



USP - ICMC - SSC – Pós-Grad. CCMC
SSC 5888 (RMA) - 1o. Semestre 2011

Disciplina de
Robôs Móveis Autônomos
SSC-5888

Prof. Fernando Santos Osório

LRM – Laboratório de Robótica Móvel do ICMC-USP

INCT-SEC – Instituto Nacional de C&T em

Sistemas Embarcados Críticos

Email: fosorio [at] { icmc. usp. br , gmail. com }

Web: <http://www.icmc.usp.br/~fosorio/>



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

Aula 02: Robôs Móveis - Navegação

Agenda:

1. **Navegação**
 - Módulo Reativo**
 - Módulo Deliberativo**
 - Arquitetura Híbrida**
2. **Mapas**
3. **Localização**
4. **Planejamento**

Robôs Móveis Autônomos

Robôs Móveis Autônomos

Recordando...

Introdução aos Sistemas Robóticos



**SENSORES
ATUADORES
CONTROLE INTELIGENTE**

Ciclo:

- Percepção
[Planejamento / Decisão]
- Ação

Tarefas:

- Localização (Pose)
- Mapas (criar, usar)
- Planejar Rotas
- Desviar de Obstáculos

3

Maio 2011

Trabalhos Práticos

Robôs Móveis Autônomos

• Avaliação

- André Magalhães:** ROS + Path Planning
Localização, Mapa
- Diego Sciotti:** Gazebo + Navegação GPS / Laser
Localização GPS, Sem Mapa
- Diogo Correa:** Kinect + Desvio Obstáculos
Sem Localização, Sem Mapa
- Francisco Jr.:** Fusão Câmera + Laser
Fusão Sensores / Detecção Obstáculos
- Lucas de Oliveira:** Player-Stage / Missão / GPS, Bússola (?)
Laser (Sem Mapa, Com Localização)
- Marcos Prado:** Gazebo + Estacionamento (Laser)
Sem Localização (?), Sem Mapa

4

Maio 2011

Arquitetura de Controle Reativo

Controle Reativo

Controle: Percepção [=> Decisão] => Ação

Reativo: Percepção => Ação

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

Comportamentos e Tarefas típicas: *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

5

Maio 2010

Aula 04 – Arquiteturas de Controle

Robôs Móveis Autônomos: Percebe => Decide => Age
Agentes Autônomos dotados de SENSORES e ATUADORES



6

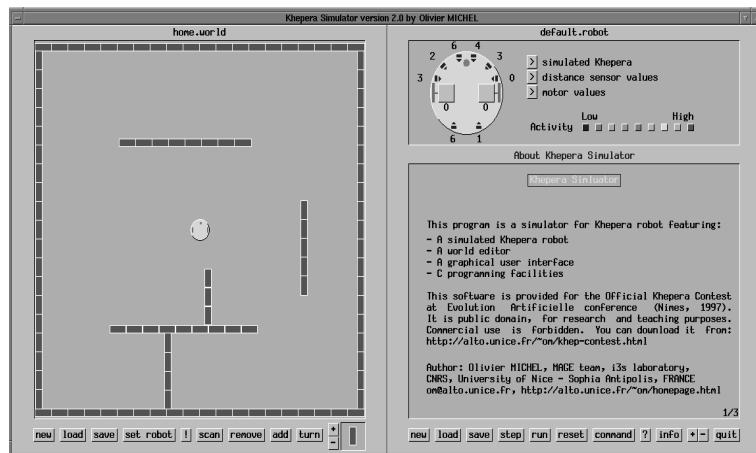
Março 2010

Controle e Autonomia

Arquitetura de Controle: **Reativo**

Simulador Khepera-SIM: Controle Reativo

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



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

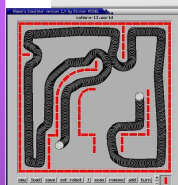
1997/98

7

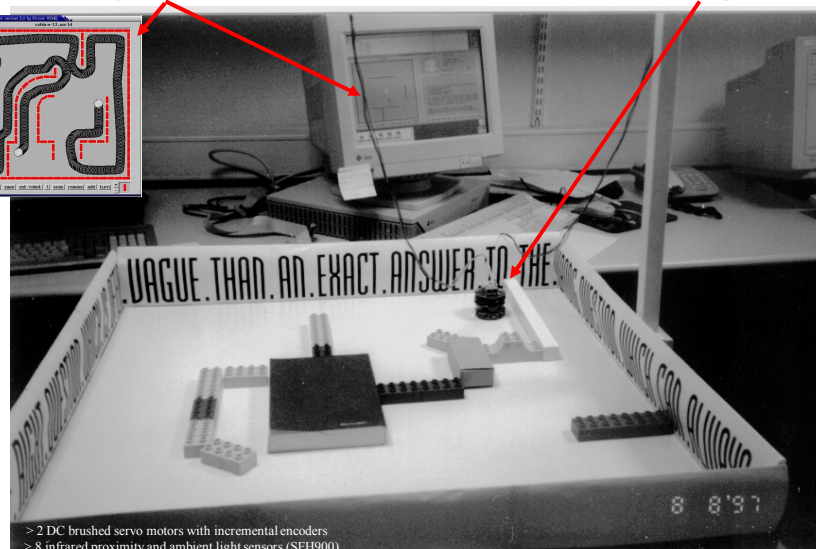
Março 2010

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)

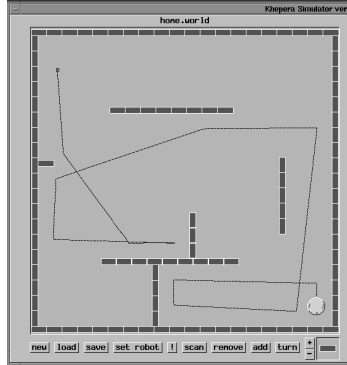
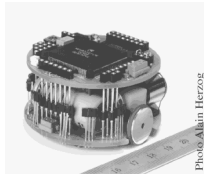
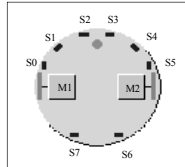
8

Março 2010

Arquitetura de Controle: **Reativo**

CONTROLE: Arquiteturas **REATIVAS**

• Reativo: Integração Sensorial-Motora



Evitar colisões e obstáculos
 Sensorial-Motor: Sentir => Agir

Controle Reativo

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

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)

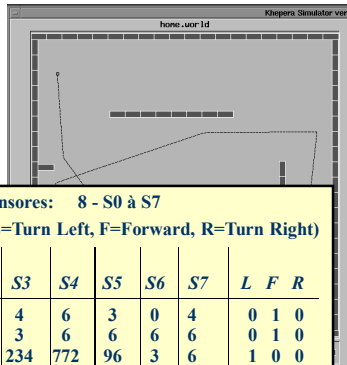
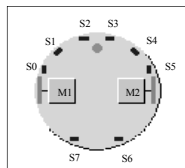
9

Março 2010

Arquitetura de Controle: **Reativo**

CONTROLE: Arquiteturas **REATIVAS**

• Reativo: Integração Sensorial-Motora



Sensores: 8 - S0 à S7
 Comandos: 3 ações (L=Turn Left, F=Forward, R=Turn Right)

S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	L	F	R
4	1	3	4	6	3	0	4	0	1	0
1	3	6	3	6	6	6	6	0	1	0
6	3	104	234	772	96	3	6	1	0	0
2	6	104	229	724	107	3	4	1	0	0
563	1023	57	6	6	0	3	1	0	0	1
544	1023	1	3	4	0	5	1	0	0	1

Controle Reativo

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

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)

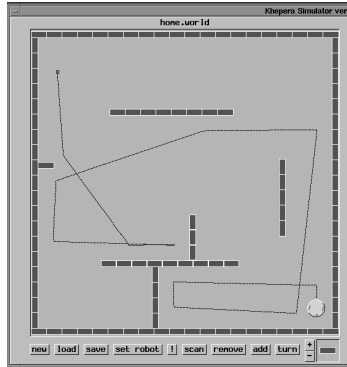
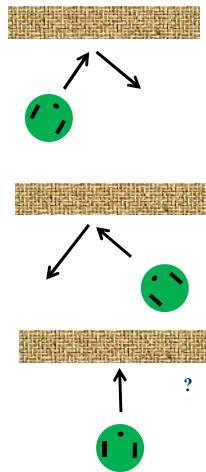
10

Março 2010

Arquitetura de Controle: **Reativo**

CONTROLE: Arquiteturas **REATIVAS**

• Reativo: Integração Sensorial-Motora



Evitar colisões e obstáculos
Sensorial-Motor: Sentir => Agir

Controle Reativo

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

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)

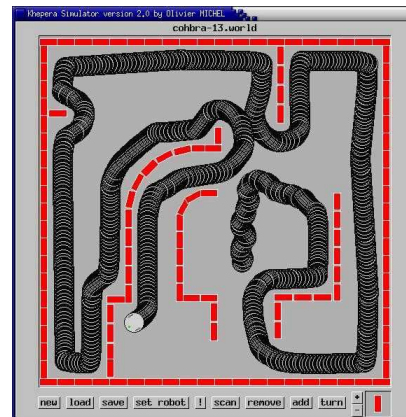
11

Março 2010

Arquitetura de Controle: **Reativo**

CONTROLE: Arquiteturas **REATIVAS**

• Reativo: Integração Sensorial-Motora



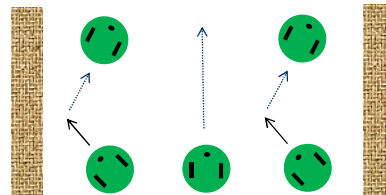
Seguir o contorno de uma parede
Sensorial-Motor: Sentir => Agir

Controle Reativo

Se Longe_Demais(Dist_Parede)
Então Gira_Direção(Lado_da_Parede);

Se Próximo_Demais(Dist_Parede)
Então Gira_Direção(Lado_Oposto_da_Parede);

Se Distância_Adequada(Dist_Parede)
Então Move_Para_Frente();



12

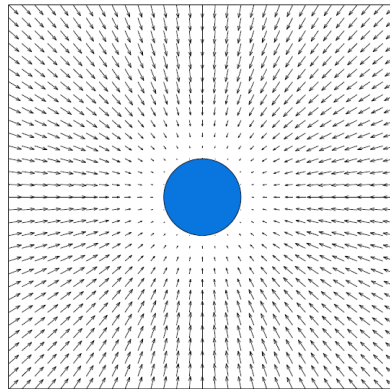
Março 2010

Arquitetura de Controle: **Reativo**

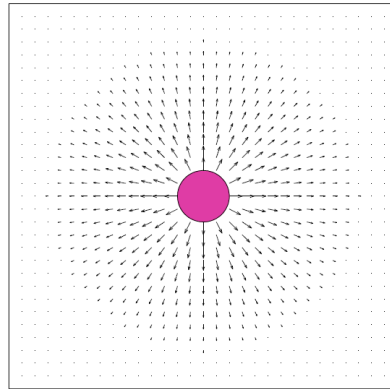
CONTROLE: Arquiteturas **REATIVAS***

- Reativo: Integração Sensorial-Motora
- Técnica: Campos Potenciais

Evitar colisões e obstáculos
 Seguir em direção a um alvo
 Sensorial-Motor: Sentir => Agir
 * Reativo “não puro” baseado em informações externas



Força de Atração



Força de Repulsão

13

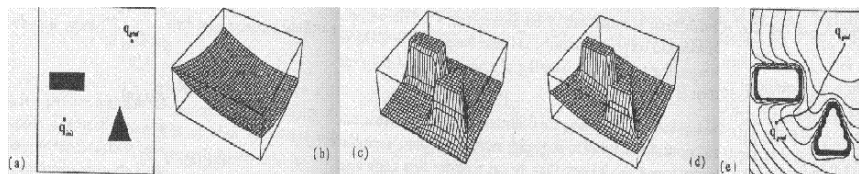
Março 2010

Arquitetura de Controle: **Reativo**

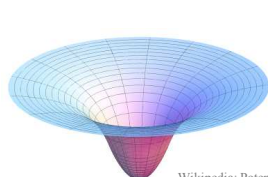
CONTROLE: Arquiteturas **REATIVAS***

- Reativo: Integração Sensorial-Motora
- Técnica: Campos Potenciais

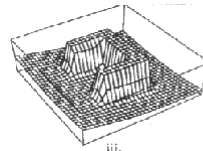
Evitar colisões e obstáculos
 Seguir em direção a um alvo
 Sensorial-Motor: Sentir => Agir
 * Reativo “não puro” baseado em informações externas



http://www.scf.usc.edu/~peiyingo/gra_planning.html



Wikipedia: Potential Filed



iii.



iv.

Houston, we have a problem!

Forças Combinadas: Força de Atração + Força de Repulsão

14

Março 2010

Arquitetura de Controle: **Reativo**

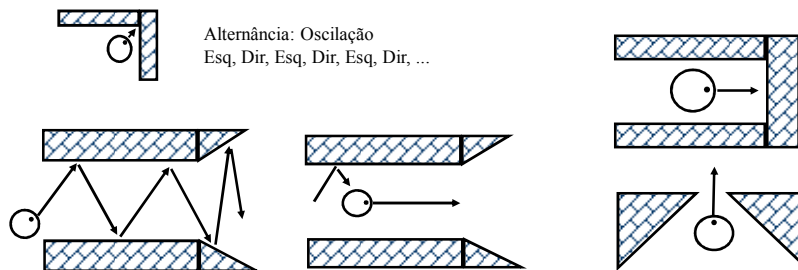
CONTROLE: Arquiteturas **REATIVAS***

- **Reativo: Integração Sensorial-Motora**
- **Técnicas:**
 - Desvio reativo de Obstáculos
 - Campos Potenciais

Evitar colisões e obstáculos
Seguir em direção a um alvo
Sensorial-Motor: Sentir => Agir
* Reativo “não puro” baseado em
informações externas **LOCAIS**

• Problemas...

