Móveis

- **Elementos dos Robôs Móveis**

Sensores, Atuadores, Comportamento e Controle

- **Arquiteturas de Controle**

Arquiteturas Reativa, Deliberativa, Hierárquica e Híbrida

- **Modelos de Simulação**

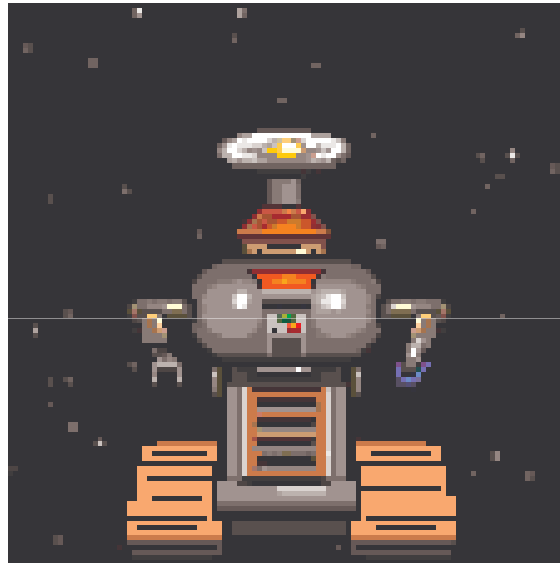
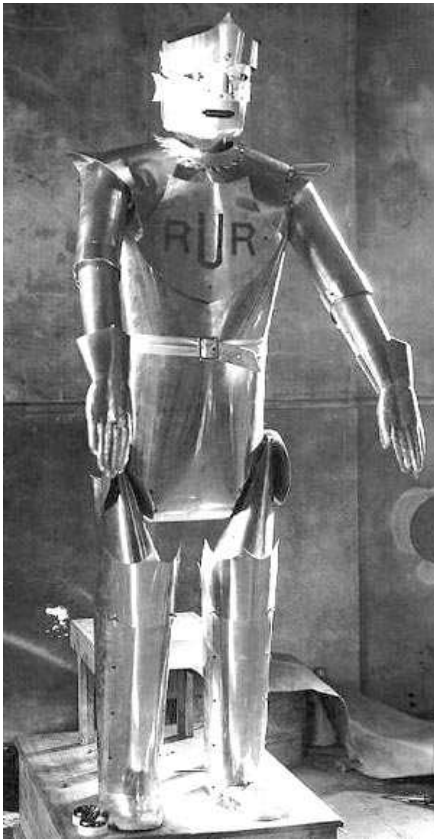
Sensores, Atuadores, Cinemática e Comportamento

- **Ferramentas de Simulação Virtual**

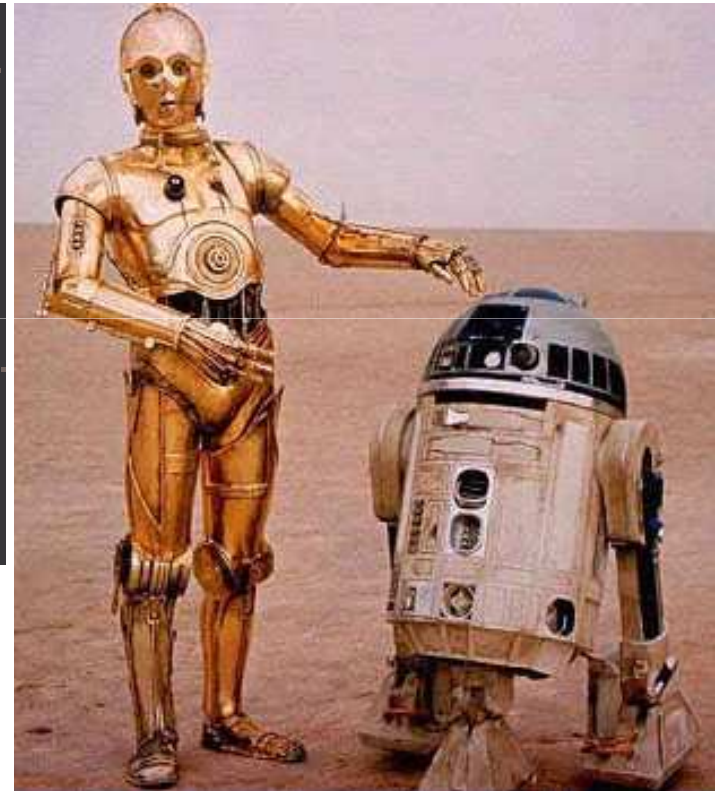
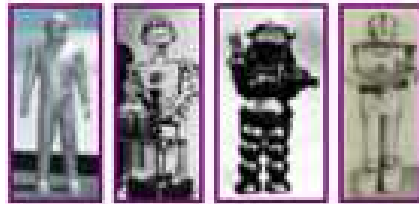
Bibliotecas: OpenGL, SDL, ODE, OSG, GALib, SNNS, Weka...

Introdução a Robótica

- **Robôs:** O Início... RUR



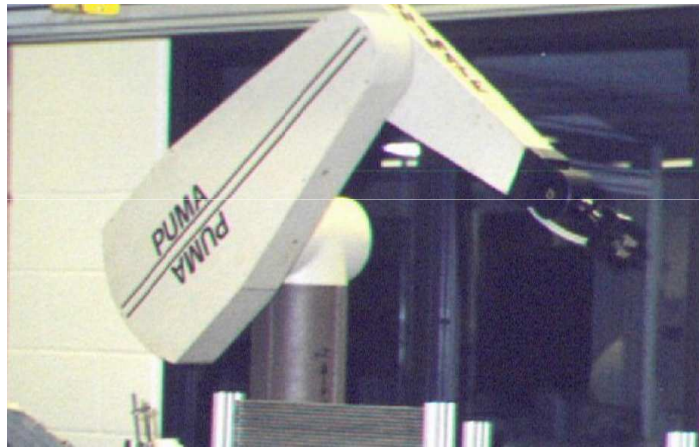
Ficção Científica



Introdução a Robótica

- **Robôs Manipuladores de Base Fixa:**

Braços Manipuladores – Aplicações Industriais

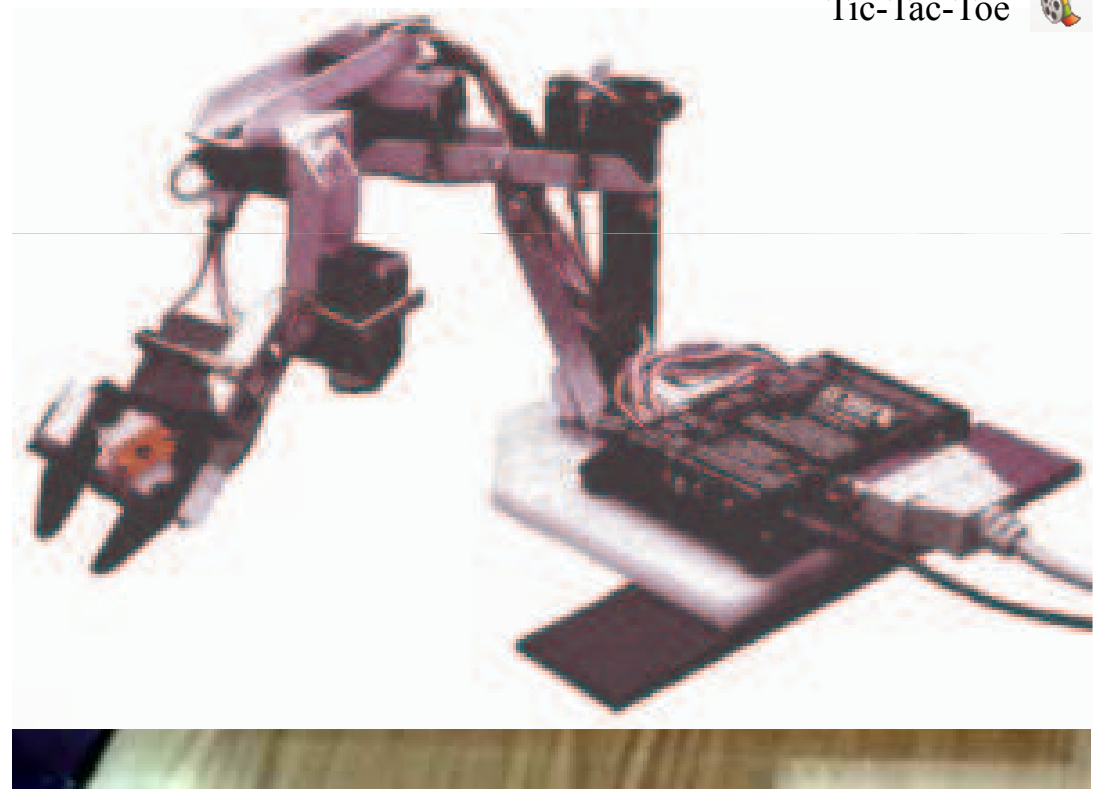



Robôs Soldadores

Robôs de Pintura

Exemplos:

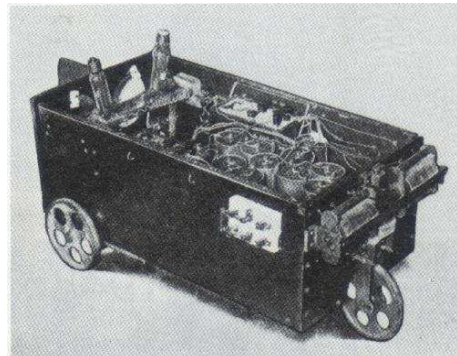
PUMA, KUKA, CanadaARM



Tic-Tac-Toe 

Introdução a Robótica

- **Robôs Móveis:** Robôs com capacidade de deslocamento no ambiente
 - * Robôs Móveis Tele-Operados, Guiados por Marcações (AGV)
 - * Robôs Móveis Semi-Autônomos



Mars Rovers
AGV – Automated Guided Vehicles
Robôs Submarinos



1912 - Electric Dog: <http://davidbuckley.net/DB/HistoryMakers.htm>

Introdução a Robótica

- **Robôs Móveis:** Robôs com capacidade de deslocamento no ambiente
Em busca do desenvolvimento de *Robôs Móveis Autônomos e Inteligentes*

History Making Mobile-Robots - HM



Introdução a Robótica

- **Robôs Móveis:** Robôs com capacidade de deslocamento no ambiente
Em busca do desenvolvimento de *Robôs Móveis Autônomos e Inteligentes*



Robot Nao from Aldebaran

Robôs Móveis



Scientific American - January 2007

A Robot in Every Home

The leader of the PC revolution predicts that the next hot field will be robotics

By Bill Gates

Imagine being present at the birth of a new industry. It is an industry based on groundbreaking new technologies, wherein a handful of well-established corporations sell highly specialized devices for business use and a fast-growing number of start-up companies produce innovative toys, gadgets for hobbyists and other interesting niche products. But it is also a highly fragmented industry with few common standards or platforms. Projects are complex, progress is slow, and practical applications are relatively rare. In fact, for all the excitement and promise, no one can say with any certainty when--or even if--this industry will achieve critical mass. If it does, though, it may well change the world.

Of course, the paragraph above could be a description of the computer industry during the mid-1970s, around the time that Paul Allen and I launched Microsoft.

Elementos dos Robôs Móveis

- **Robô Móvel:** Agente capaz de PERCEBER o ambiente e AGIR sobre este ambiente



Percepção:

Sensores

Ação:

Atuadores

Agente:

Comportamento

Decisão

Controle

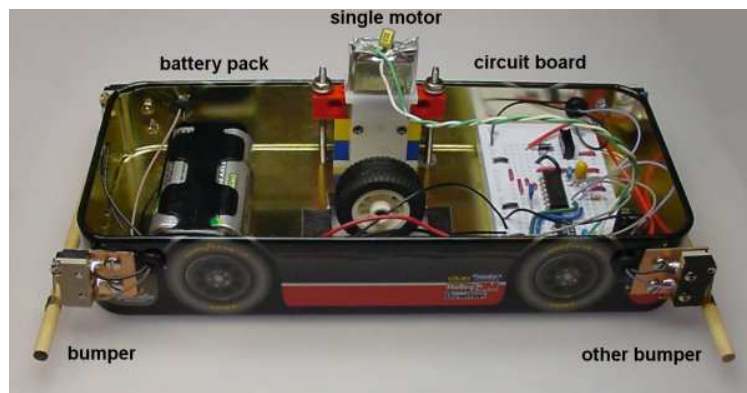
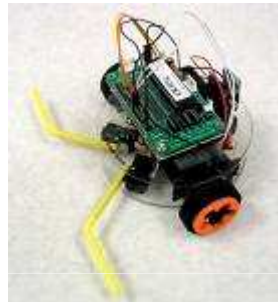
Elementos dos Robôs Móveis

Percepção:
Sensores

Sensor	Principal Função	Exemplos
De Posição e Orientação	Determinar a posição absoluta ou direção de orientação do robô	GPS (Sistema de Posicionamento Global)
		Bússola [Compass]
		Inclinômetro
		Triangulação usando marcas (Beacons)
De Obstáculos	Determinar a distância até um objeto ou obstáculo	Sensor Infra-Vermelho (IR - Infrared)
		Ultrassom (Sonar)
		Radar
		Sensor Laser (Laser rangefinder)
		Sistemas de Visão Estéreo (Stereo Vision)
De Contato	Determinar o contato com um objeto ou posição de contato com marcação	Sensores de Contato (Bumpers, Switches)
		Antenas e "bigodes" (Animal whiskers)
		Marcações (barreiras óticas e magnéticas)
De Deslocamento e Velocidade	Medir o deslocamento do robô Medidas relativas da posição e orientação do robô	Inercial (Giroscópio, Acelerômetros)
		Odômetro (Encoders: Optical, Brush)
		Potenciômetros (Angular)
		Sensores baseados em Visão
Para Comunicação	Envio e recepção de dados e sinais externos (troca de informação)	Sistemas de Visão e Sensores Óticos
		Sistemas de Comunicação (RF)
Outros tipos	Sensores magnéticos, indutivos, capacitivos, reflexivos Sensores de temperatura, carga (bateria), pressão e força, etc. Detectores: detector de movimento, de marcações, de gás/odores	