Houston, we have a problem!
>> Mínimos Locais
>> Passado, Memória e Contexto



15

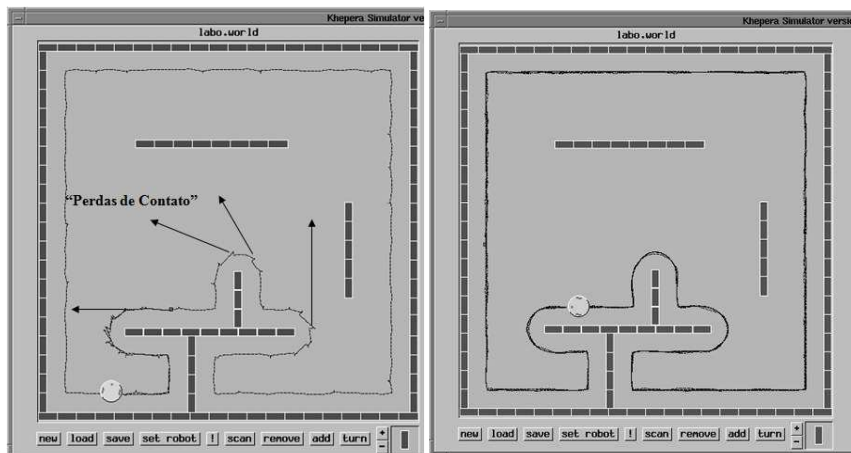
Março 2010

Arquitetura de Controle: **Reativo**

CONTROLE: Arquiteturas **REATIVAS***

- **Reativo: Integração Sensorial-Motora**
- **Problemas...**

Houston, we have a problem!
>> Mínimos Locais
>> Passado, Memória e Contexto



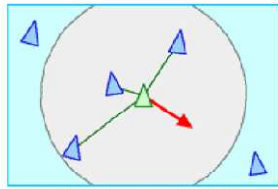
16

Março 2010

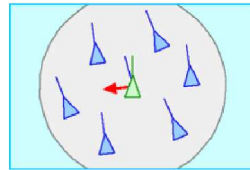
Arquitetura de Controle: **Reativo**

CONTROLE: Arquiteturas **REATIVAS**

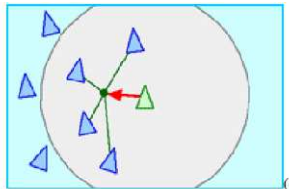
- **Reativo: Múltiplos Robôs** => **Boids / Steering [Craig Reynolds]**



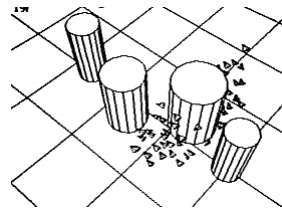
(a) **Separation:** Direcionar o movimento dos agentes para evitar um aglomeramento local dos membros do grupo.



(b) **Alignment:** Direcionar o movimento de modo a seguir o alinhamento médio (*heading*) dos membros do grupo.



(c) **Cohesion:** Direcionar o movimento de modo a ir em direção a posição central média dos membros do grupo



17

Março 2010

Arquitetura de Controle Deliberativo

Controle Deliberativo

Controle: Percepção => [Conhecimento e Decisão] => Ação

Deliberativo: Percepção => Planeja, Delibera => Ação

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

Tarefas típicas: *Behaviour : Task Planning, Action Sequence*

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

18

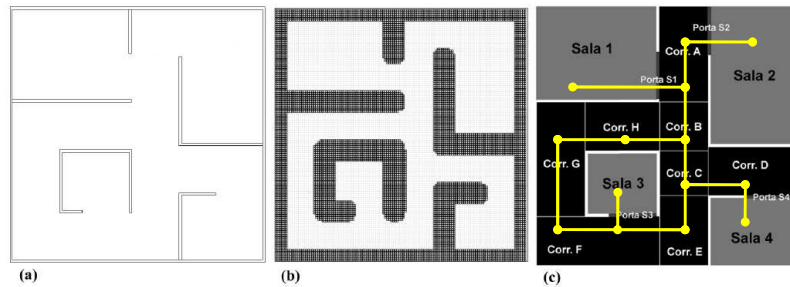
Maio 2010

Arquitetura de Controle Deliberativo

Controle Deliberativo

MAPAS DO AMBIENTE: Métrico / Topológico

- Mapa Métrico do tipo GRADE (Grid, Mapa de Ocupação)
- Mapa Métrico do tipo GEOMÉTRICO (Geometria do Ambiente)



Geométrico (a); Baseado em Grade (b); Topológico/semântico (c);

19

Março 2010

Farlei Heinen, 2002

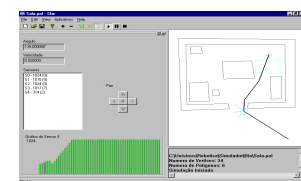
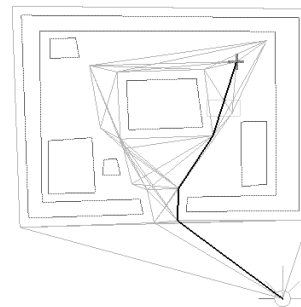
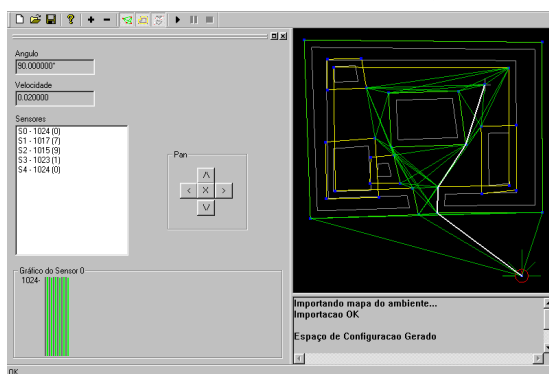
Arquitetura de Controle: Deliberativo

SIMROB2D

Referência:

Farlei Heinen (Orientador: Fernando Osório)
 Robótica Autônoma: A integração entre planificação e comportamento reativo, 2000.

Sensores: 5 IR / Atuadores: 2 motores (diferencial)

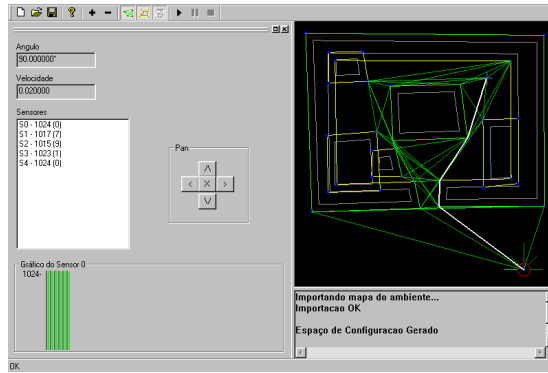


20

Março 2010

Arquitetura de Controle: **Deliberativo**

SIMROB2D



Farlei Heinen, 2000

Planejando a Trajetória do Robo com o uso do Mapa

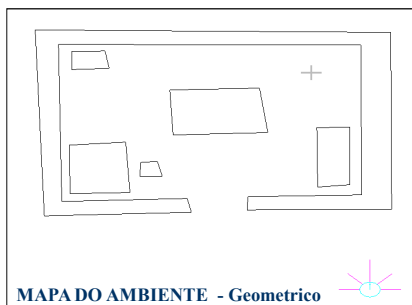
1. Determinar a área onde o robô pode navegar: Espaço de Configuração
2. Gerar o conjunto de rotas possíveis: Grafo de Visibilidade
3. Obter a melhor trajetória dentro das rotas possíveis: Algoritmo de Dijkstra

21

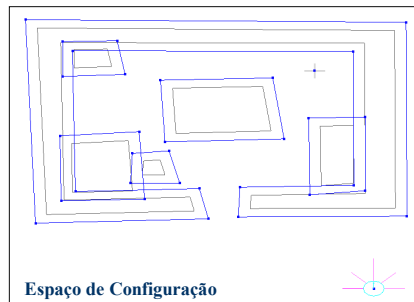
Março 2010

Arquitetura de Controle: **Deliberativo**

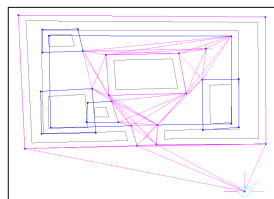
SIMROB2D



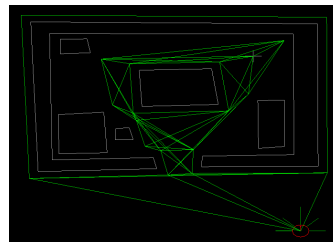
MAPA DO AMBIENTE - Geometrico



Espaço de Configuração



Grafo de Visibilidade

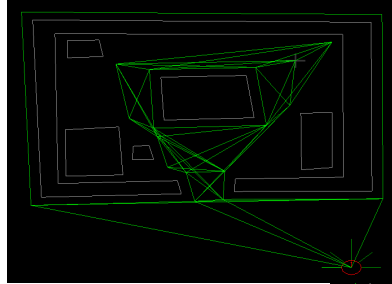


22

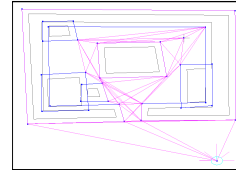
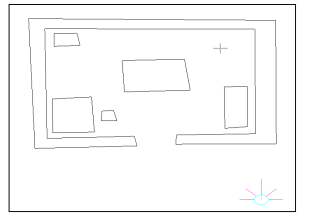
Março 2010

Arquitetura de Controle: **Deliberativo**

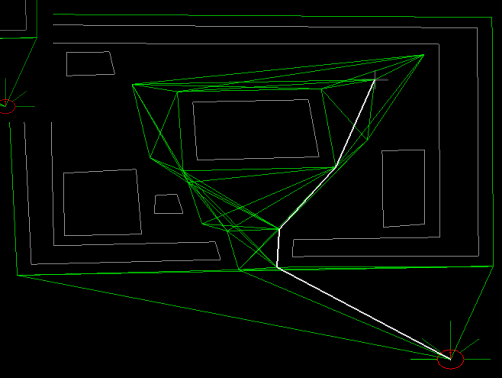
SIMROB2D



Grafo de Visibilidade



Caminho Ótimo no Grafo: Dijkstra



23

Março 2010

Arquitetura de Controle: **Deliberativo**

PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIAS Baseado em Mapas – Múltiplos Algoritmos

Navegação baseada em
Mapa de Ocupação:
Planejamento A*

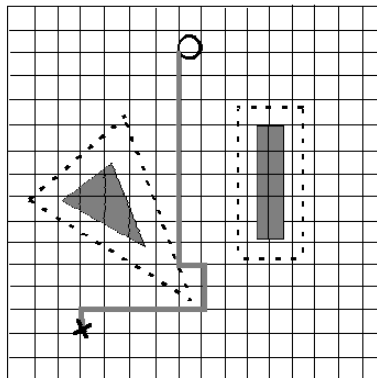
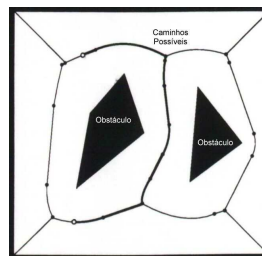
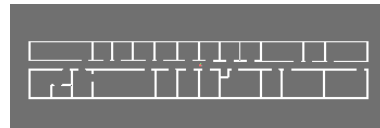


Figura 4.3 Navegação baseada em *Grid*



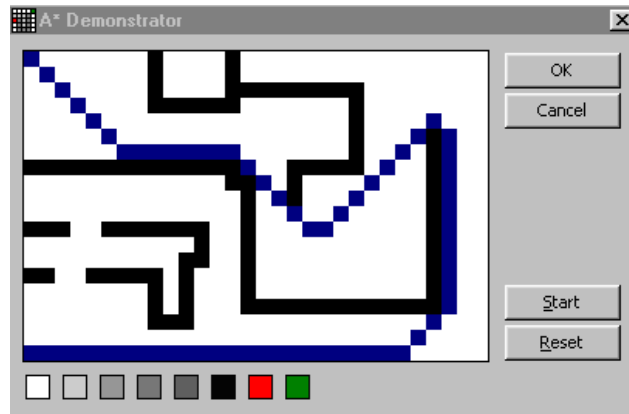
Navegação baseada em
Mapa Geométrico:
Diagramas de Voronoi

24

Março 2010

Farlei Heinen, 2002.

A* Search: [Tutorial *SBGames07*] Busca Heurística de Caminhos

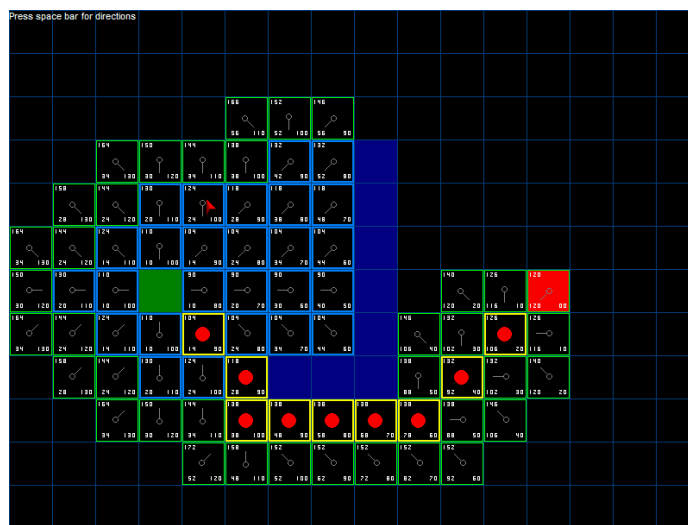


25

[Matthews 2003]

Março 2010

A* – Planejamento de Trajetórias [Tutorial *SBGames 2007*]



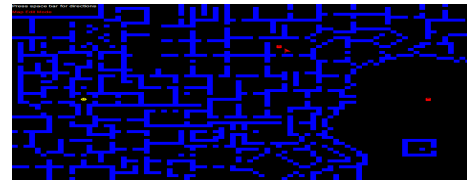
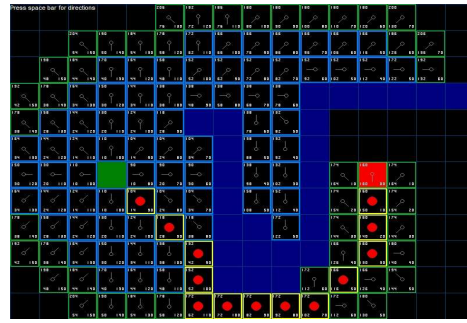
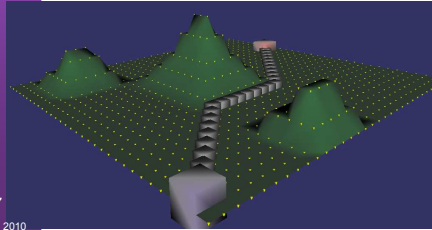
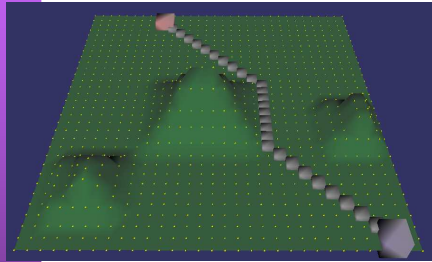
26

Março 2010

A* Search: [Tutorial *SBGames07*]

Busca Heurística de Caminhos

[Lester 2004, 2007]



27

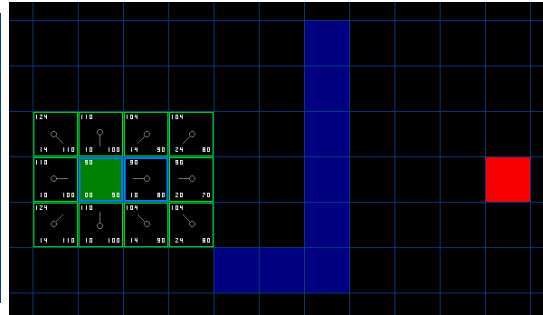
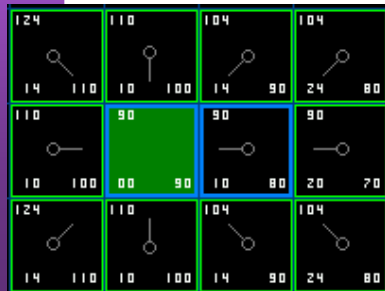
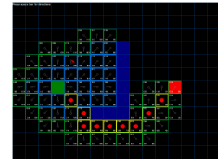
Março 2010

A* Search: [Tutorial *SBGames07*]

Busca Heurística de Caminhos

Custo de um Caminho

$$F(x) = G(x) + H(x) \quad \therefore \quad G = \text{Percorrido}, H = \text{Estimado}$$



Março 2010

Controle Robótico Inteligente: **Deliberativo**

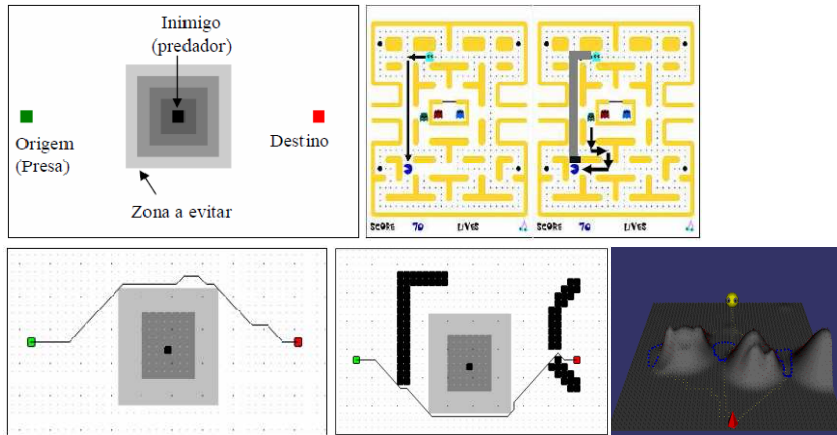
A* Search: [Tutorial *SBGames07*]

Busca Heurística de Caminhos

MAPA: Custo do Terreno a ser Atravessado

Custo de um Caminho

$$F(x) = G(x) + H(x) \quad \therefore \quad G = \text{Percorrido}, H = \text{Estimado}$$



29

Março 2010

Arquitetura de Controle: **Deliberativo**

CONTROLE: Arquiteturas **Deliberativo**

• Deliberativo: Planejamento

• Técnicas:

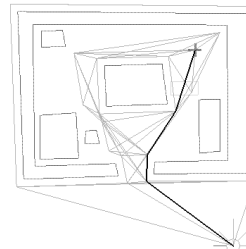
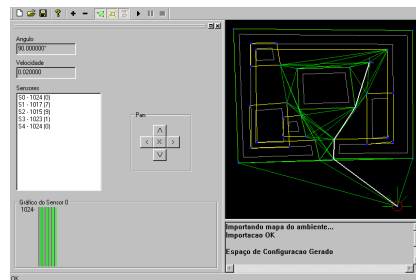
- Grafo de Visibilidade
- Voronoi
- A* ...

• Problemas...

Seguir em direção a um alvo
Planejamento de Trajetória com Mapa
* Deliberativo “puro” baseado em
informações externas GLOBAIS

Houston, we have a problem!

- >> Mapas com informações imprecisas
- >> Obstáculos Dinâmicos (não mapeados)
- >> Erros de localização do robô



Localização => Tem que ser precisa!
Mapa do Ambiente => Tem que ser exato!

30

Março 2010

Arquitetura de Controle

Referências citadas nesta aula...

Craig Reynolds – Boids, OpenSteer, Flocks (múltiplos agentes autônomos)
<http://www.red3d.com/cwr/boids/>

Robocode – Batalha de Robôs Simulados
<http://robocode.sourceforge.net/>

Simulador do Khepera
<http://diwww.epfl.ch/lami/team/michel/khep-sim/>

Simulador com Planejamento de Trajetória (SimRob 2D)
<http://nrg.unisinos.br/robotica/robotica.html>

Referências do Algoritmo A* (A Star)

A* Demo1: http://www.policyalmanac.org/games/aStarTutorial_port.htm

A* Demo2: <http://www.gamedev.net/REFERENCE/ARTICLES/ARTICLE2003.ASP>

A* Múltiplo: <http://www.inf.unisinos.br/~sbgames/anais/tutorials/Tutorial3.pdf>

31

Março 2010

Arquiteturas de Controle

Controle e Autonomia

Arquiteturas de Controle Robótico

- Arquitetura Reativa
- Arquitetura Deliberativa
- Arquitetura Hierárquica
- Arquitetura Híbrida

Controle => Tomada de Decisão para Realizar Ações

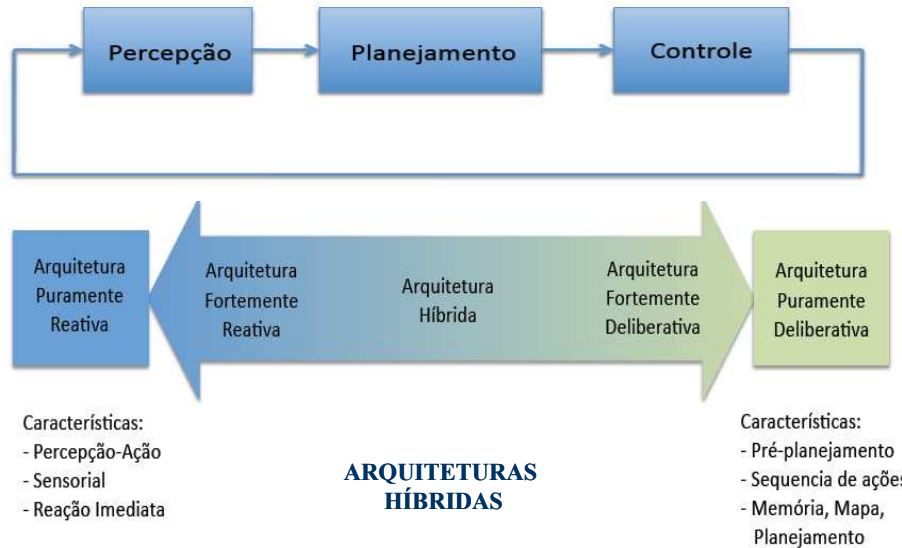
Arquitetura => Modelo de Tomada de Decisão

Autonomia => Independência e Robustez na Tomada de Decisões

32

Abril 2010

Arquiteturas de Controle



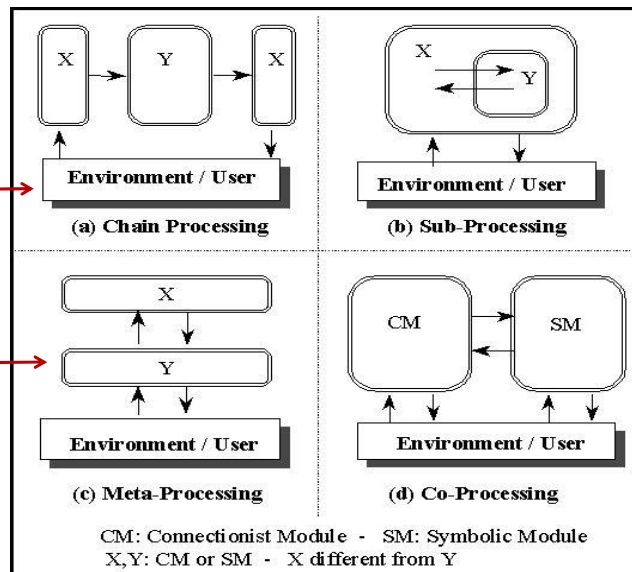
[J. Okamoto Jr & V. Grassi Jr., 2011]

Arquiteturas de Controle

Hybrid Systems

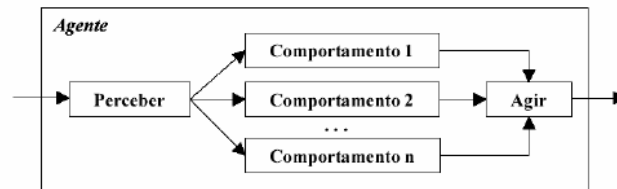
Camadas Horizontal

Camadas Vertical



Arquiteturas de Controle Híbridas

Controle Hierárquico



Hierarquia de Comportamentos:

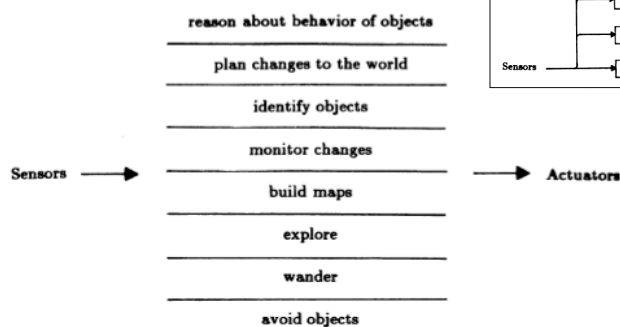
- Evitar/Desviar de obstáculos
- Seguir em uma determinada direção
- Seguir uma determinada rota

35

Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

Controle Hierárquico



Brooks - Arquitetura Subsumption

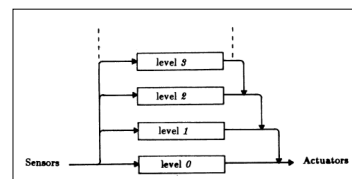


Figure 2. A decomposition of a mobile robot control system based on task achieving behaviors.

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

36

Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

Controle Hierárquico

Arquiteturas Hierárquicas

Brooks-Subsumption

SMPA

“Sense” – “Model” – “Plan” – “Act”

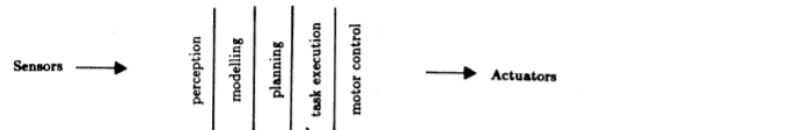


Figure 1. A traditional decomposition of a mobile robot control system into functional modules.