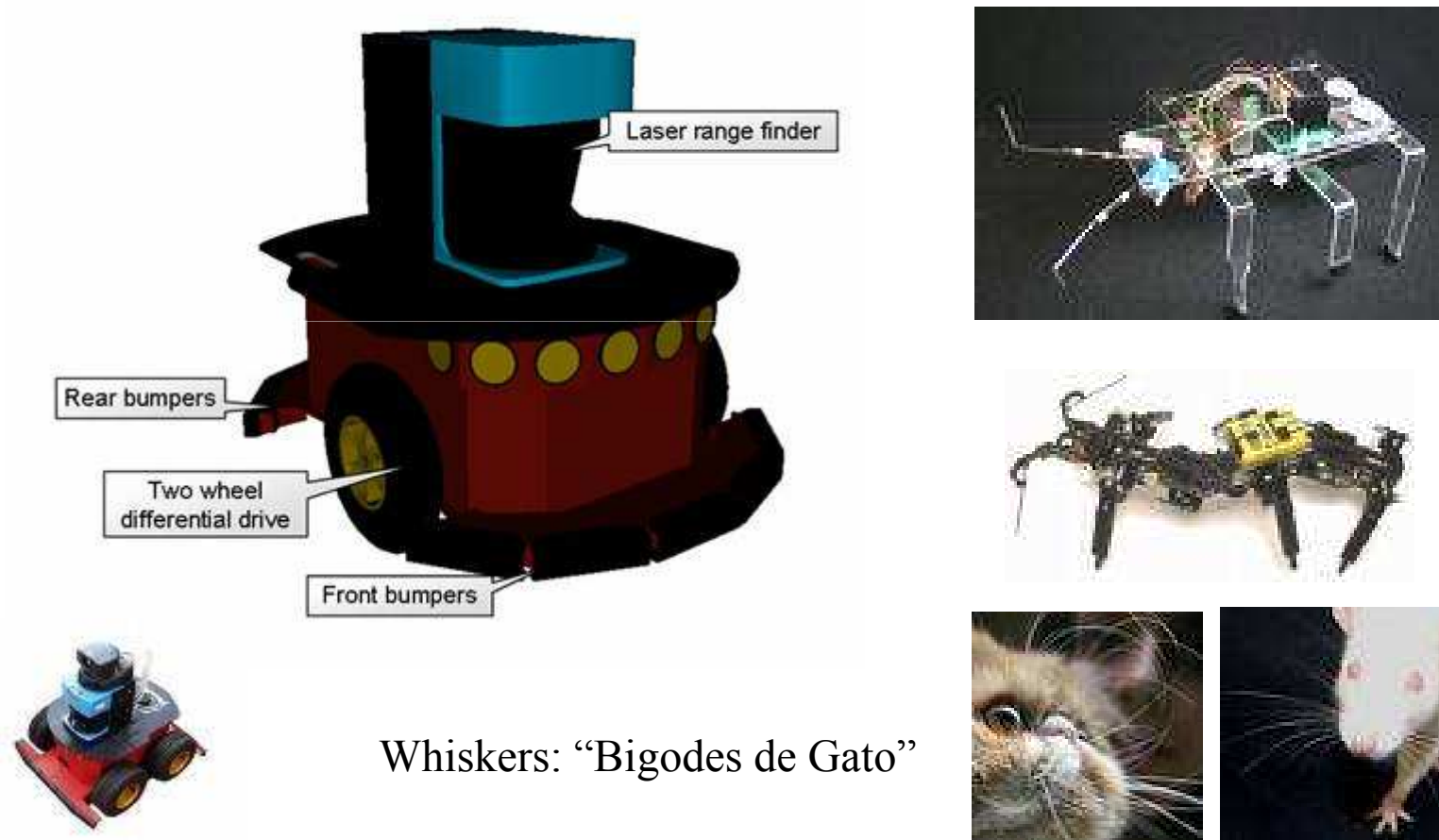
Tipos de Sensores

Sensor do Tipo *Bumper* (Sensor de Contato / “Pára-choque”)



Tipos de Sensores

Sensor do Tipo *Bumper* (Sensor de Contato / “Pára-choque”)



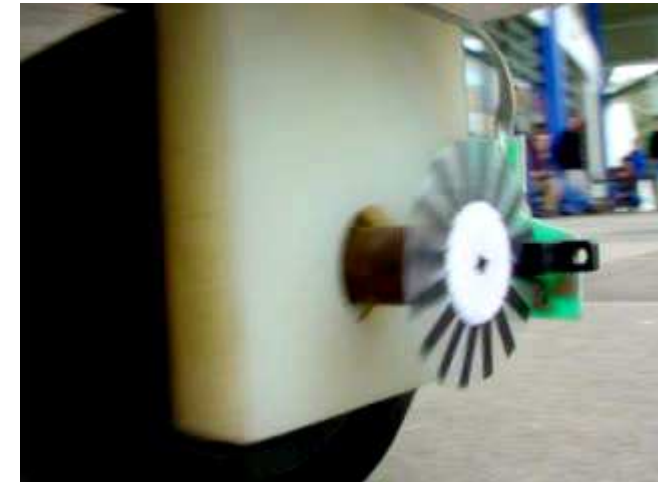
Whiskers: “Bigodes de Gato”

Tipos de Sensores

Sensores do tipo Encoder/Odômetro



Encoder



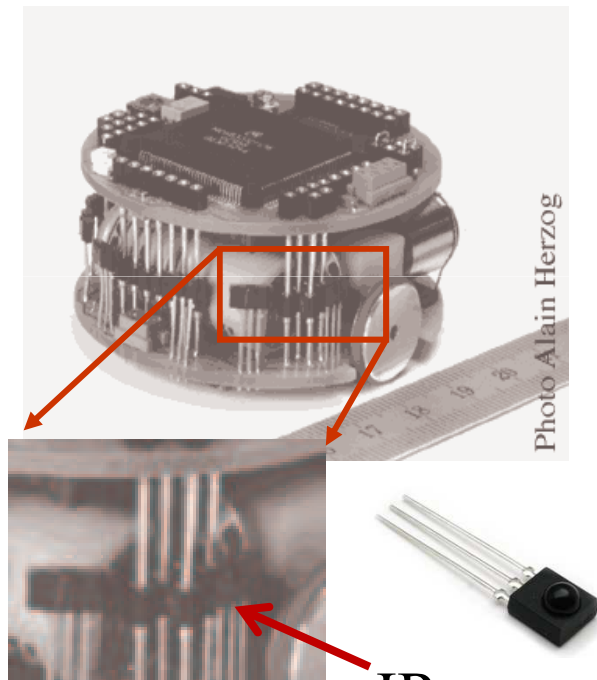
Encoder: Controle do giro da roda

Elementos dos Robôs Móveis

Percepção:
Sensores

Tipos de Sensores

Sensores Infra-Vermelho (IR)



Khepera

IR

•Características dos Sensores Infra-Vermelho do Khepera:

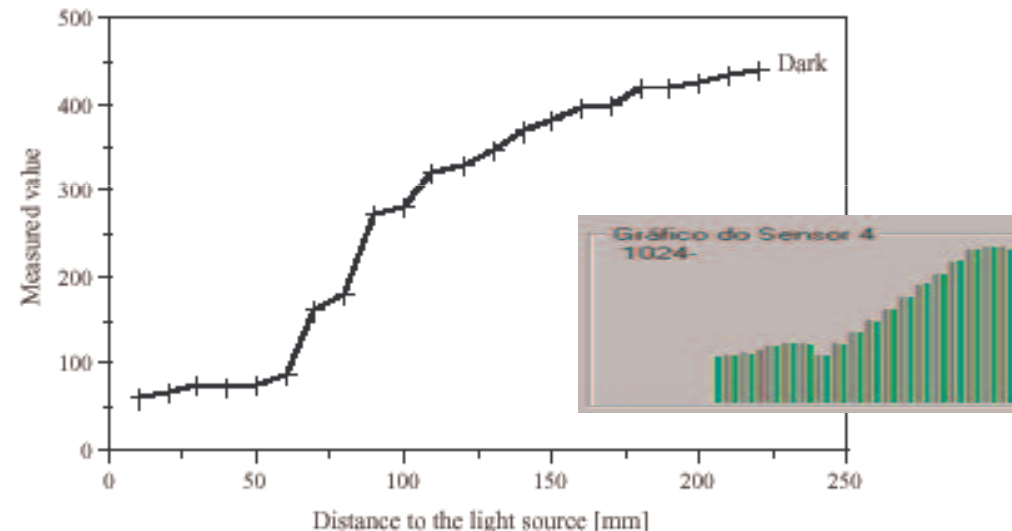
Sensibilidade a luz ambiente/ Reflexão da Luz

Distância: 50 a 500mm (aproximadamente)

Valor lido: 0..450 (aproximadamente)

Dependente de: Potência = 1 Watt

Ângulo = -180 a +240 graus



Typical measurement of the ambient light versus the distance of a light source of 1 Watt.

As it can be seen, the measured value decreases when the intensity of the light increases. The standard value in the dark is around 450.

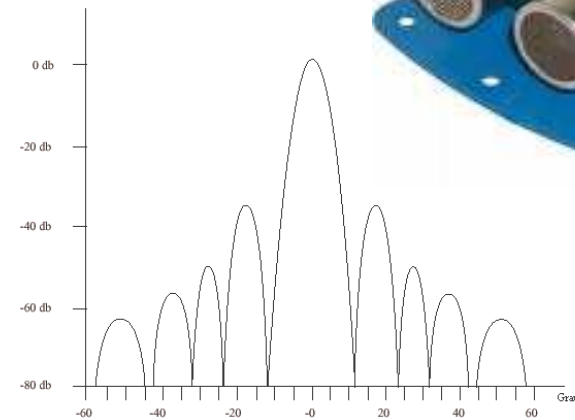
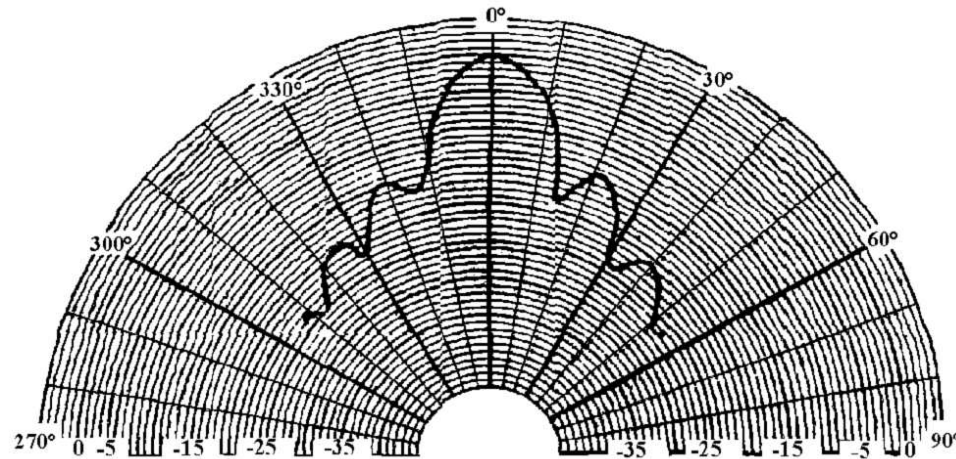
The measurement of the ambient light versus the angle between the forward direction of the robot and the direction of the light has the shape illustrated in figure 10.

Elementos dos Robôs Móveis

Percepção:
Sensores

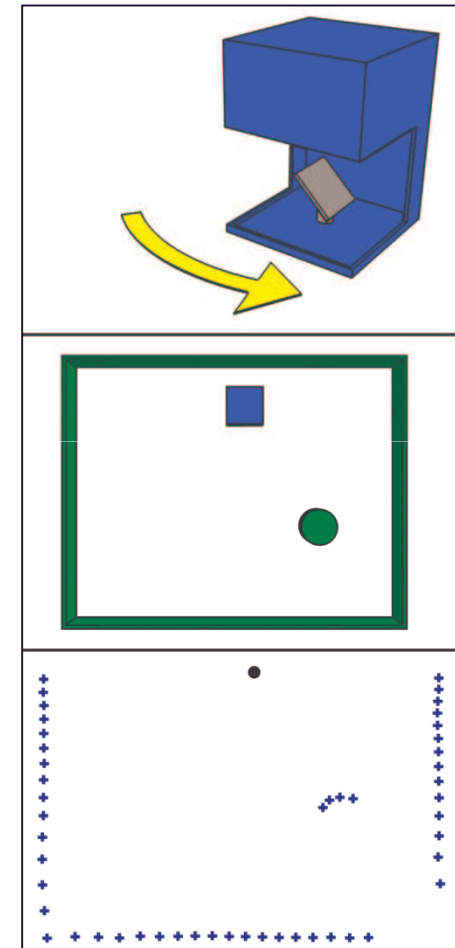
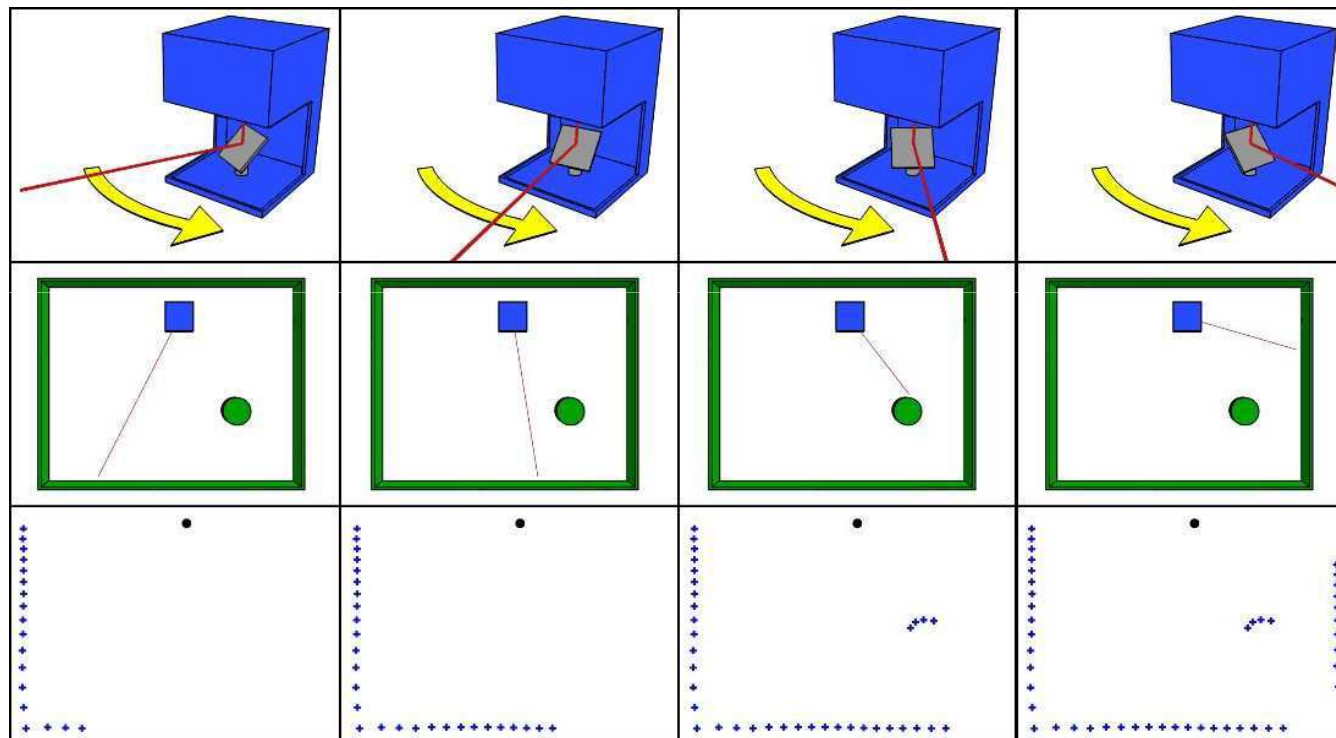
Tipos de Sensores