37

Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

Controle Hierárquico

Arquiteturas Hierárquicas

Brooks-Subsumption

SMPA

“Sense” – “Model” – “Plan” – “Act”

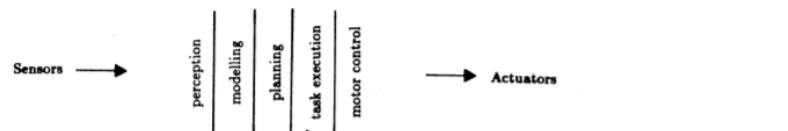


Figure 1. A traditional decomposition of a mobile robot control system into functional modules.

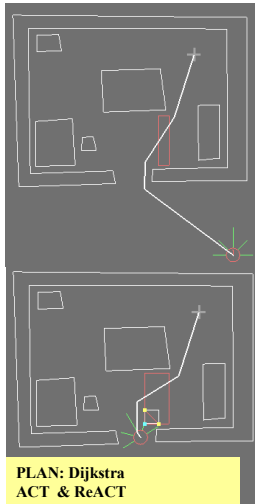
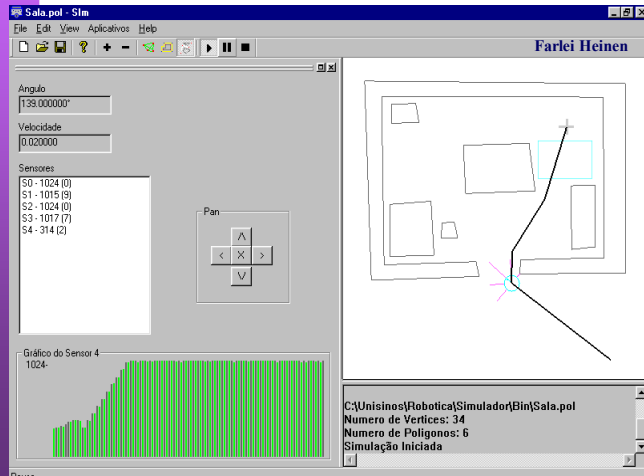
38

Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

Controle Hierárquico/Híbrido: SMPA

Controle Híbrido



39
 Abril 2010

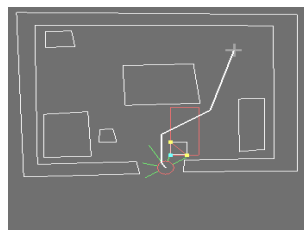
Arquiteturas de Controle Híbridas

Controle Hierárquico/Híbrido: SMPA

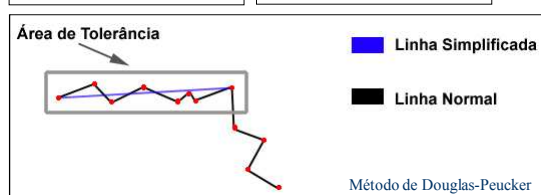
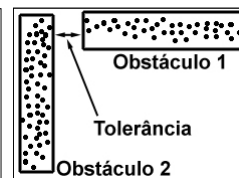
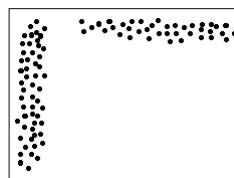
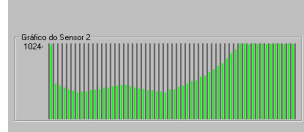
Sense – MODEL – Plan – Act

Conflito Cognitivo:
 - Valor Esperado
 - Valor Real
 (lido pelos sensores)

Mapeamento:
 - Nuvem de pontos
 - Extração de contorno



■ Valor Esperado
 ■ Valor Real

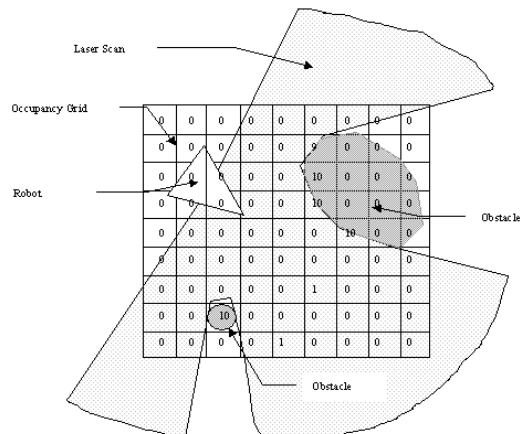
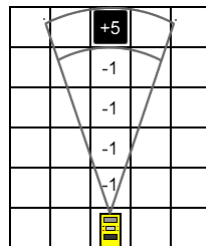


40
 Abril 2010

Controle Hierárquico/Híbrido: SMPA

Sense – MODEL – Plan - Act

Environment Map:
 Occupancy Grid



41

Abril 2010

http://cgi.cse.unsw.edu.au/~cs4411/wiki/index.php?title=Occupancy_Grid

Controle Hierárquico/Híbrido: SMPA

Sense – MODEL – Plan - Act

Environment Map:
 Occupancy Grid

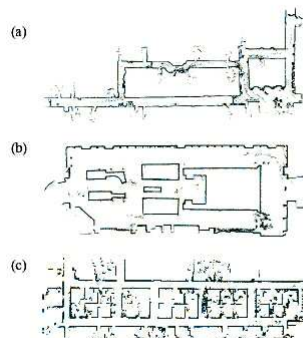
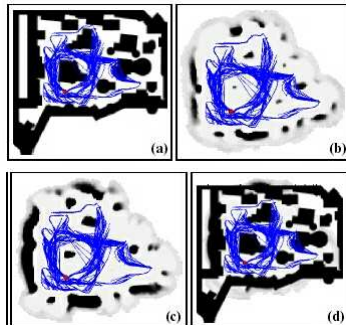


Figure 5: Maps generated in other large-scale environments of sizes (a) 75m, (b) 45m, and (c) 50m. In some of these runs, the cumulative odometric error exceeds 30 meters and 90 degrees.

Fig. 9. Integrating multiple maps: (a) CAD map of the museum ($21 \times 20m^2$) modeling only the static obstacles, (b) laser map, (c) sonar map, and (d) the integrated map used for path planning.

42

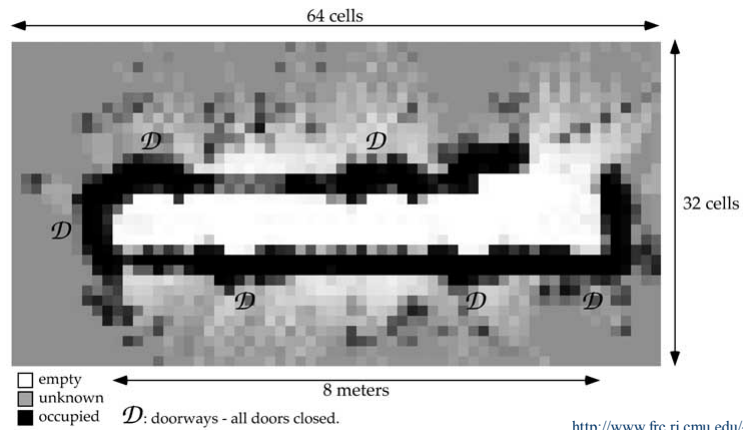
Abril 2010

Sebastian Thrun / CMU

Controle Hierárquico/Híbrido: SMPA

Sense – MODEL – Plan - Act

Environment Map:



43

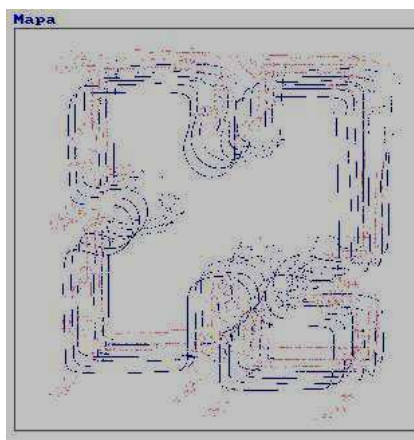
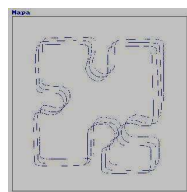
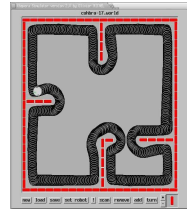
Abril 2010

<http://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/talks/>

Controle Hierárquico/Híbrido: SMPA

Sense – MODEL – Plan - Act

Environment Map:
 Occupancy Grid



44

Abril 2010

Flávio Alves

Arquiteturas de Controle Híbridas

Controle Hierárquico/Híbrido:

MAPAS:

- Construção - Exemplo: SMPA
- Utilização - Exemplo: A*

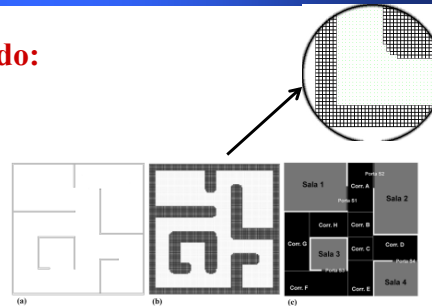
PROBLEMA:

➤ LOCALIZAÇÃO!

- Para poder construir um mapa precisamos controlar a posição e o deslocamento do robô;
- Para poder navegar usando um mapa precisamos saber onde está o robô.

Where am I? [Borenstein 1996]

<http://www-personal.umich.edu/~johannb/position.htm>



45

Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

Controle Hierárquico/Híbrido:

➤ POSE

Posição (X, Y [Z])

Orientação Θ ou $\Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$

POSE 2D = X, Y, Θ

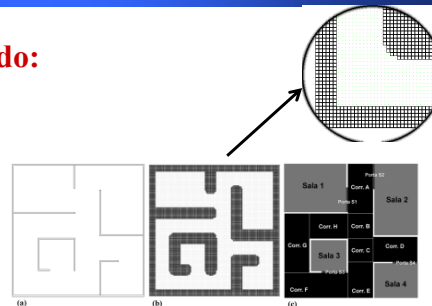
POSE 3D = X, Y, Z, $\Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$

➤ LOCALIZAÇÃO!

- Para poder construir um mapa precisamos controlar a posição e o deslocamento do robô;
- Para poder navegar usando um mapa precisamos saber onde está o robô.

Where am I? [Borenstein 1996]

<http://www-personal.umich.edu/~johannb/position.htm>



46

Abril 2010

Controle Hierárquico/Híbrido:

>> Estimativa da Posição <<

Posição Inicial + Deslocamentos $\Rightarrow$ Posição Final

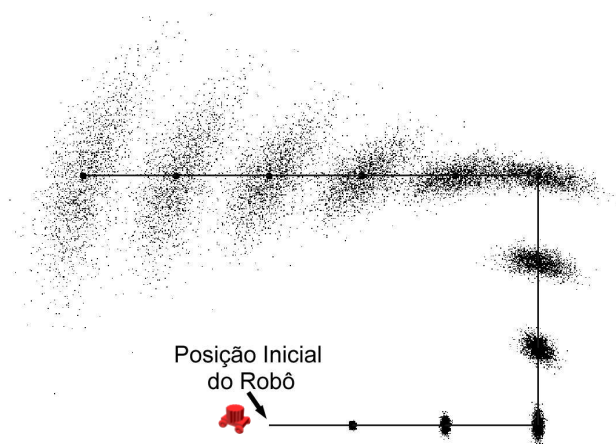
Integração dos deslocamentos no tempo: Odometria

PROBLEMAS:

- Como determinar a posição inicial?
- Como medir precisamente os deslocamentos:
 - * Avanço em linha reta
 - * Giro para os lados

Controle Hierárquico/Híbrido:

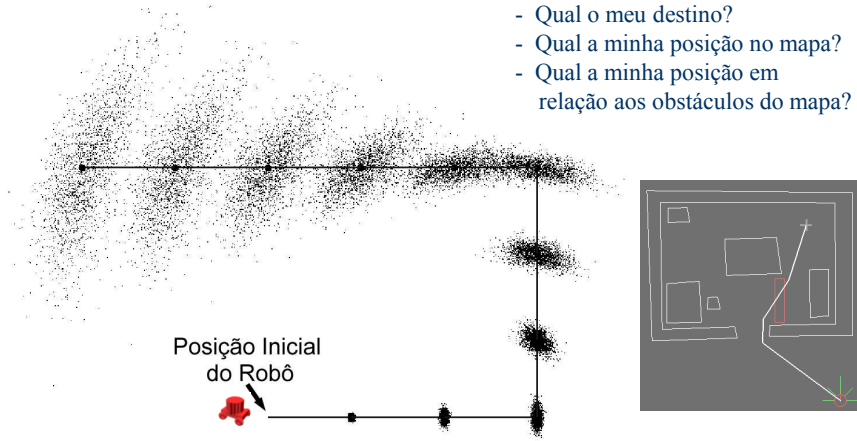
Erro de Odometria...



Auto-Localização: O problema

Localização do Robô:

Erro de Odometria...



Questões:

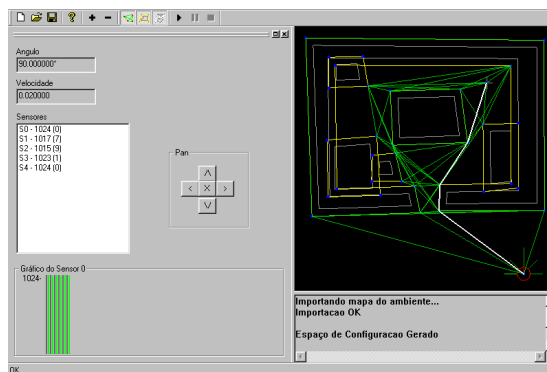
- Onde estou?
- Em que direção devo ir?
- Quanto devo avançar?
- Qual o meu destino?
- Qual a minha posição no mapa?
- Qual a minha posição em relação aos obstáculos do mapa?

49

Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

PROBLEMA: Erro de Localização => IMPACTO no Algoritmo de Navegação e Detecção de Obstáculos



O que ocorre se a posição estimada estiver incorreta?

Farlei Heinen, 2000

Planejando a Trajetória do Robo com o uso do Mapa

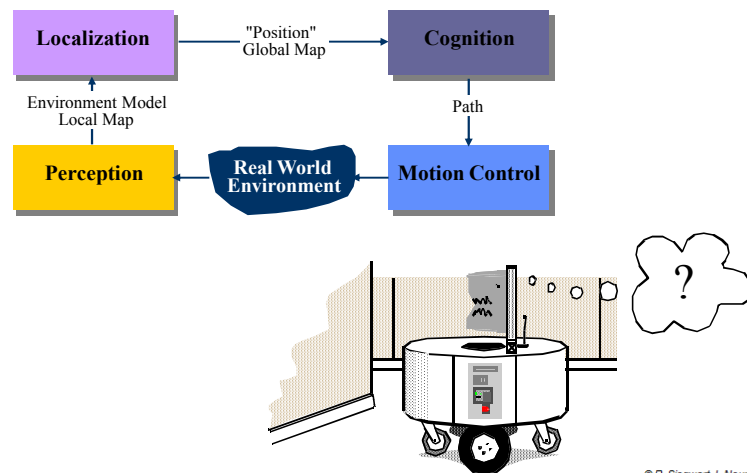
1. Determinar a área onde o robô pode navegar: Espaço de Configuração
2. Gerar o conjunto de rotas possíveis: Grafo de Visibilidade
3. Obter a melhor trajetória dentro das rotas possíveis: Algoritmo de Dijkstra

50

Março 2010

Localização e Uso de Mapas

Controle de Robôs Móveis Autônomos



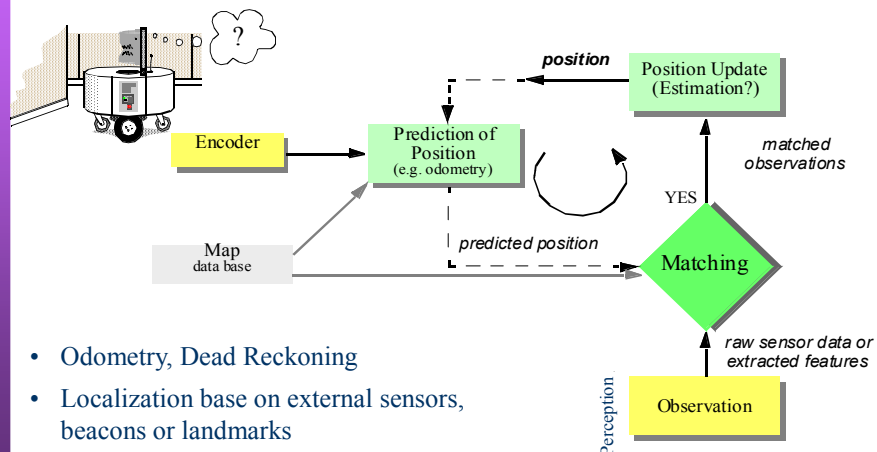
51

Maio 2010

© R. Siegwart, I. Nourbakhsh

Localização e Uso de Mapas

Controle de Robôs Móveis Autônomos



- Odometry, Dead Reckoning
- Localization base on external sensors, beacons or landmarks
- Probabilistic Map Based Localization

52

Maio 2010

© R. Siegwart, I. Nourbakhsh

Arquiteturas de Controle Híbridas

PROPOSTA DE ARQUITETURA: COHBRA

Arquitetura Híbrida

- Módulo de Localização (MCL – Monte Carlo Localization)
- Representação do Ambiente através de Mapas
(Ocupação/Grid, Geométrico e Topológico)
- Módulos com Comportamentos: Reativo + Deliberativo
 - Reativo: Desvio de Obstáculos (campos potenciais)
 - Deliberativo: Planejamento de Trajetórias (A*)
- Integração de Múltiplos Comportamentos:
Hierarquia Vertical

Arquitetura Híbrida por Co-Processamento: Localização x Navegação

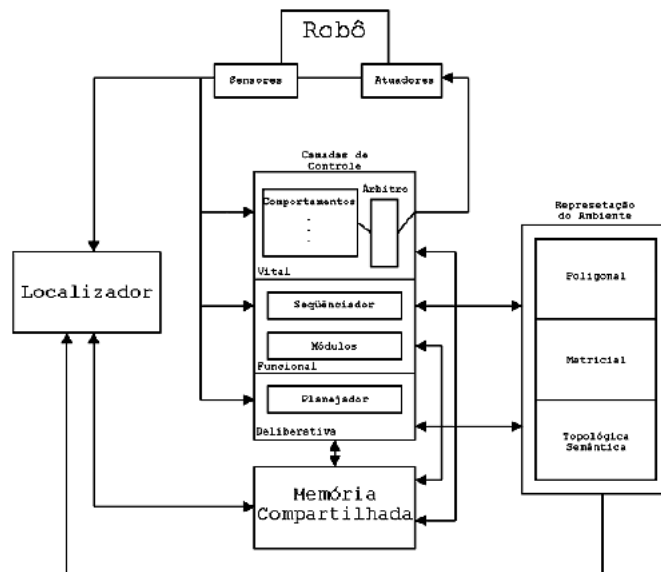
Arquitetura Híbrida em Camadas Hierárquicas: Módulos de Comportamentos

53

Março 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

Controle Híbrido Robusto – COHBRA / SimRob3D

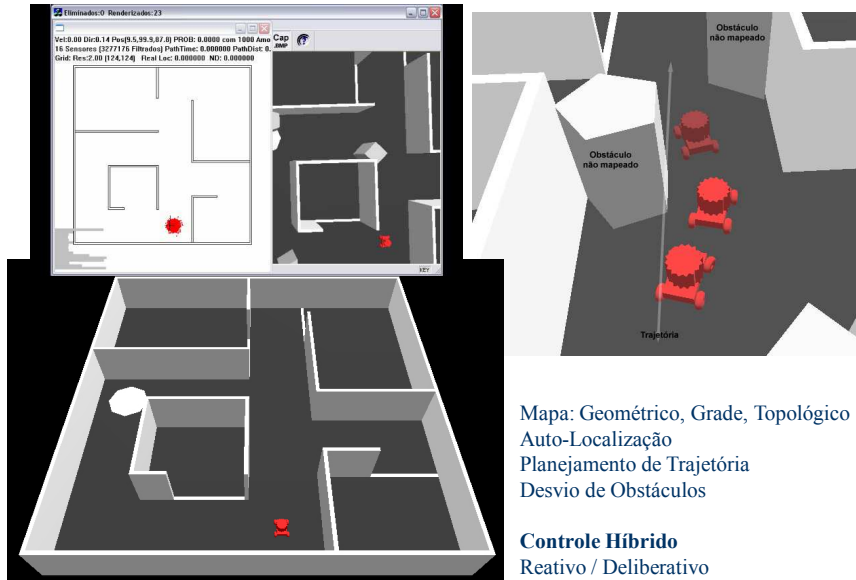


54

Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

Controle Híbrido Robusto – COHBRA / SimRob3D



Mapa: Geométrico, Grade, Topológico
Auto-Localização
Planejamento de Trajetória
Desvio de Obstáculos

Controle Híbrido
Reativo / Deliberativo

55

Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

SLAM

Controle Híbrido: Arquitetura SLAM

SLAM = Simultaneous localization and mapping

Refs:

SLAM

http://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_localization_and_mapping

OpenSLAM

<http://openslam.org/>

MATLAB SLAM

<http://eia.udg.es/~qsalvi/Slam.zip>

Book: Probabilistic Robotics - The MIT Press (2005)
by Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox

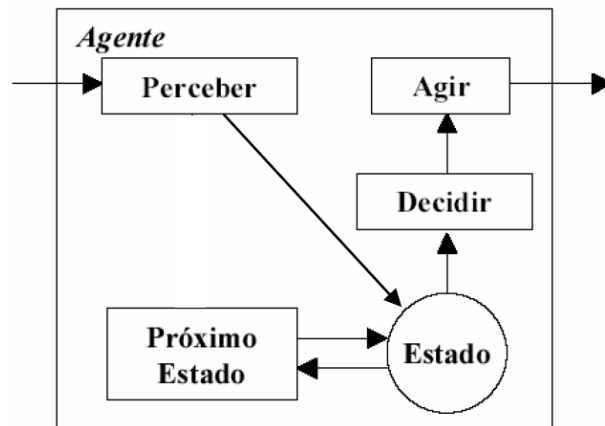
56

Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

Arquiteturas Híbridas

Controle Híbrido: Arquitetura com Estados Internos (Autômato)



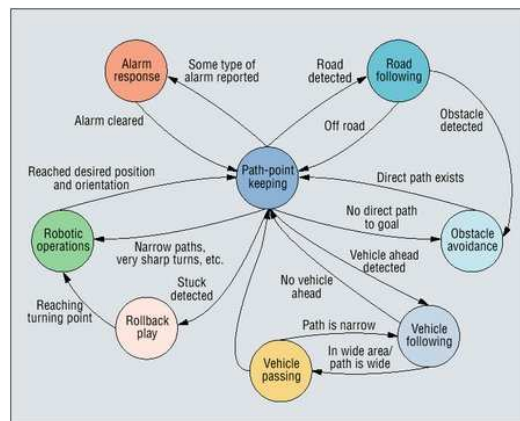
57

Abril 2010

Arquitetura com Estado Interno

Arquiteturas de Controle Híbridas

➤ Autômato Finito / FSM – Finite State Machine



DARPA Challenge

58

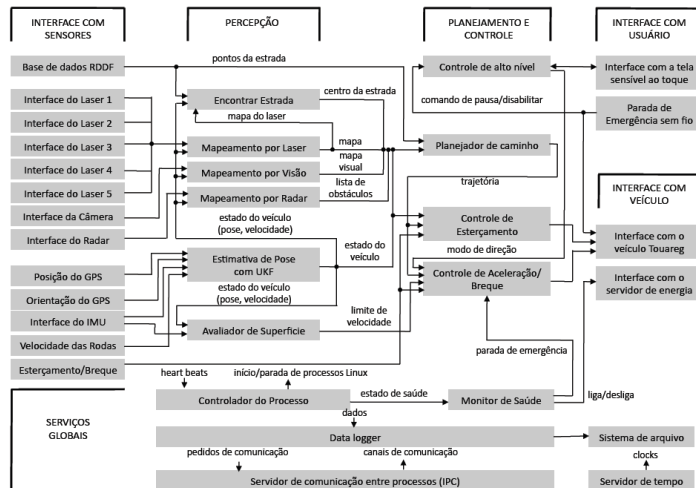
Mai 2010

Ohio State University at the 2004 DARPA Grand Challenge: Developing a Completely Autonomous Vehicle
 IEEE INTELLIGENT SYSTEMS – Sept./Oct. 2004

Arquiteturas de Controle Híbridas

➤ Autômato Finito / FSM – *Finite State Machine*

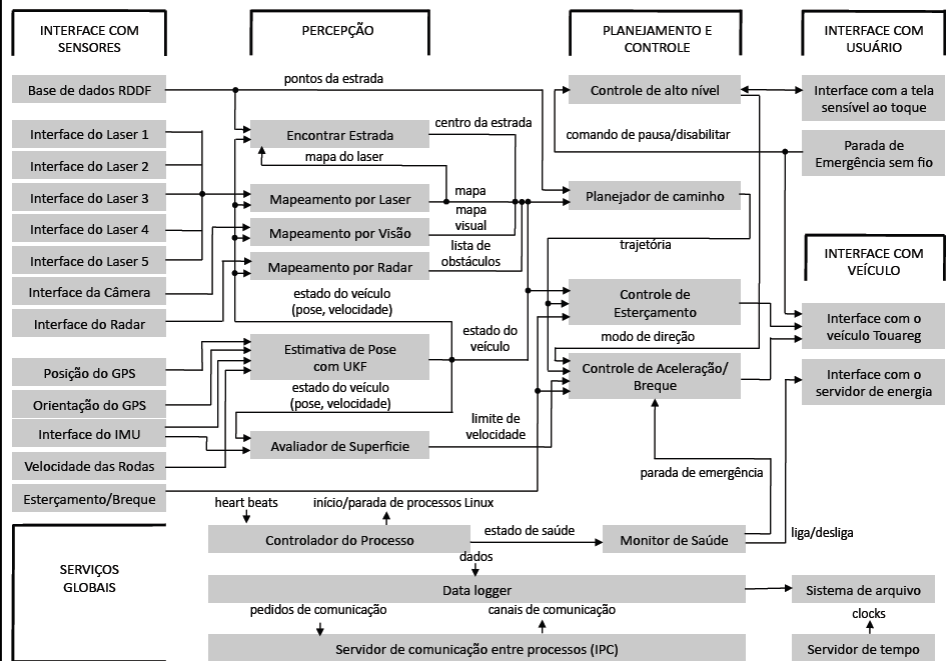
DARPA Challenge
 Stanley (Stanford)