Sensores Ultra-Som (Sonar)



Tipos de Sensores

Sensores LASER (Lidar - Light Detection and Ranging)



Wikipedia: Lidar

Elementos dos Robôs Móveis

Percepção:
Sensores

Tipos de Sensores

Sensores LASER (Lidar)

SICK
IBEO
VELODYNE

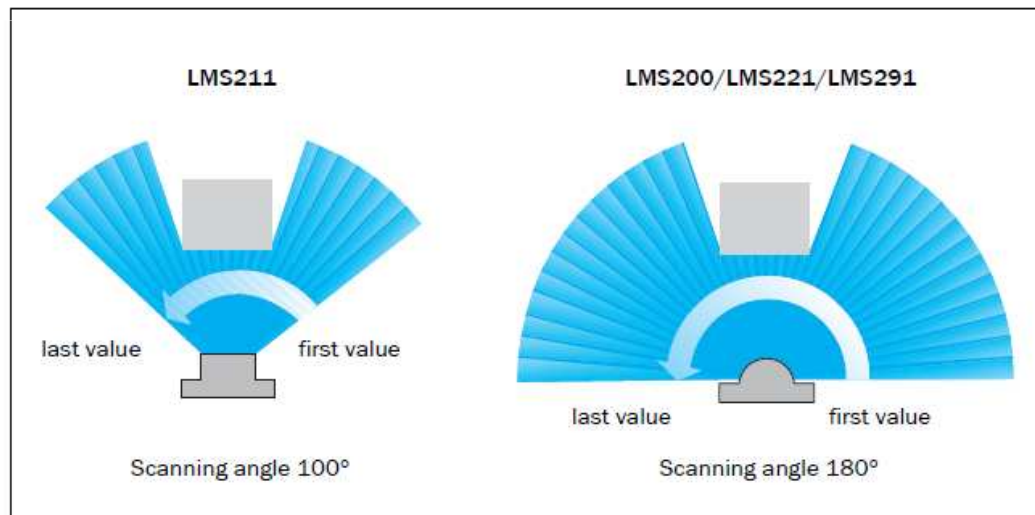
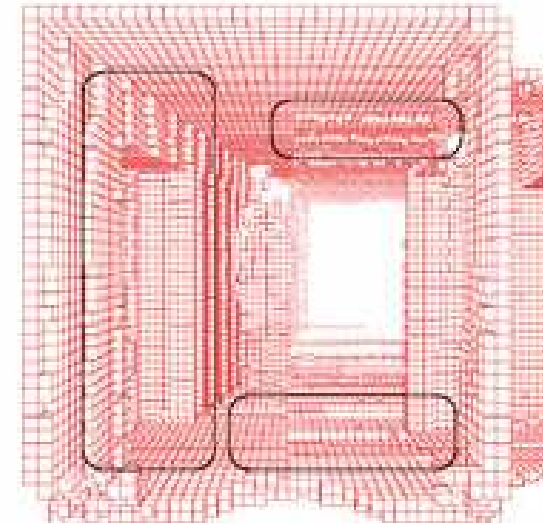
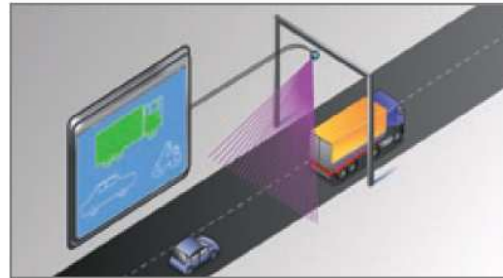
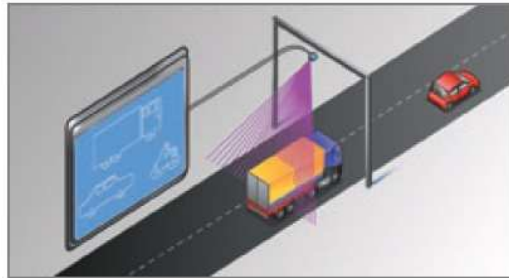
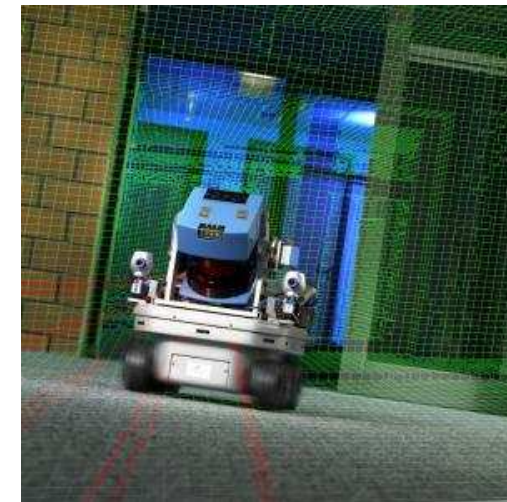


Fig. 5-1: Direction of transmission and maximum scanning angle (standard devices) on top view of the devices



Elementos dos Robôs Móveis

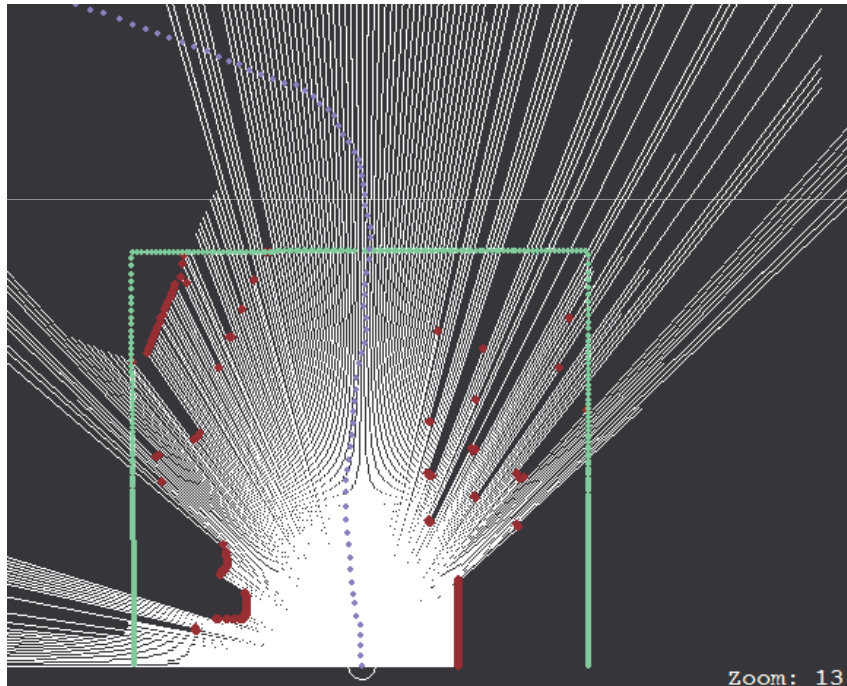
Percepção:
Sensores

Tipos de Sensores

Sensores LASER (Lidar) + GPS + Câmera

Veículo equipado com Laser SICK LMS2xx Resolução: ~10 mm
Distância Máxima: 80 mts - Varredura: 180° de 0.5 em 0.5 graus

Projeto
Sena



Sensores: Laser SICK, GPS, Câmera de Vídeo

Adicional: Bússola, IMU (Inercial)

CSBC 2009 - JAI

19 Elementos RMA



LRM
Laboratório de Robótica Móvel

INCT
SEC

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
em **Sistemas Embarcados Críticos**

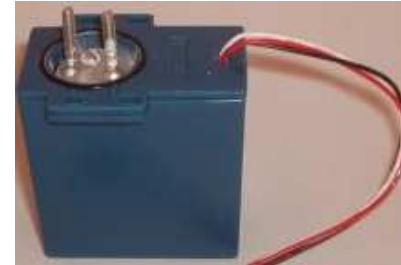
Elementos dos Robôs Móveis

Percepção:
Sensores

Tipos de Atuadores

Atuadores mais comuns...

- Motor DC
- Motor de Passo (Step-Motor)



Servomotor

Atuador	Principal Tipo/Função	Exemplos
Base Fixa	Braço robótico com base fixa	Robôs industriais PUMA
Base Móvel: Rodas	2 Rodas independentes (diferencial)	Robôs Khepera e Pioneer P3-DX
	3 Rodas (triciclo, omni-directionais)	Robô BrainStem PPRK
	4 Rodas (veículos robóticos - ackermann)	Stanley - Stanford (Darpa Challenge)
Base Móvel: Esteira	Esteira (Slip/Skid locomotion - tracks)	Tanques e veículos militares
Base Móvel: Juntas e Articulações	Bípedes	Robôs Humanóides
	4 Patas (quadpods)	Robôs Sony Aibo, BigDog
	6 Patas (hexapods)	Robôs Inseto (Lynxmotion Hexapods)
Base Móvel: Propulsão	Veículos aéreos com hélices	Aviões, Helicópteros e Dirigíveis
Hélices ou Turbinas	Veículos aquáticos com hélices	Barcos autônomos
	Veículos sub-aquáticos	Submarinos autônomos
Outros tipos	Braços manipuladores com base móvel	Garras (Grippers) embarcadas
	Garras com ou sem feed-back sensorial	Mão robótica
	Mecanismos de disparo	Disparo do chute (futebol de robôs)

Tipos de Atuadores

Atuadores

- Aceleração
- Limite de Velocidade
- Inércia

ACIONAMENTO

- AC/DC Servo Motors
- Step Motors

MALHA DE CONTROLE

- Open Loop
- Closed Loop: P, PI, PID

SET POINT

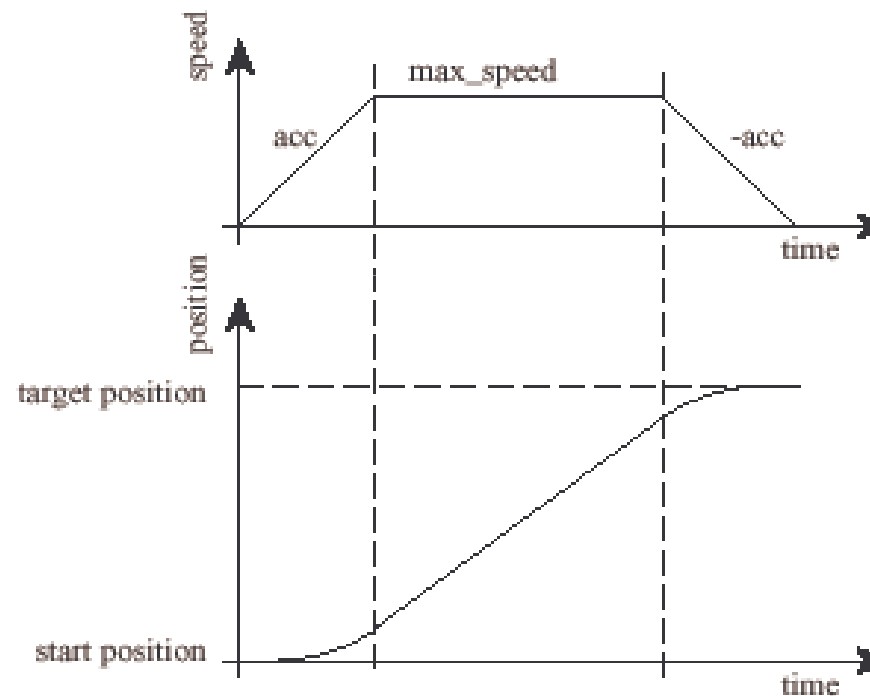


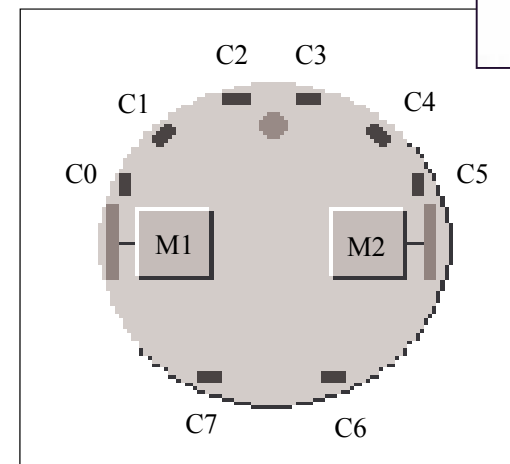
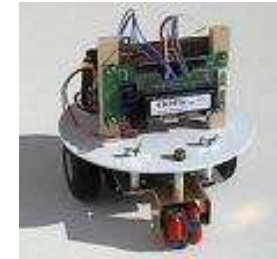
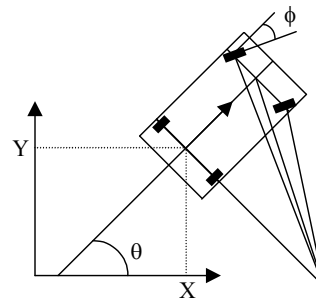
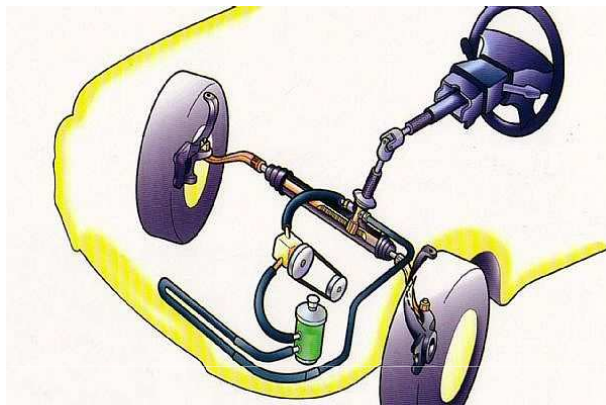
Figure 7: Speed profile used to reach a target position with a fixed acceleration (acc) and a maximal speed (max speed).