59

Maio 2010

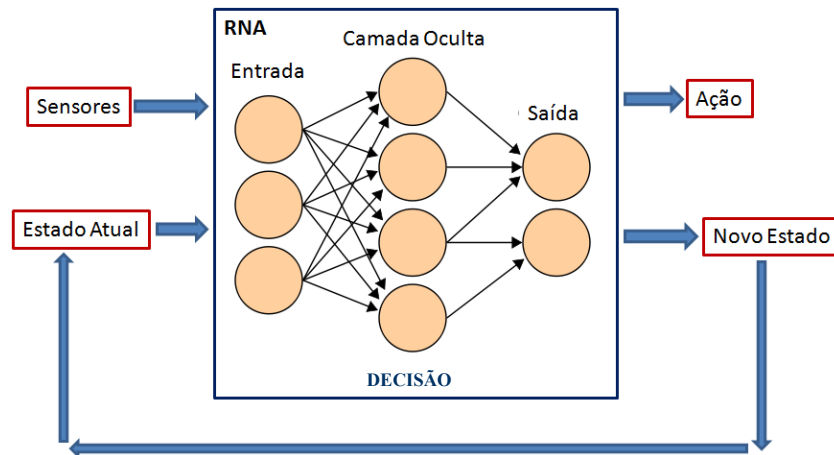
Arquiteturas de Controle Híbridas



Arquiteturas de Controle Híbridas

Arquiteturas Híbridas

Controle Híbrido: Arquitetura com Estados Internos (Autômato + Rede Neural)

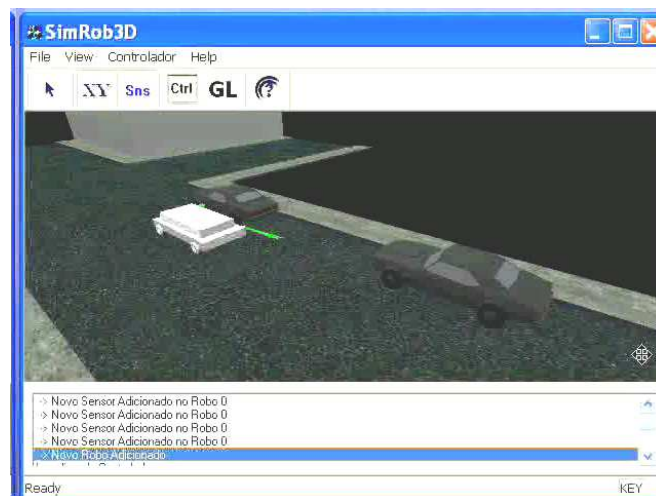


61
 Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

SEVA 3D – Sistema de Estacionamento de Veículos

Virtual Environment: 3D Realistic Environment

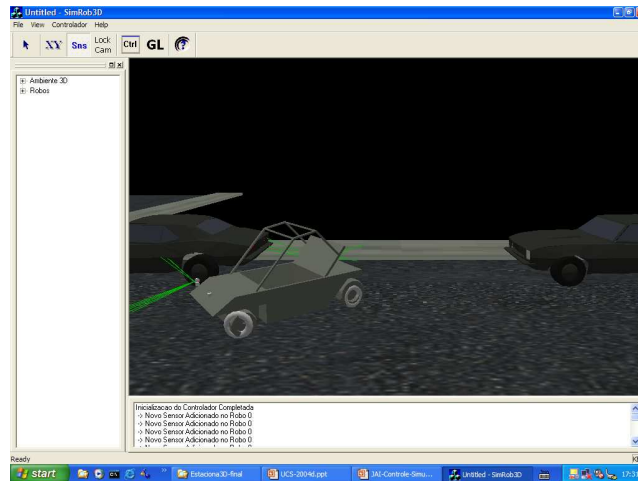


SEVA 3D
 Simulation
 Tool

62
 Abril 2010

Arquiteturas de Controle Híbridas

SEVA 3D – Sistema de Estacionamento de Veículos



SEVA 3D
Simulation
Tool

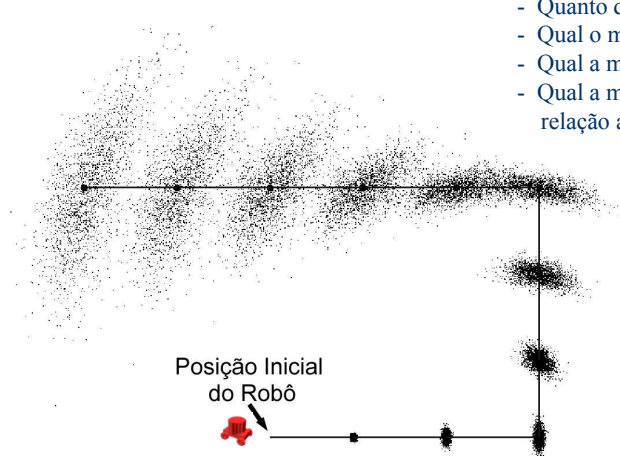
63

Abril 2010

Auto-Localização: O problema

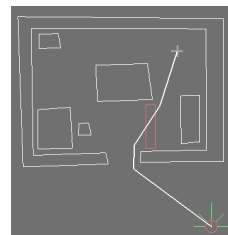
Localização do Robô:

Erro de Odometria...



Questões:

- Onde estou?
- Em que direção devo ir?
- Quanto devo avançar?
- Qual o meu destino?
- Qual a minha posição no mapa?
- Qual a minha posição em relação aos obstáculos do mapa?



64

Abril 2010

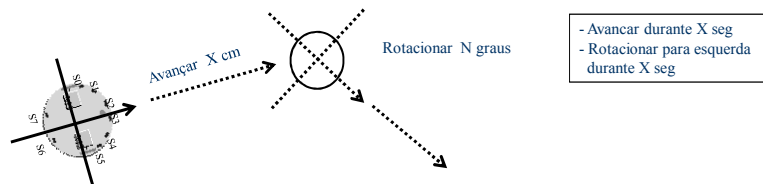
Localização: Estimativa

Dead Reckoning: Estimativa do deslocamento relativo

Implementando um Odômetro:

Através do acompanhamento dos comandos de avanço e giro, podemos estimar a posição do robô. Além disto, também é possível usar as informações provenientes de sensores como os encoders das rodas para estimar a posição.

Dead Reckoning: Localização baseada em odometria, onde estimamos a posição e orientação do robô através da integração no tempo dos diversos deslocamentos e rotações realizados pelo robô.

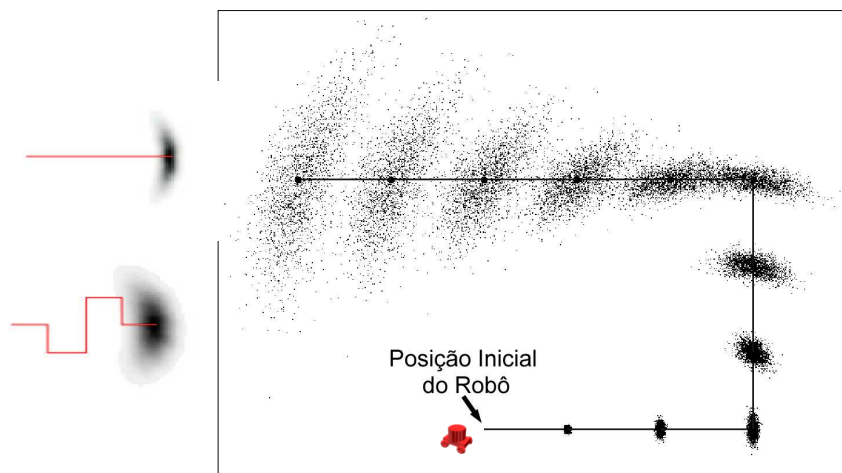


65

Maio 2010

Localização: Estimativa e Erro

Dead Reckoning: ERRO de Estimativa do deslocamento



66

Maio 2010

Localização: Marcadores de Posição

Marcadores de Posição: Pontos e Sinais de Referência

LandMarks: Pontos de Referência

Podemos inserir no ambiente marcações passivas que permitam que o robô determine sua posição aproximada.

Beacons: Sinais de Referência ou “faróis”

Podemos inserir no ambiente marcações ativas que permitam que o robô determine sua posição aproximada.

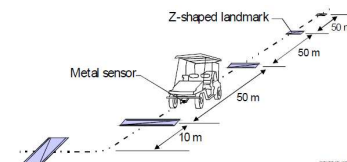


Figure 7.7: Komatsu's Z-shaped landmarks are located at 50-meter (164 ft) intervals along the planned path of the autonomous vehicle. (Courtesy of [Matsuda and Yoshikawa, 1989].)

Borenstein 1996

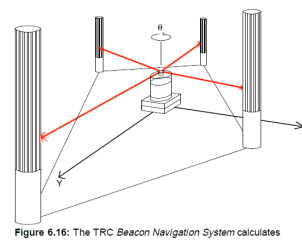


Figure 6.16: The TRC Beacon Navigation System calculates position and heading based on ranges and bearings to two of four passive beacons defining a quadrilateral operating area. (Courtesy of TRC.)

Borenstein 1996

67

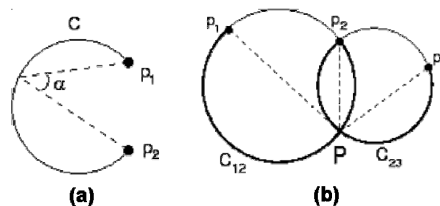
Maio 2010

Localização: Marcadores de Posição

Marcadores de Posição: Triangulação

Os métodos de triangulação para a localização de robôs móveis se baseiam nos métodos tradicionais da cartografia e navegação, que utilizam os ângulos observados entre pontos de referência do ambiente para calcular a posição relativa do observador.

Fica claro que com apenas o ângulo entre 2 pontos de referência, a posição do observador é delimitada pelo arco de um círculo. No caso com 3 pontos de referência, a localização do observador se encontra em um único ponto, que é a intersecção entre dois círculos, desde que os pontos de referência não sejam coincidentes.



Ângulo: 2, 3 ou mais marcas
Distância das Marcações

68

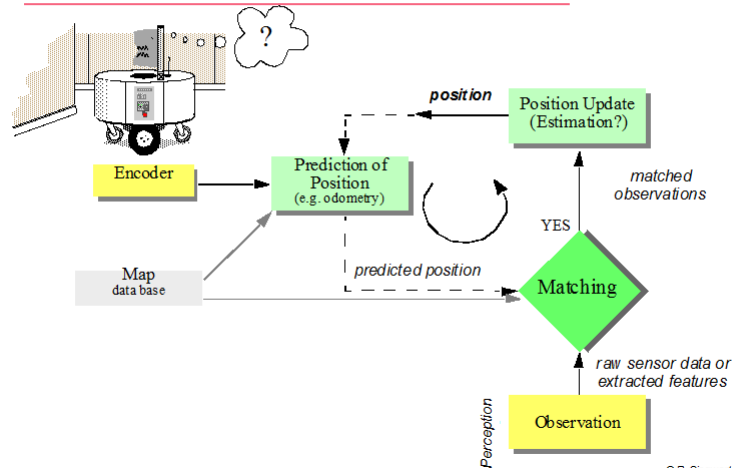
Maio 2010

Métodos de Auto-Localização

Autonomous Mobile Robots, Chapter 5

5.1

Localization, Where am I?



69

Maio 2010

© R. Siegwart, I. Nourbakhsh

1

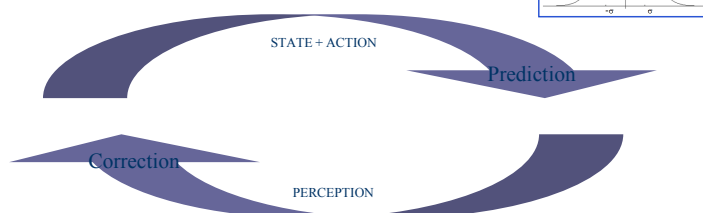
Métodos de Auto-Localização

Localização baseada no **Filtro de Kalman**

Este método aplica uma técnica de filtragem usando o filtro de Kalman para, uma vez conhecida a localização corrente aproximada do robô, estimar a sua próxima localização, considerando seu deslocamento e usando as informações imprecisas obtidas pelos seus sensores

Localização: Posição Estimada + Dead-Reackoning + Sensorial

The Prediction-Correction-Cycle



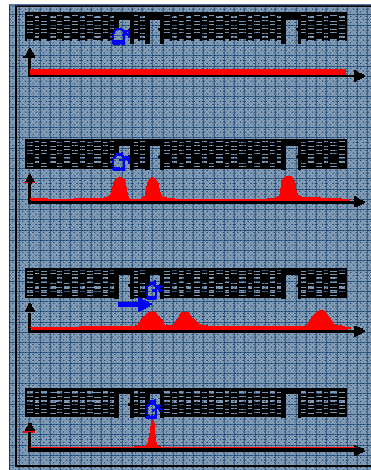
70

Maio 2010

Métodos de Auto-Localização

Localização baseada em Modelos de Markov

- * Concept – to compute a probability distribution over all possible locations in a particular environment
- * Addresses the problem of state estimation from sensor data
- * Can be used to solve the localization problem in both the single and multi-robot scenarios

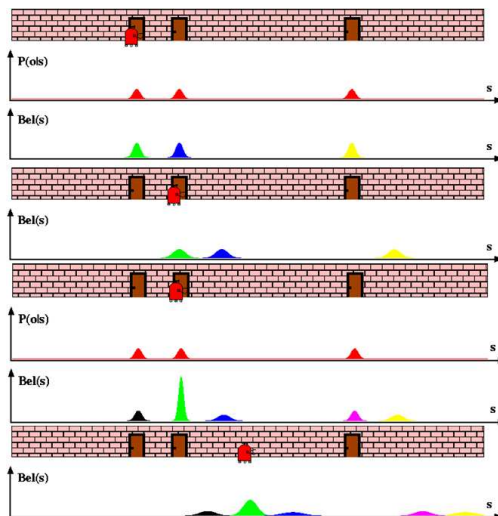


71

Maio 2010

Métodos de Auto-Localização

Localização baseada em Modelos de Markov



The 1D case

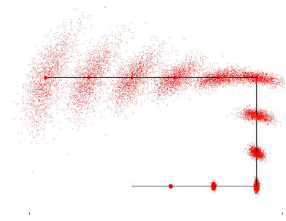
1. Start
 - No knowledge at start, thus we have an uniform probability distribution.
2. Robot perceives first door
 - Seeing only one door, the probability being at door 1, 2 or 3 is equal.
3. Robot moves
 - Action model enables to estimate the new probability distribution based on the previous one and the motion.
4. Robot perceives second door
 - Base on all prior knowledge the probability being at door 2 becomes dominant

72

Maio 2010

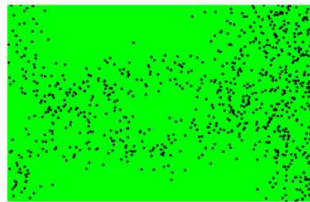
Métodos de Auto-Localização

Localização baseada em Técnicas de Monte Carlo

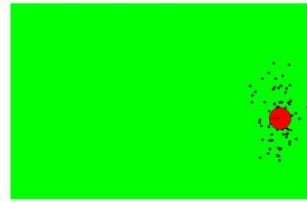


MCL - Monte Carlo Localization Method

- Particles: Position/Orientation (pose) estimation ;
- Dead-reckoning: Estimate new position after move;
- Particle filter: Use sensorial information to select the “best particles” (most probable / correct poses);
- Particle resampling: Generate new particles centered around the “best particle”.



Weighted samples



After resampling

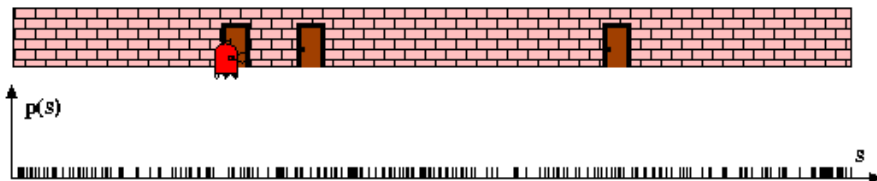
73

Maio 2010

Métodos de Auto-Localização

Localização baseada em Técnicas de Monte Carlo

Particles: Uniform probability distribution along ALL the possible robot positions



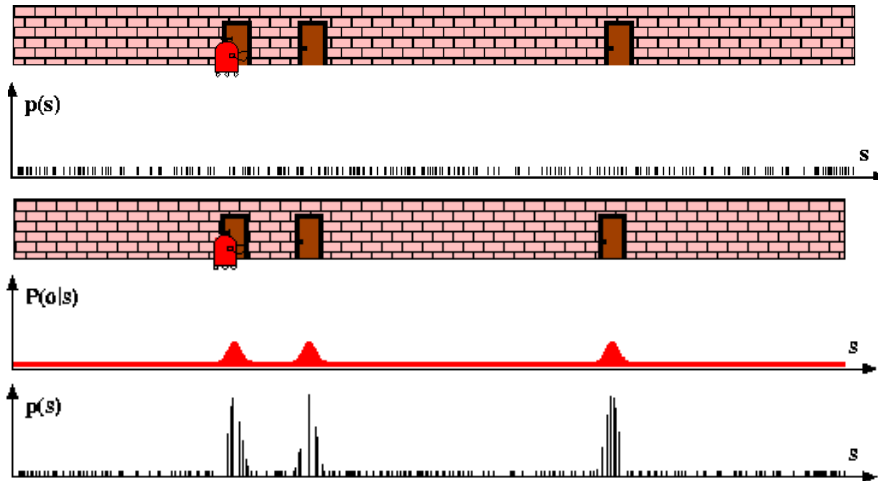
- Book: Probabilistic Robotics
- Authors:
 - Sebastian Thrun
 - Wolfram Burgard
 - Dieter Fox
- Publisher:
 - MIT Press, 2005.
- Web site for the book & more slides:
<http://www.probablistic-robotics.org/>

74

Maio 2010

Métodos de Auto-Localização

Localização baseada em Técnicas de Monte Carlo



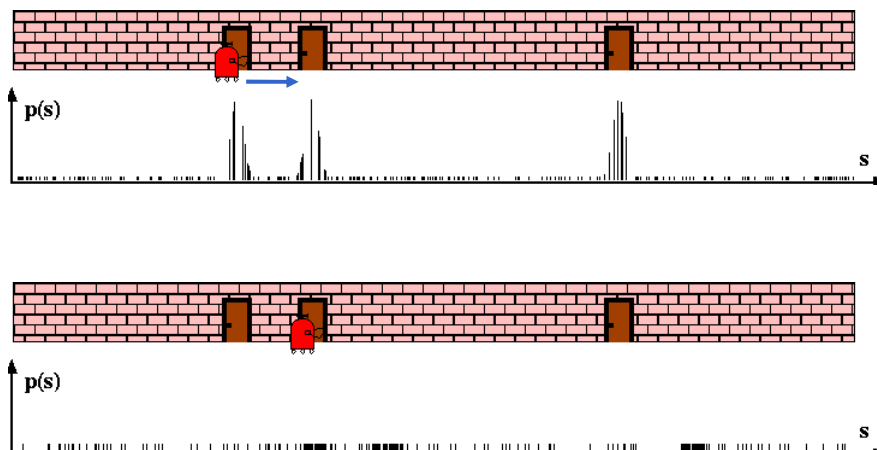
Particles: Sensor Information => Importance Sampling

75

Maio 2010

Métodos de Auto-Localização

Localização baseada em Técnicas de Monte Carlo



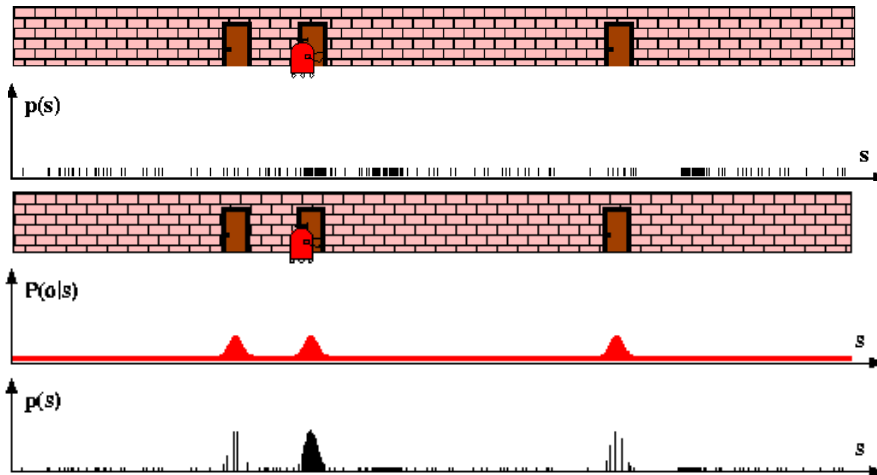
Particles: Robot Motion

76

Maio 2010

Métodos de Auto-Localização

Localização baseada em Técnicas de Monte Carlo



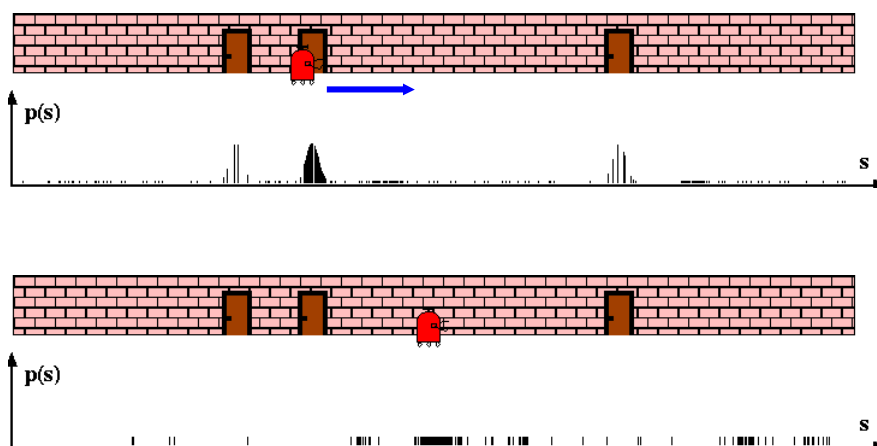
Particles: Sensor Information $\Rightarrow$ Importance Sampling

77

Maio 2010

Métodos de Auto-Localização

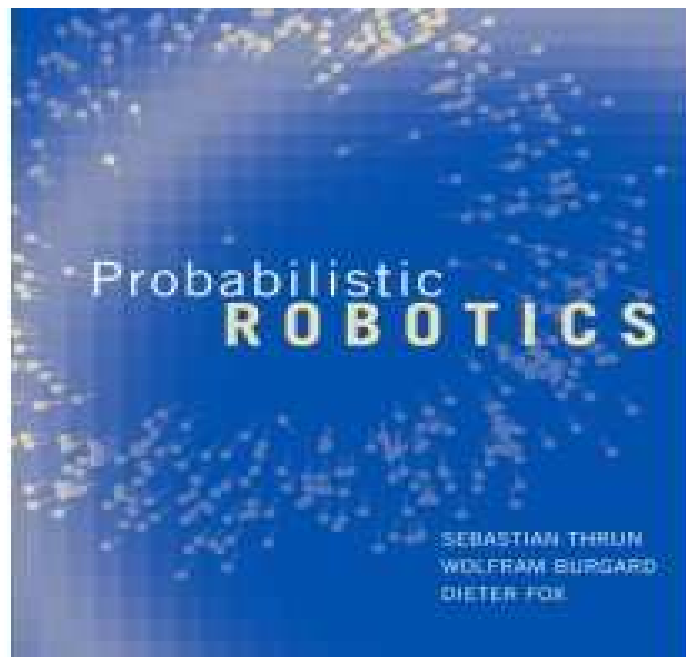
Localização baseada em Técnicas de Monte Carlo