Elementos dos Robôs Móveis

Ação:
Atuadores

Tipos de Atuadores

Atuadores: Robôs Móveis



Arquiteturas de Controle

Comportamentos: Controle de Robôs

Robôs Móveis:
Agentes Autônomos dotados de
SENSORES e ATUADORES

Integração Sensorial-Motora



Percepção:
Sensores

Ação:
Atuadores

Agente:
Comportamento
Decisão
Controle

Como Agir?

Como Interpretar
as Percepções?

Como Tomar Decisões?

Arquiteturas de Controle

Arquitetura REATIVA [Pura]

Reativo: Percepção => Ação

- Reage diretamente aos estímulos externos;
- Esquema sensorio-motor;

Comportamentos Típicos: *Reactive Behaviour*

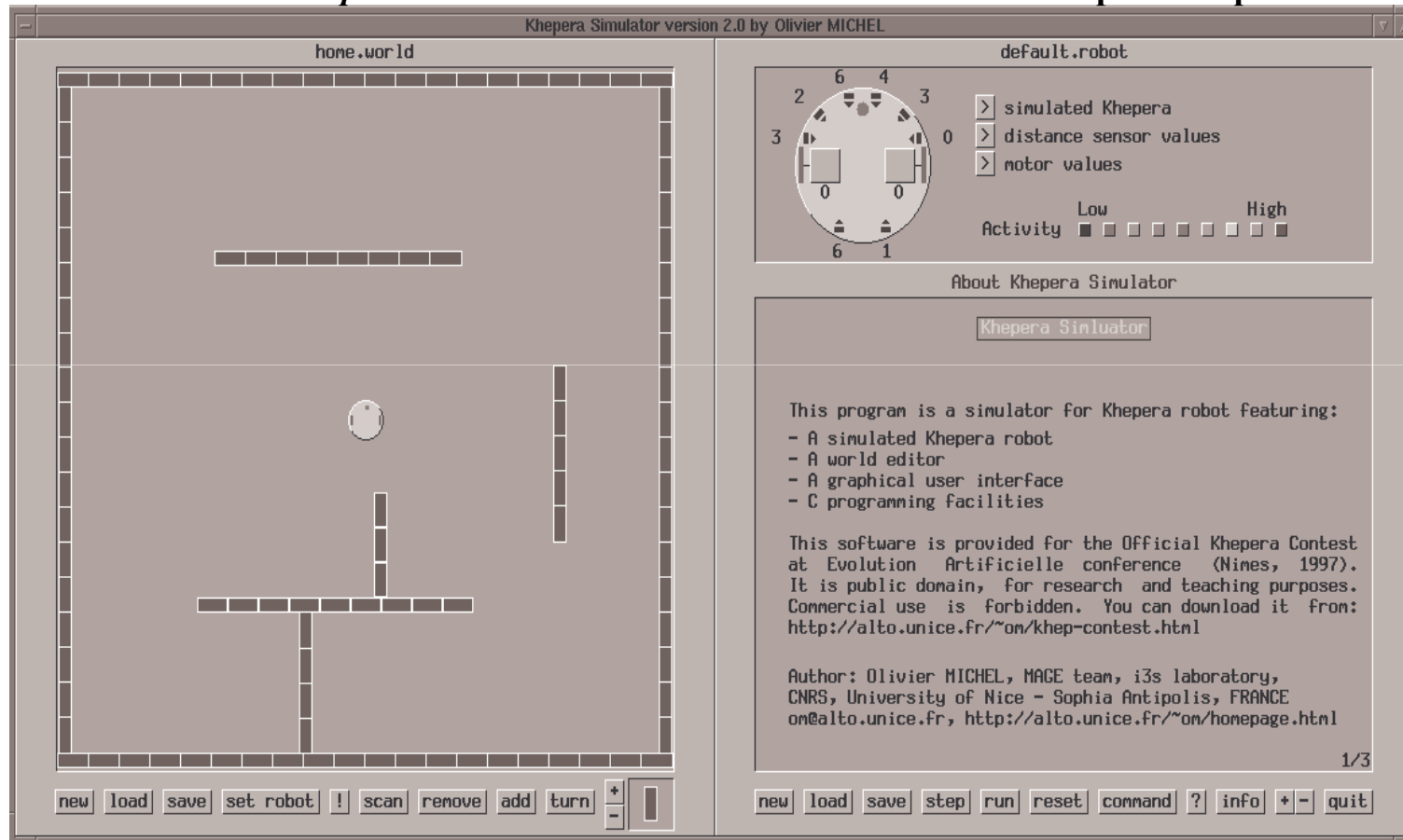
- Vagar pelo ambiente, evitando colisões e obstáculos;
- Acompanhar uma parede ou corredor;
- Comportamento direcionado pela luz;
- Ir em direção a uma determinada orientação

Composição de Comportamentos: Direção x Obstáculo

Arquiteturas de Controle

Arquitetura REATIVA [Pura]

Simulador do *Khepera* / SIM 2.0 Unix / Olivier Mitchell / INRIA Sophia Antipolis



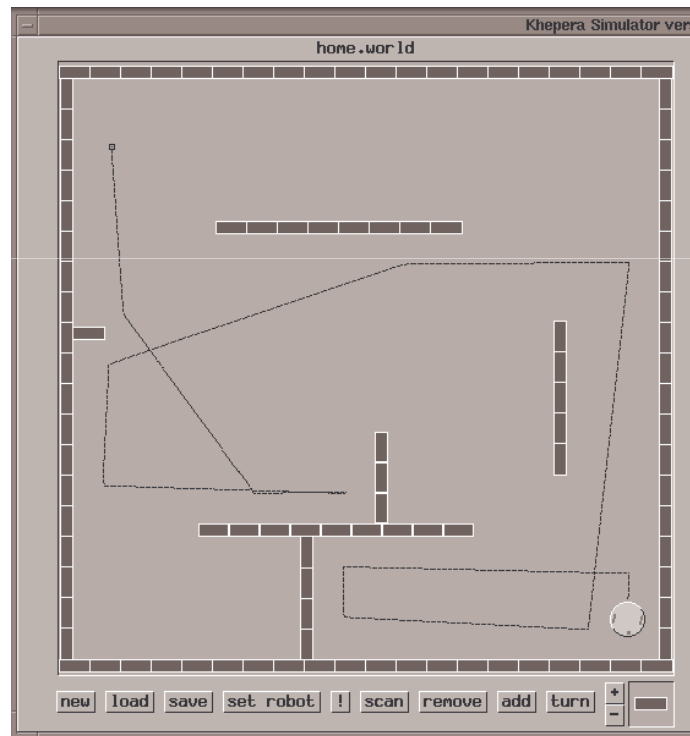
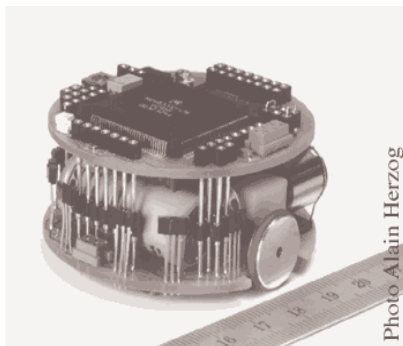
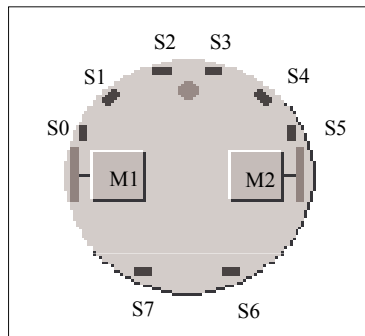
Sensores: 8 IR / Atuadores: 2 motores com cinemática diferencial

1997/98

Arquiteturas de Controle

Arquitetura REATIVA [Pura]

- Reativo: Integração Sensorial-Motora



Evitar colisões e obstáculos

Controle Reativo

IF S1 < Limite and
S2 < Limite and
S3 < Limite and
S4 < Limite
THEN Action (Go_Forward)

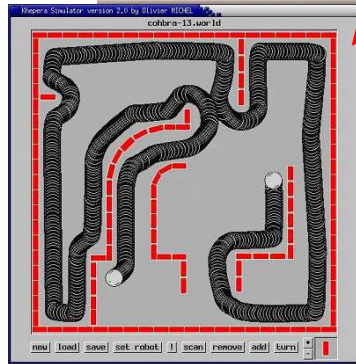
IF S1 < Limite and
S2 < Limite and
S3 > Limite and
S4 > Limite
THEN Action(Turn_Left)

IF S2 > Limite and
S3 > Limite and
S2 > S3 and
S1 > S4
THEN Action(Turn_Right)

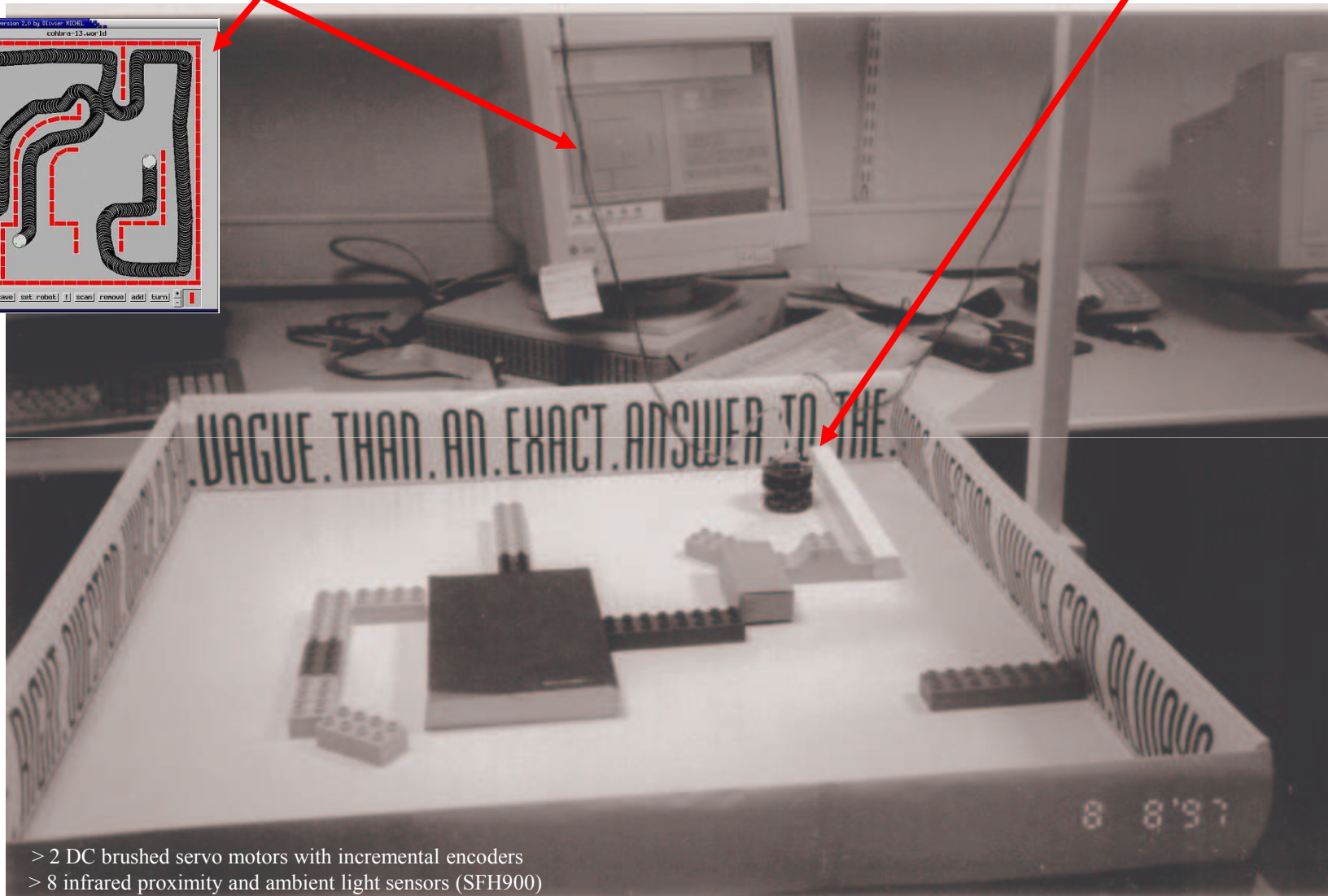
Sensorial-Motor: Sentir => Agir

Arquitetura de Controle: **Reativo**

Simulador do *Khepera*



Robô *Khepera*



- > 2 DC brushed servo motors with incremental encoders
- > 8 infrared proximity and ambient light sensors (SFH900)

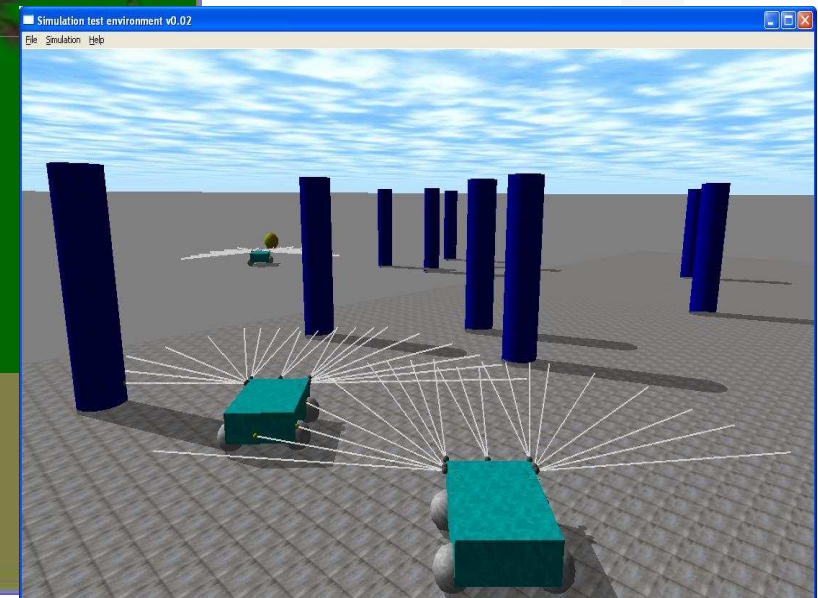
Arquitetura de Controle: **Reativo**

Navegação: Direcionamento + Desvio de Obstáculos



Simulador
Robombeiros

 Desvio



Arquitetura de Controle: **Reativo**

Aplicações práticas comerciais:



 Reativo



Arquiteturas de Controle

Arquitetura **DELIBERATIVA** [Pura]

Deliberativo: Planejamento => Seqüência de Ações

- Possui conhecimento sobre a situação do robô e do ambiente;
- Usualmente baseado no uso de mapas e planejamento de trajetórias.

Comportamentos Típicos: *Deliberative Behaviour*

- Execução de scripts de ações planejadas previamente;
- Executar uma seqüência de ações previamente determinada;
- Seguir trajetórias especificadas com uso de mapas;
- Execução de Tarefas de Alto Nível;

Arquiteturas de Controle

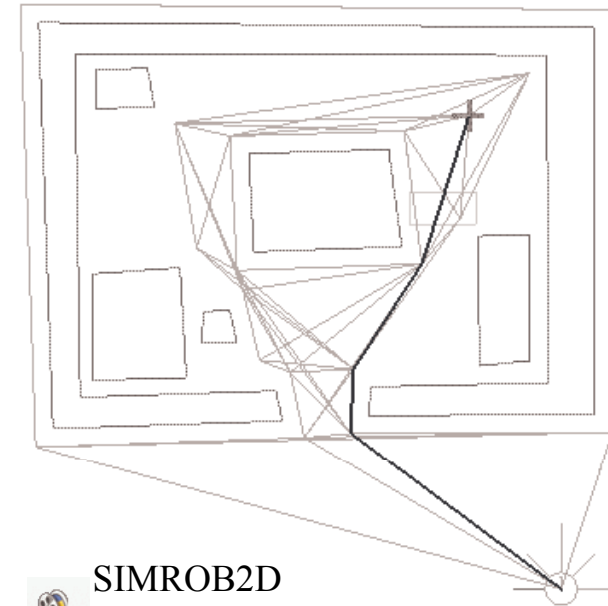
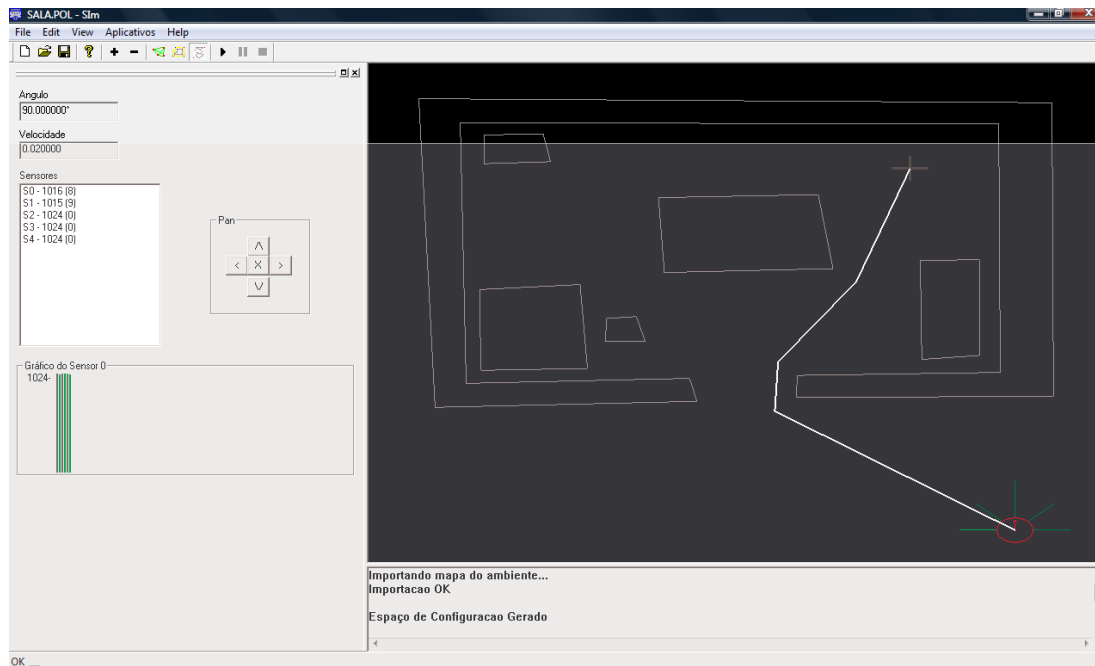
Arquitetura DELIBERATIVA [Pura]

SIMROB2D - *Referência:*

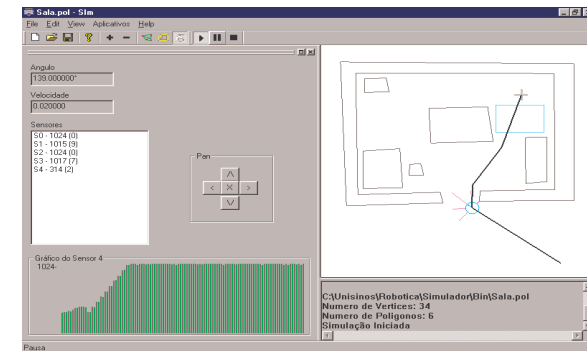
Farlei Heinen (Orientador: Fernando Osório)

Robótica Autônoma: A integração entre planificação e comportamento reativo. 2000.

Robô tipo Khepera: Sensores: 5 IR / Atuadores: 2 motores (diferencial)



SIMROB2D
Deliberativo

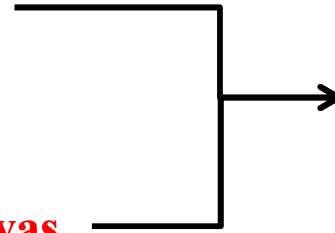


Arquiteturas de Controle

CONTROLE: Arquiteturas **Reativas**

Abordagens “puras”

CONTROLE: Arquiteturas **Deliberativas**



**Ambas possuem
problemas e limitações!**

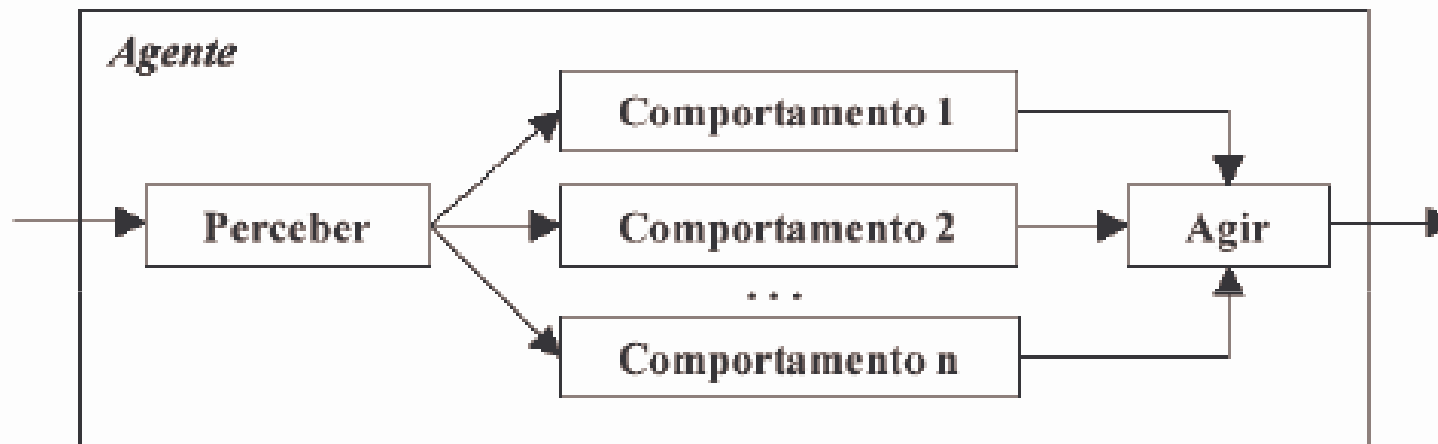
Solução?

**Buscar aproveitar o que de melhor tem cada
uma das duas abordagens...**

**ARQUITETURA HIERÁRQUICA
ARQUITETURA HÍBRIDA**

Arquiteturas de Controle

Controle Hierárquico



Hierarquia de Comportamentos:

- Evitar/Desviar de obstáculos
- Seguir em uma determinada direção
- Seguir uma determinada rota

Arquiteturas de Controle

Controle Hierárquico: Vertical

Brooks - Arquitetura Subsumption

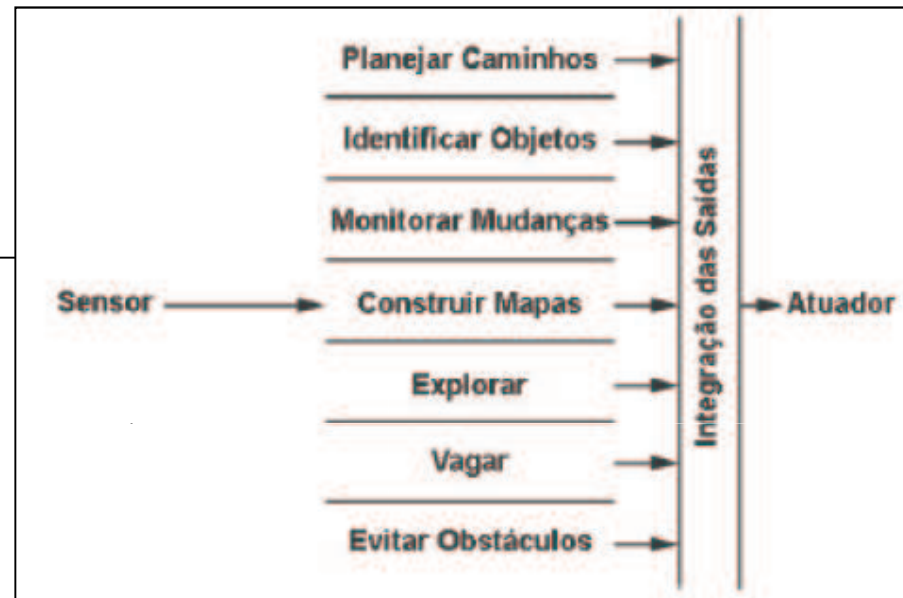
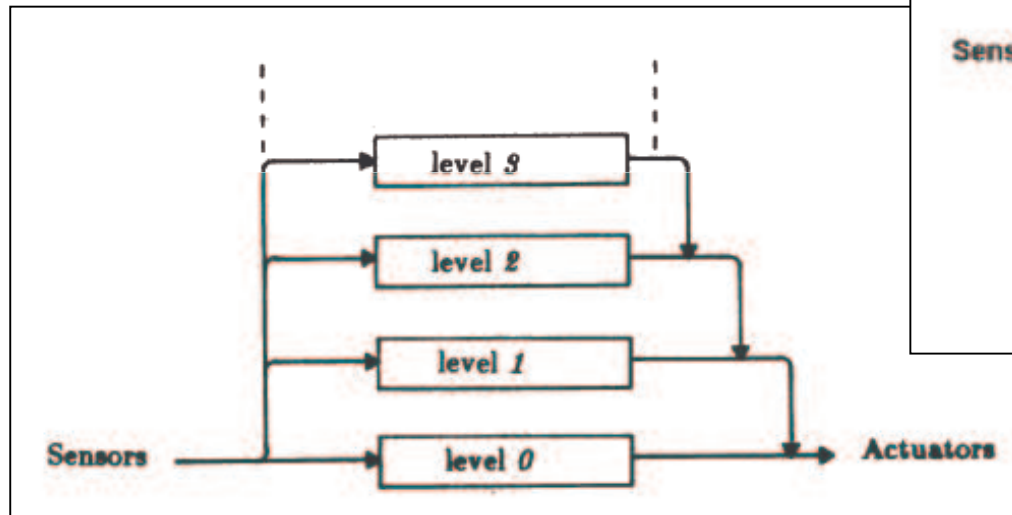


Figure From:
Brooks, R. A.
MIT A.I. Memo 864
Sept. 1985

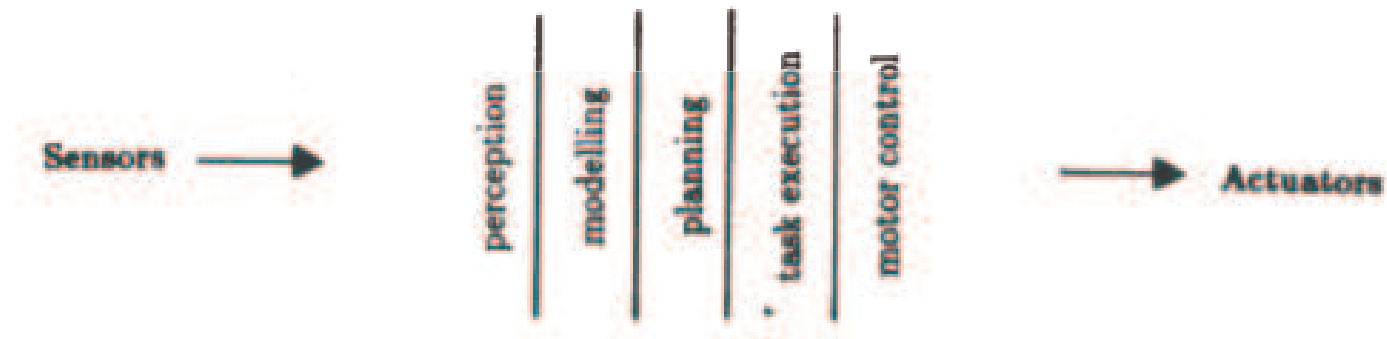
Arquiteturas de Controle

Controle Hierárquico: Horizontal

Arquiteturas Hierárquicas

SMPA

“Sense” – “Model” - “Plan” - “Act”

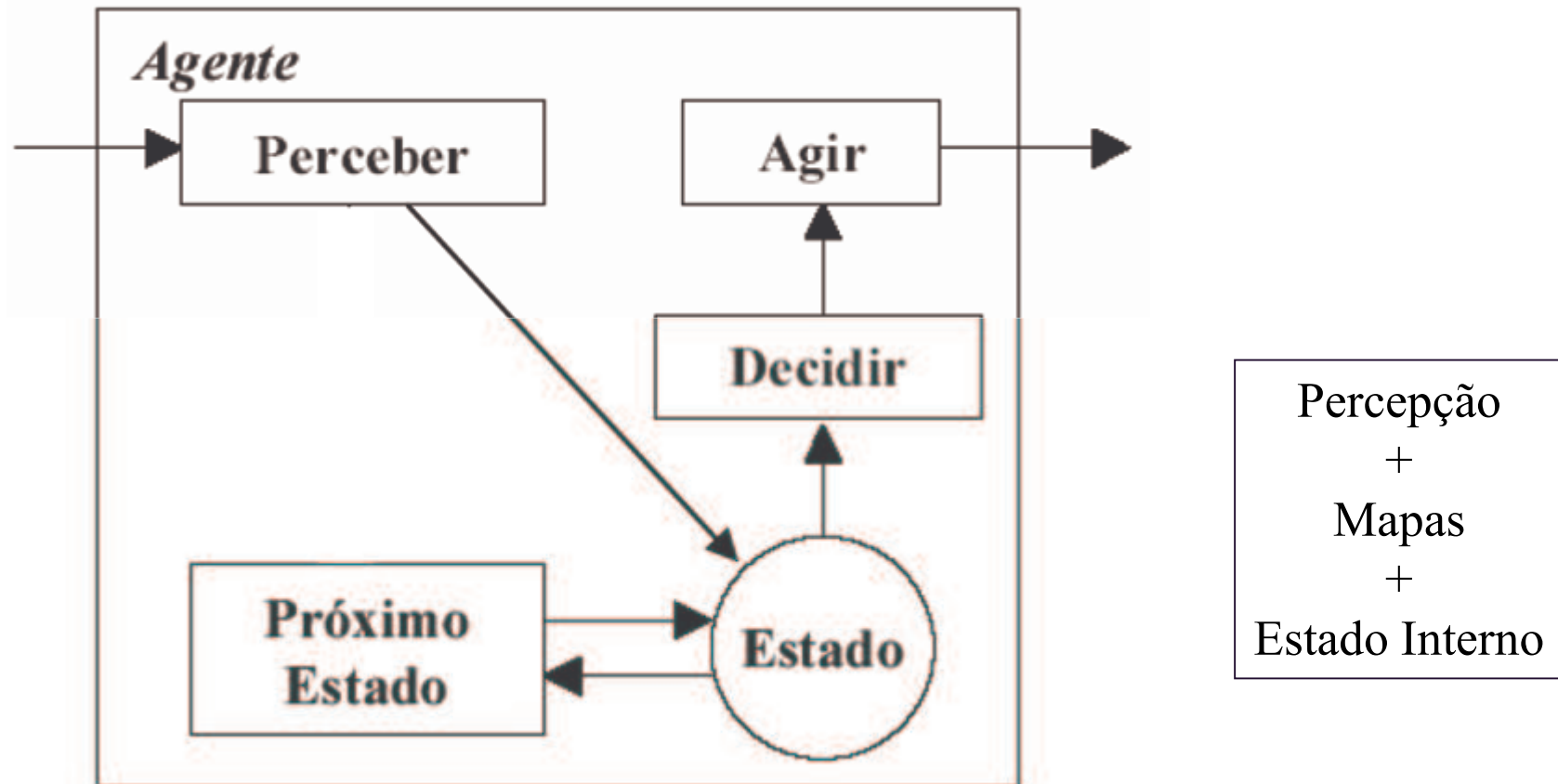


SMPA: Decomposição tradicional do sistema de controle de um robô móvel em módulos funcionais

Arquiteturas de Controle

Arquiteturas Híbridas

Controle Híbrido: Arquitetura com Estados Internos (Autômato)

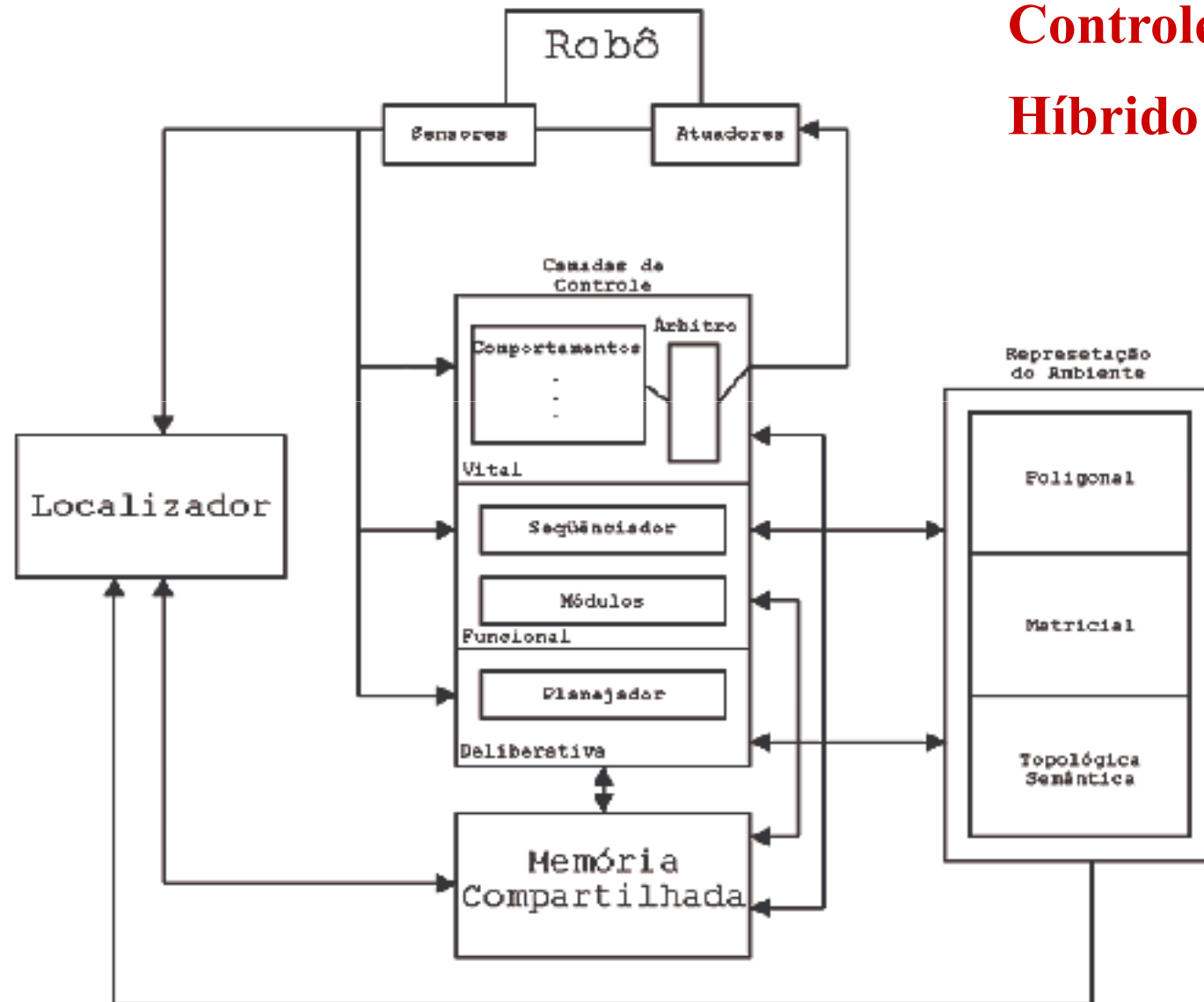


Arquiteturas de Controle

Controle Híbrido Robusto – COHBRA / SimRob3D

Arquitetura
COHBRA

**Controle
Híbrido**



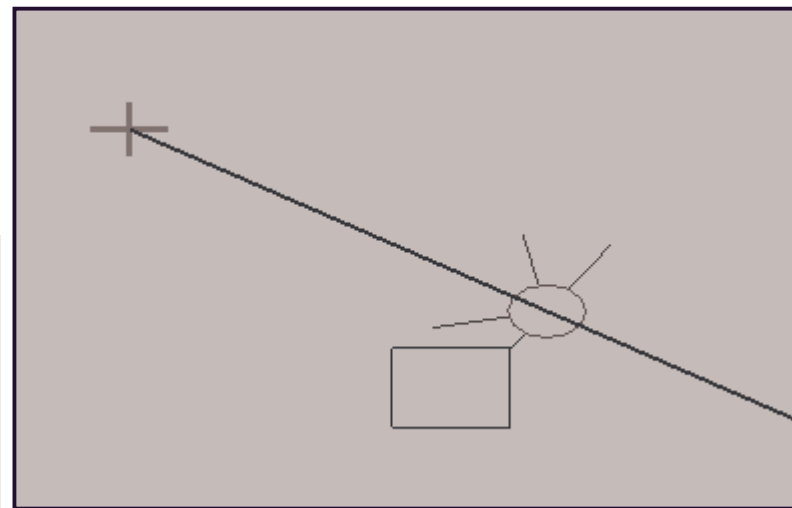
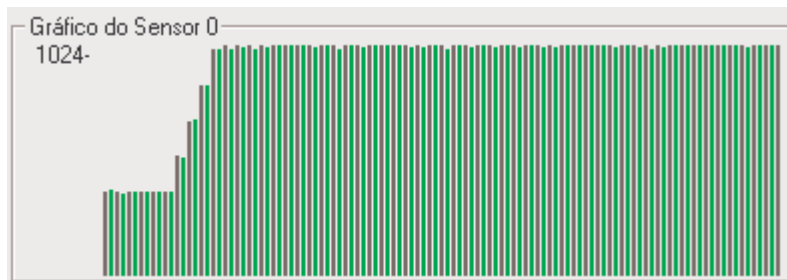
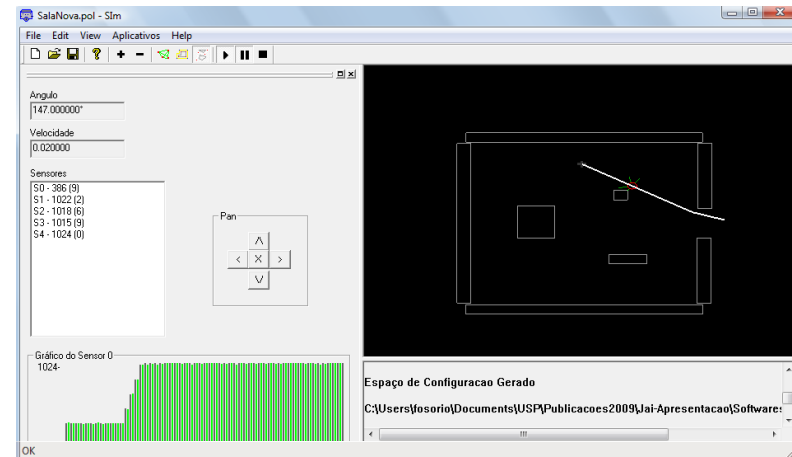
Modelos de Simulação

Modelagem: Sensores e Atuadores

SimRob2D

Sensores

- Infra-Vermelho
- Sonar
- Laser
- GPS
- Odômetro
- Vídeo



Modelos de Simulação

Modelagem: Sensores e Atuadores

Sensores

- Infra-Vermelho
- Sonar
- Laser
- GPS
- Odômetro
- Vídeo

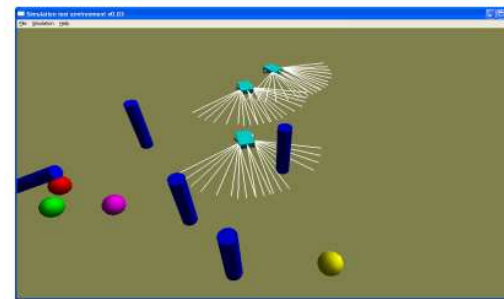
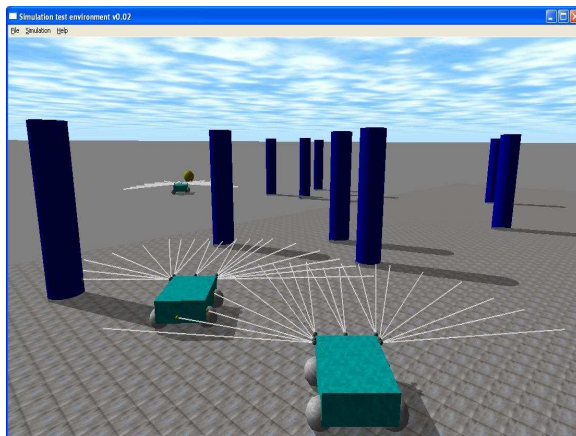


Modelos de Simulação

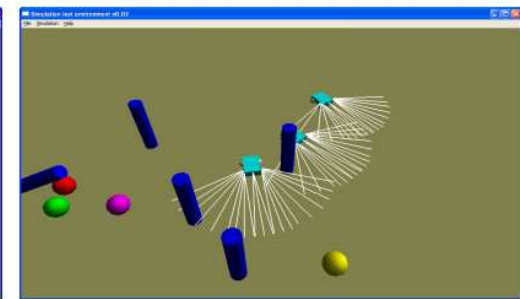
Modelagem: Sensores e Atuadores

Sensores

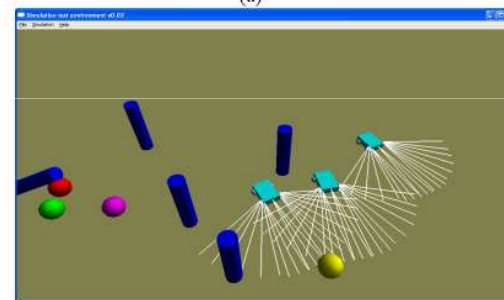
- Infra-Vermelho
- Sonar
- Laser
- GPS
- Odômetro



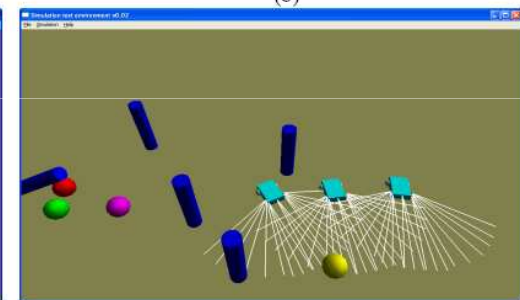
(a)



(b)



(c)



(d)

Seqüências de uma simulação com navegação e desvio satisfatórios

Robombeiros

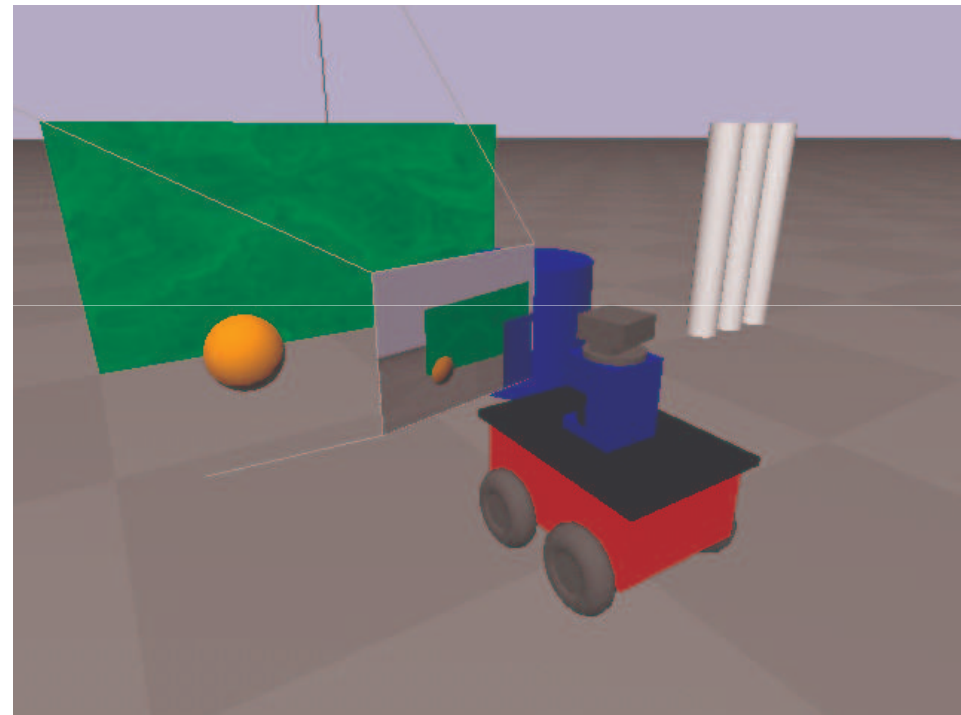
Modelos de Simulação

Modelagem: Sensores e Atuadores

Sensores

- Infra-Vermelho
- Sonar
- Laser
- GPS
- Odômetro
- Vídeo

Player-Stage- Gazebo

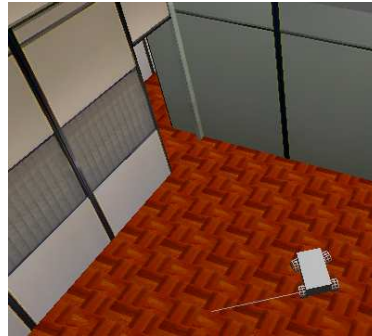


Modelos de Simulação

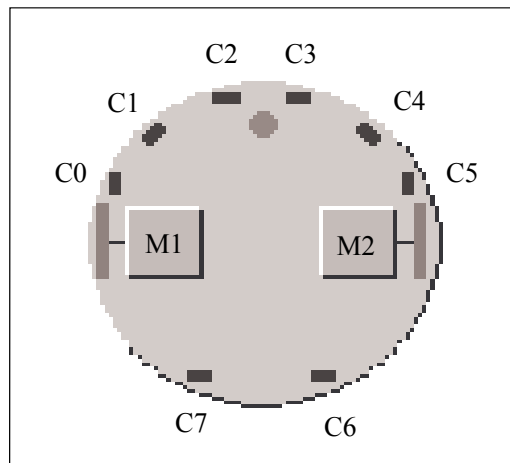
Modelagem: Sensores e Atuadores

Atuadores

- Rodas
- Esteiras
- Pernas/Patas

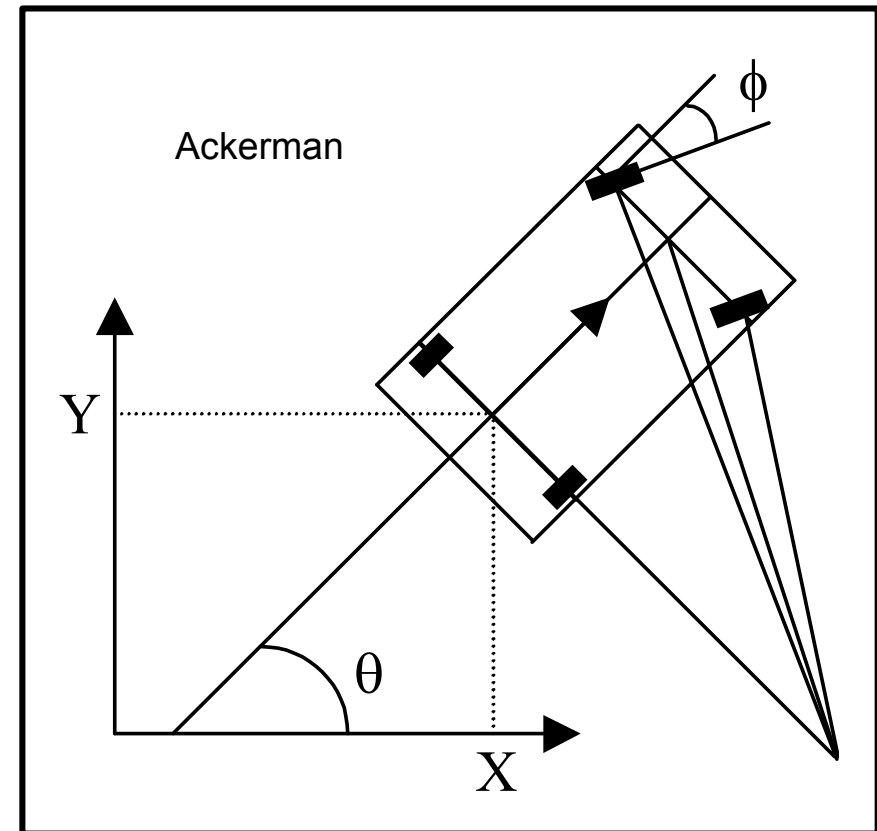


Diferencial



Cinemática do Robô

 Kinematics



Modelos de Simulação

Modelagem: Sensores e Atuadores

Atuadores

- Rodas
- Esteiras
- Pernas/Patas

Cinemática do Robô

Dinâmica do Robô

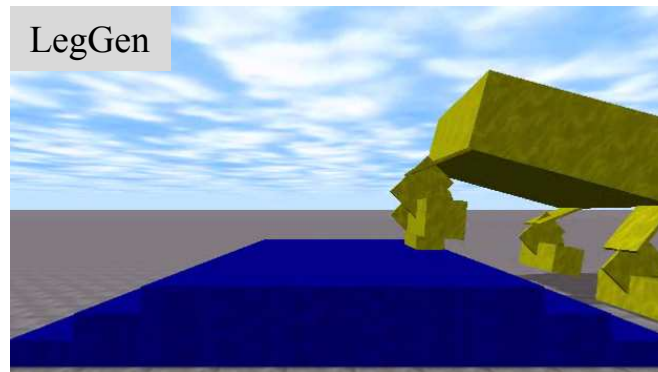


Modelos de Simulação

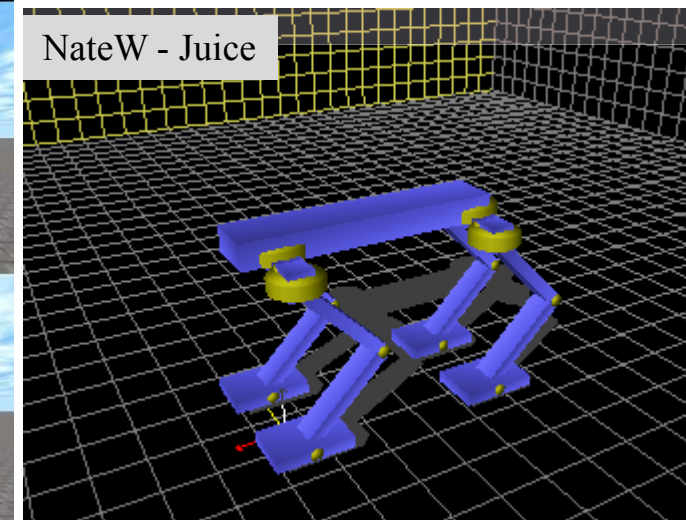
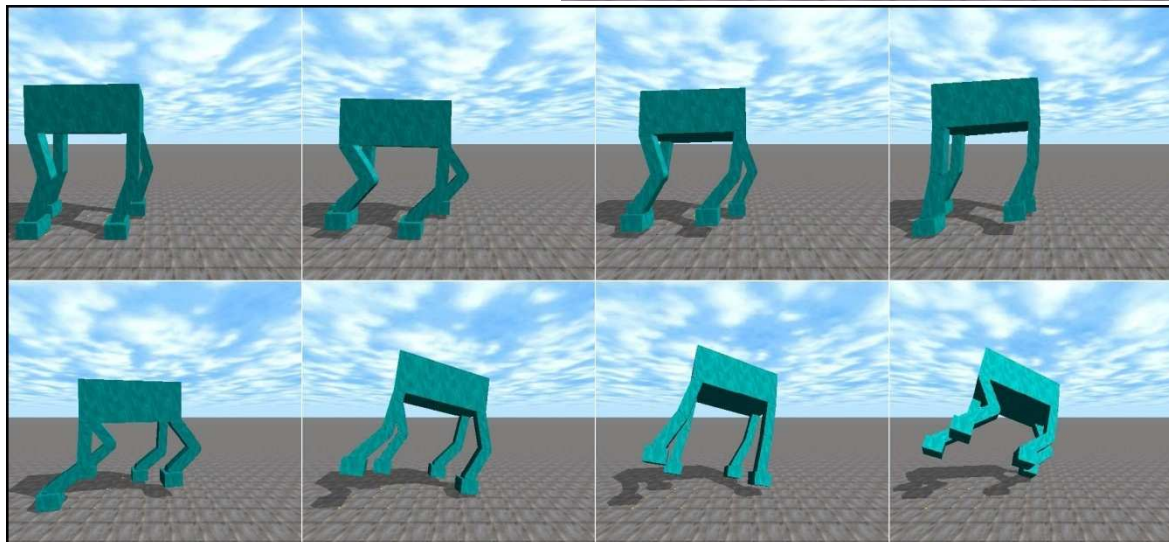
Modelagem: Sensores e Atuadores

Atuadores

- Rodas
- Esteiras
- Pernas/Patas



Cinemática do Robô
Dinâmica do Robô



Ferramentas de Simulação Virtual

Bibliotecas:

OpenGL

SDL

ODE

OSG

GALib

SNNS

Weka

Simuladores

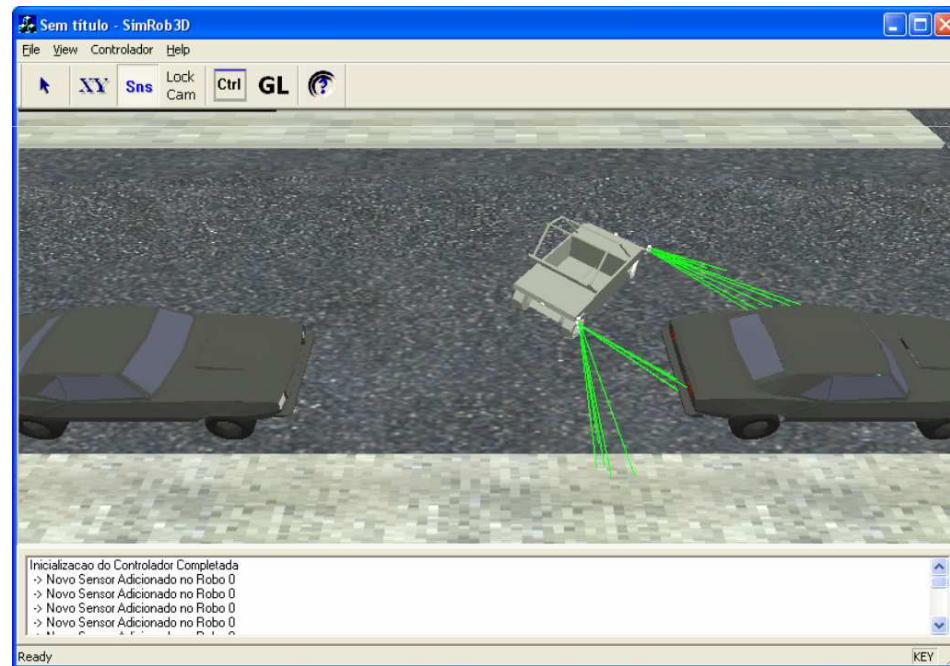
Completos

Visualização 2D e 3D

Simulação Sensores/Atuadores

Simulação Física: Cinemática e Dinâmica

Controle Inteligente: Evolução e Aprendizado



Seva3D

Ferramentas de Simulação Virtual

Bibliotecas:

OpenGL

SDL

ODE

OSG

GALib

SNNS

Weka

Simuladores

Completos

Visualização 2D e 3D

Simulação Sensores/Atuadores

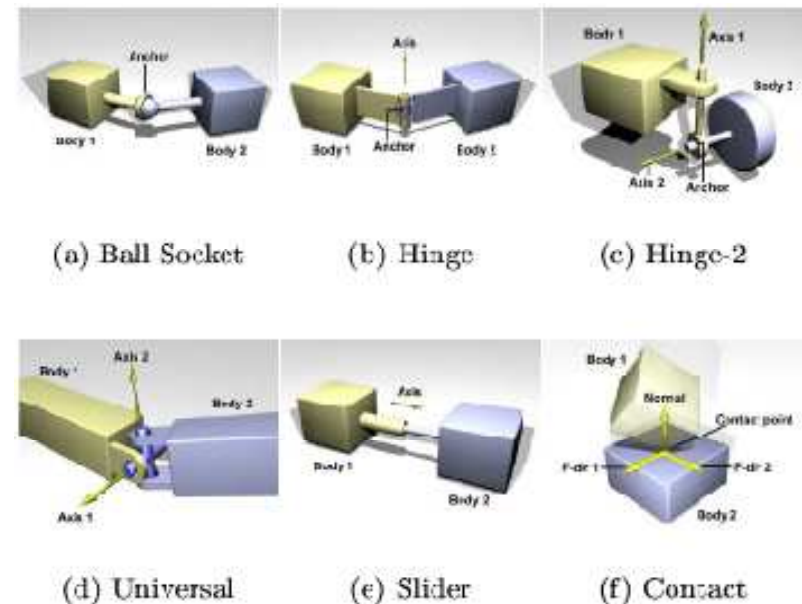
Simulação Física: Cinemática e Dinâmica

Controle Inteligente: Evolução e Aprendizado

ODE
Open Dynamics Engine

Rigid Body Physics Simulation:
Gravity, inertia, friction, collision,
joints, actuators, etc

<http://www.ode.org/>
Physics Engine



ODE

Ferramentas de Simulação Virtual

Bibliotecas:

OpenGL

SDL

ODE

OSG

GALib

SNNS

Weka

Simuladores

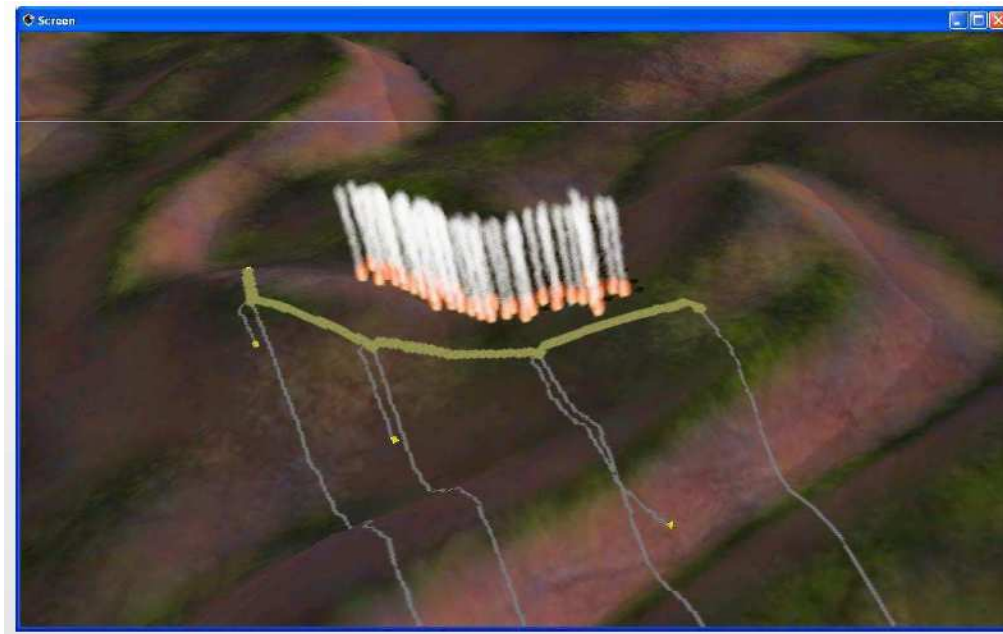
Completos

Visualização 2D e 3D

Simulação Sensores/Atuadores

Simulação Física: Cinemática e Dinâmica

Controle Inteligente: Evolução e Aprendizado



Ferramentas de Simulação Virtual

Bibliotecas:

OpenGL

SDL

ODE

OSG

GALib

SNNS

Weka

Simuladores

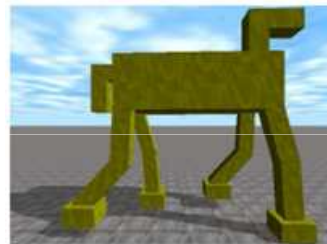
Completos

Visualização 2D e 3D

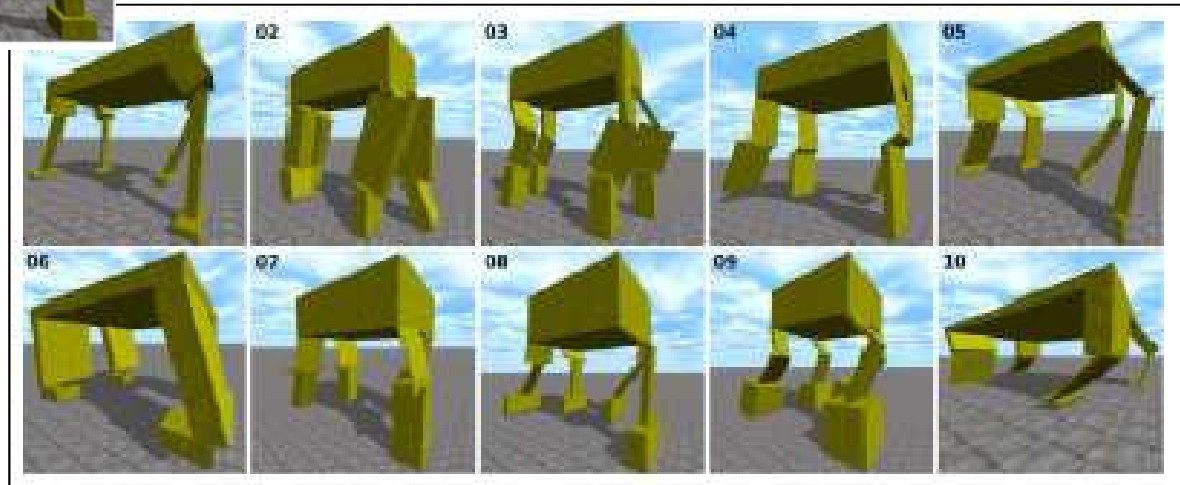
Simulação Sensores/Atuadores

Simulação Física: Cinemática e Dinâmica

Controle Inteligente: Evolução e Aprendizado



LegGen



Ferramentas de Simulação Virtual

Bibliotecas:

OpenGL

SDL

ODE

OSG

GALib

SNNS

Weka

Simuladores

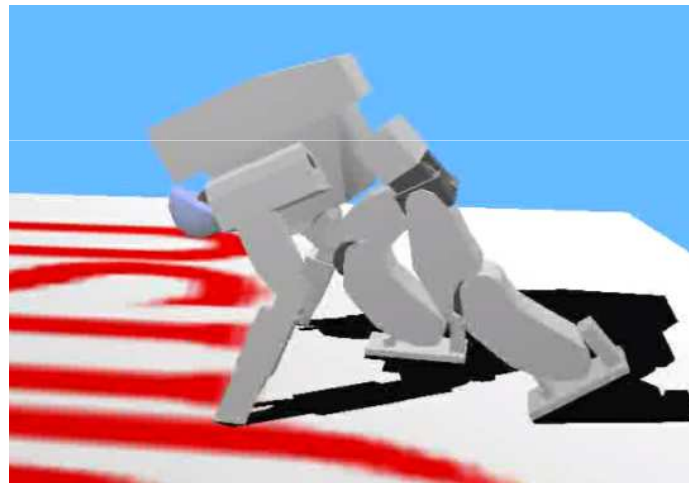
Completos

Visualização 2D e 3D

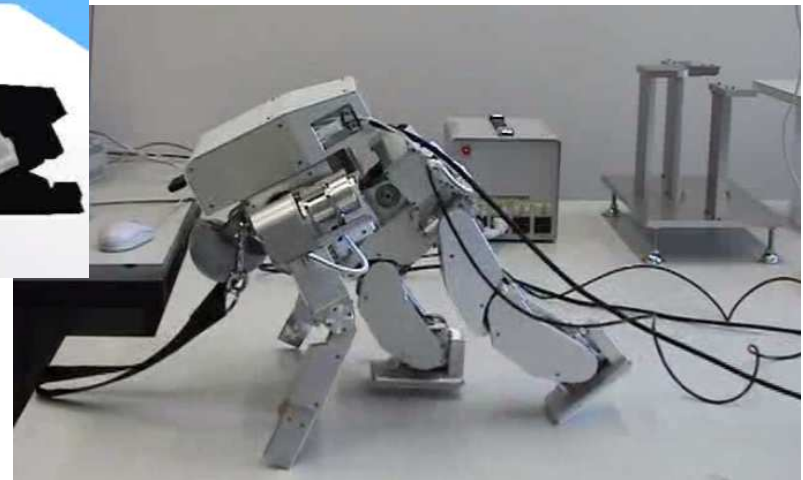
Simulação Sensores/Atuadores

Simulação Física: Cinemática e Dinâmica

Controle Inteligente: Evolução e Aprendizado



 Hoap



Ferramentas de Simulação Virtual

Bibliotecas:

OpenGL

SDL

ODE

OSG

GALib

SNNS

Weka

Visualização 2D e 3D

Simulação Sensores/Atuadores

Simulação Física: Cinemática e Dinâmica

Controle Inteligente: Evolução e Aprendizado



Simulated Car Racing

Simuladores

Completos

The simulated car racing competition of CIG-2009 is the final event of the 2009 Simulated Car Racing Championship, an event joining the three competitions held at CEC-2009, GECCO-2009, and CIG-2009.

<http://www.ieee-cig.org/>
Competitions



Ferramentas de Simulação Virtual

Bibliotecas:

OpenGL

SDL

ODE

OSG

GALib

SNNS

Weka

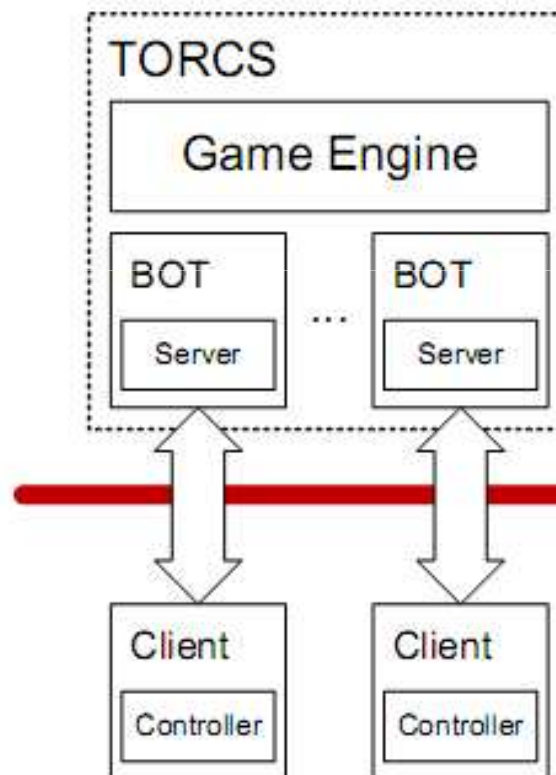
Simuladores

Completos

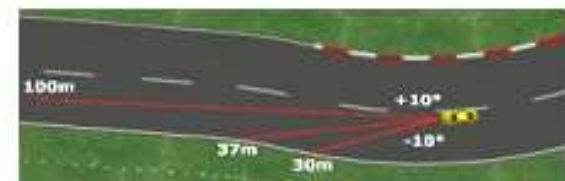
TORCS:

The Open Racing Car Simulator

<http://torcs.sourceforge.net/>



Sensors & Actuators Model



Ferramentas de Simulação Virtual

Bibliotecas:

OpenGL

SDL

ODE

OSG

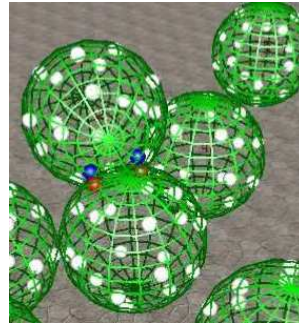
GALib

SNNS

Weka

Simuladores

Completos



Simulação:
Sem Limites!



Claytronics – <http://www.cs.cmu.edu/~claytronics/>

OBRIGADO!



LRM

Laboratório de Robótica Móvel

LRM: [Http://www.icmc.usp.br/~lrm](http://www.icmc.usp.br/~lrm)

Denis Fernando Wolf – denis@icmc.usp.br

Eduardo do Valle Simões – simoes@icmc.usp.br

Fernando Santos Osório - fosorio@icmc.usp.br

Onofre Trindade Junior - otjunior@icmc.usp.br

F.Osório: [Http://www.icmc.usp.br/~fosorio](http://www.icmc.usp.br/~fosorio) [Login: “usp” Password: “guest”]



LRM
Laboratório de Robótica Móvel