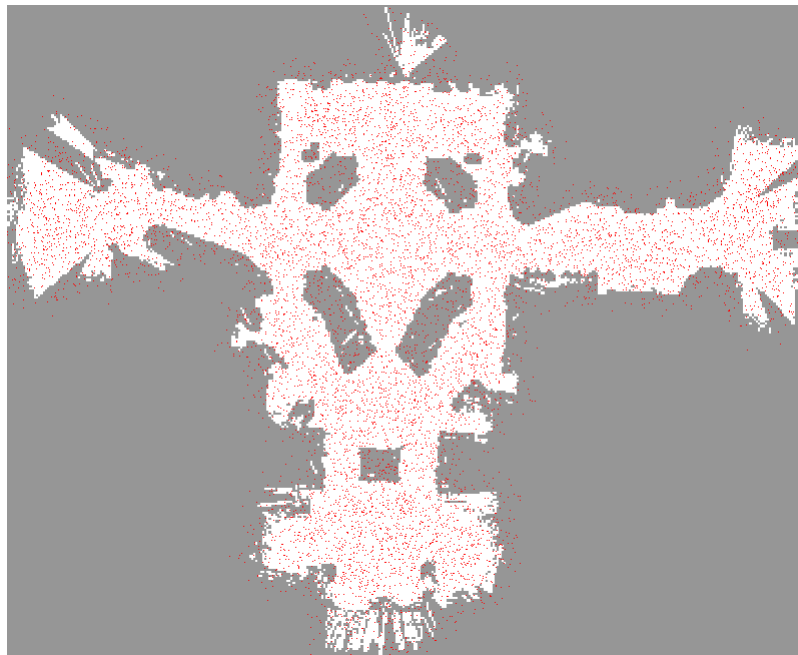
Particles: Robot Motion

78

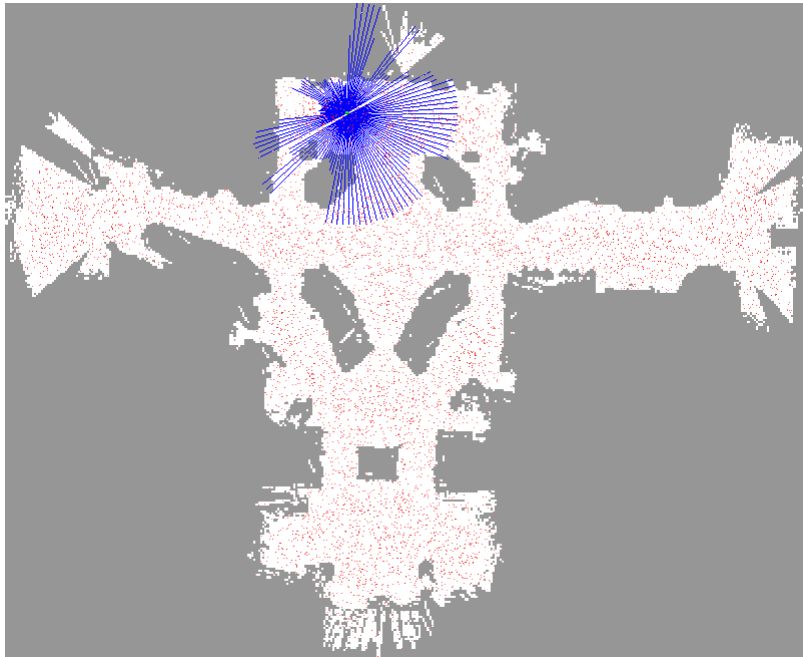
Maio 2010



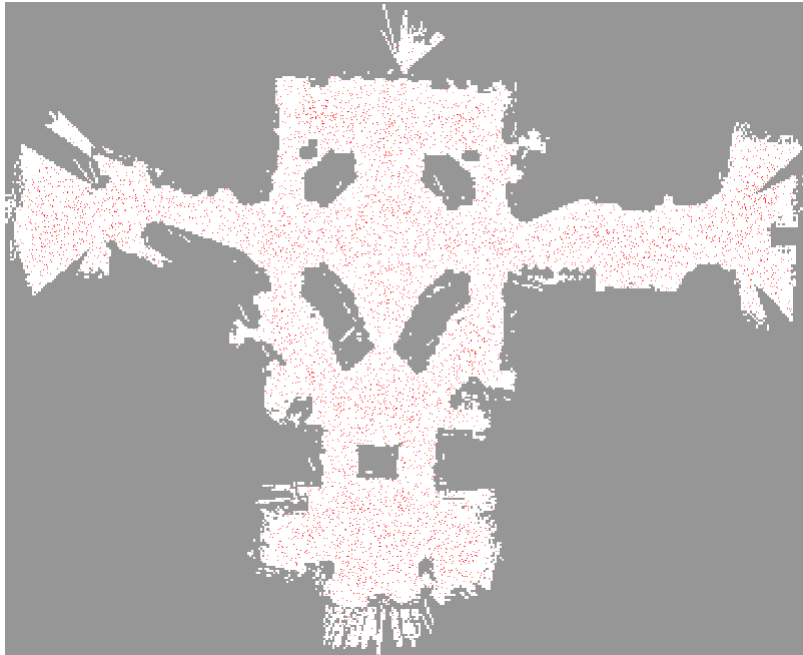
79



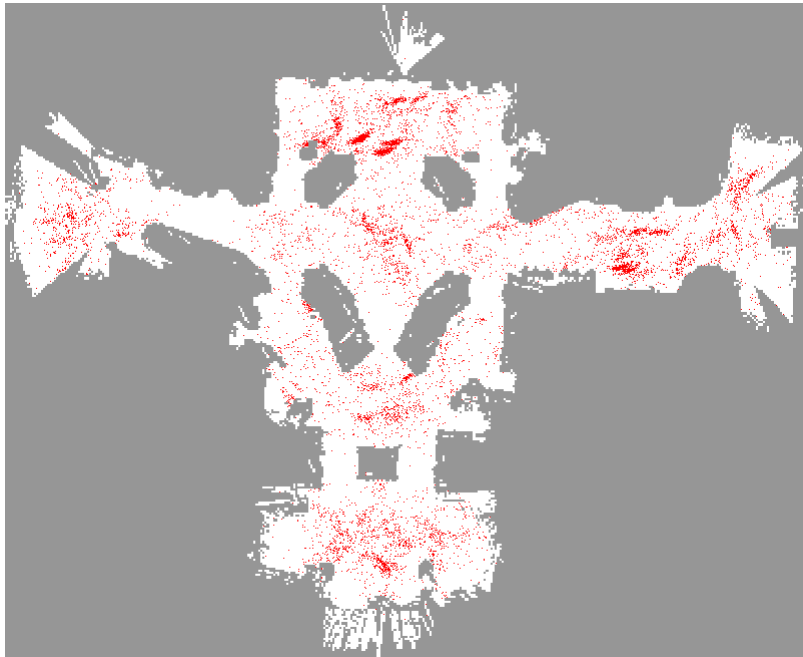
80



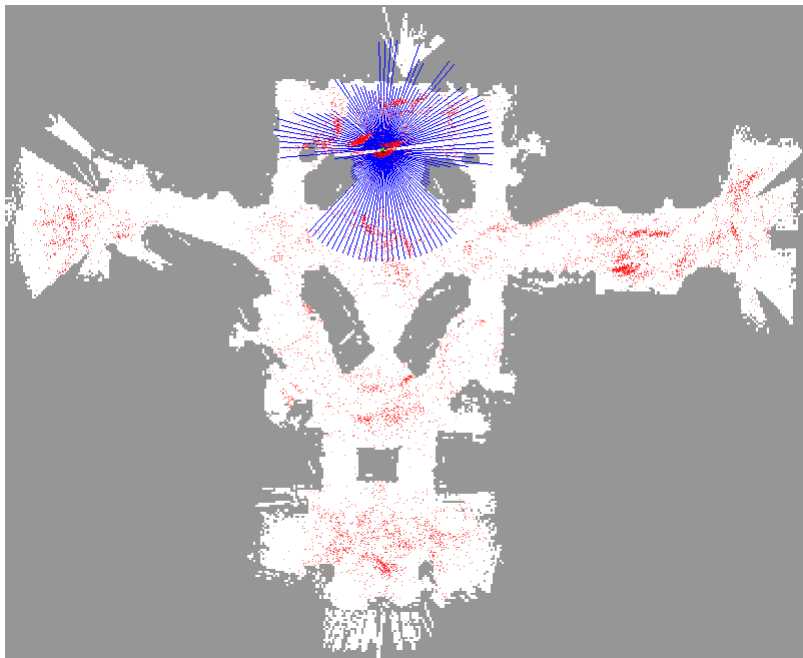
81



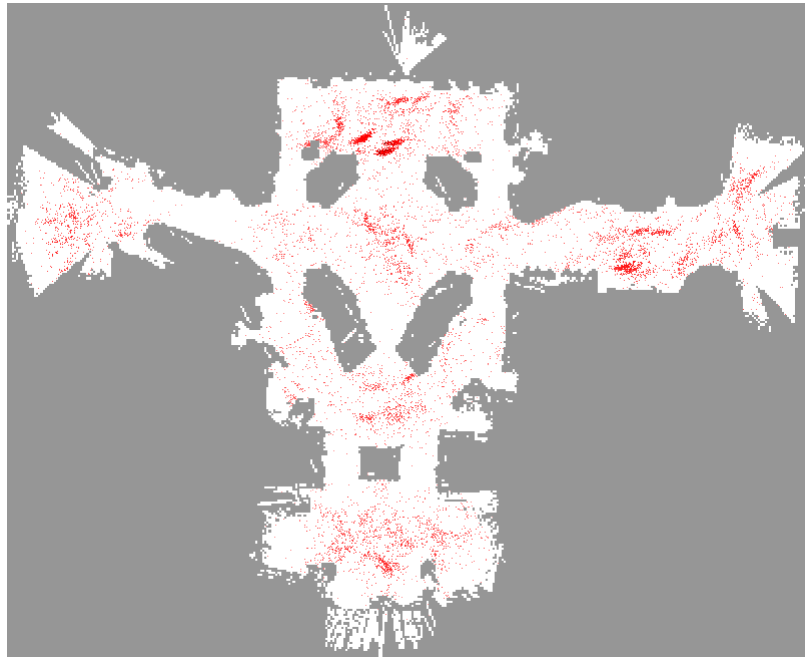
82



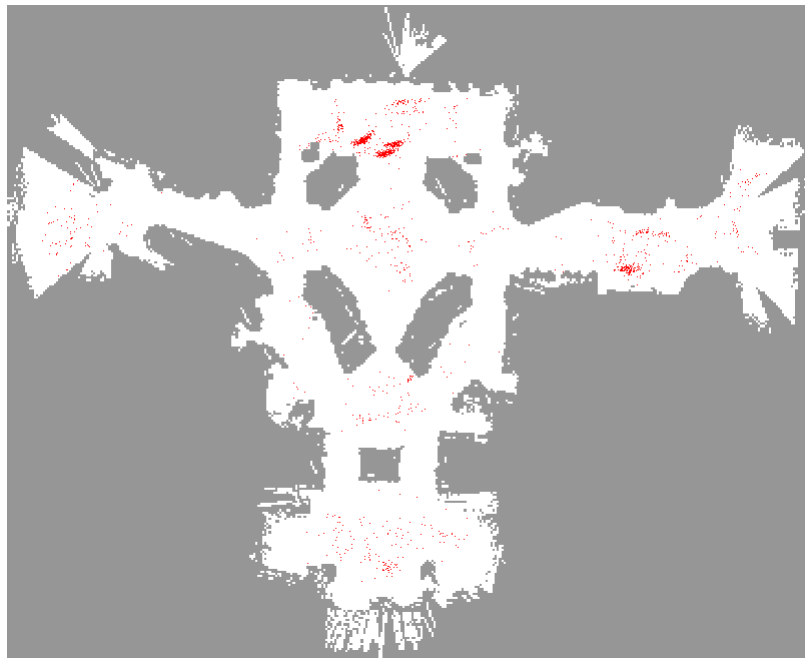
83



84



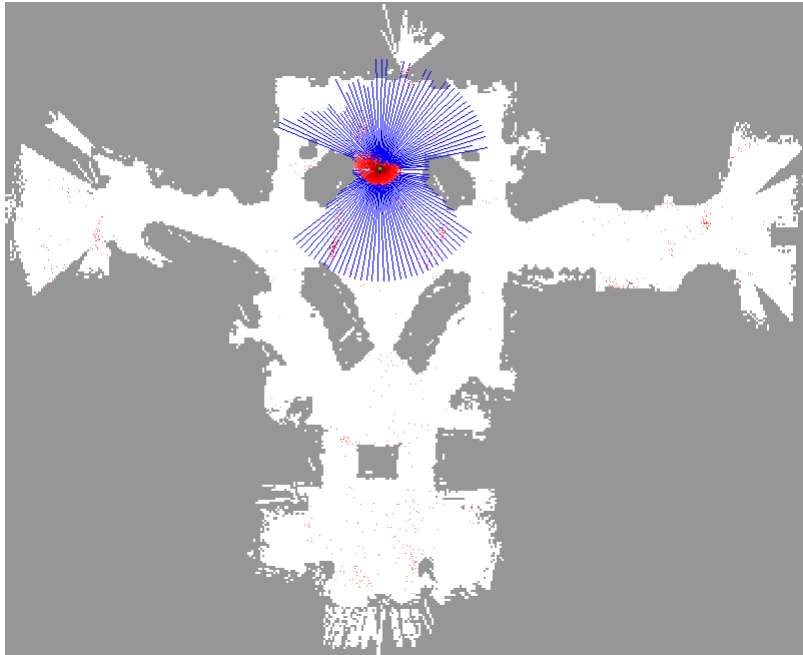
85



86



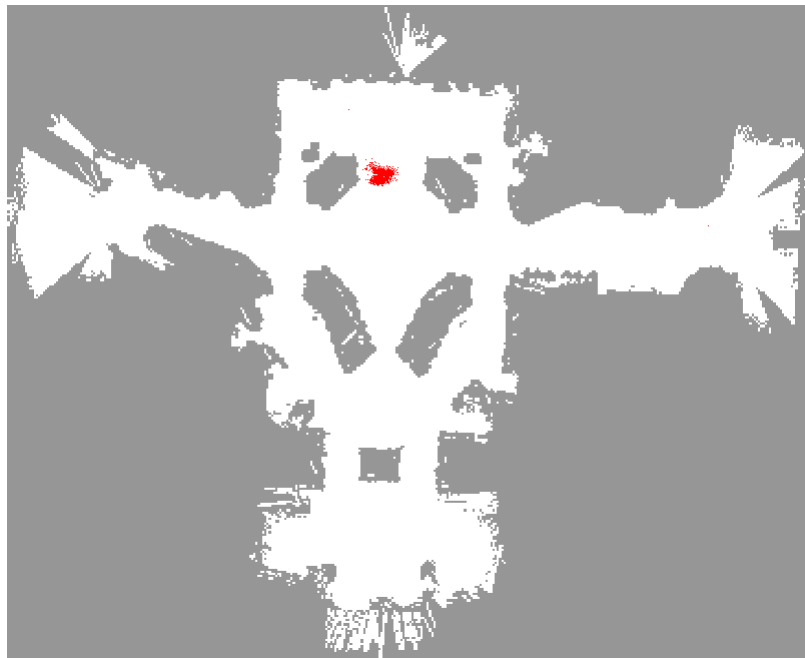
87



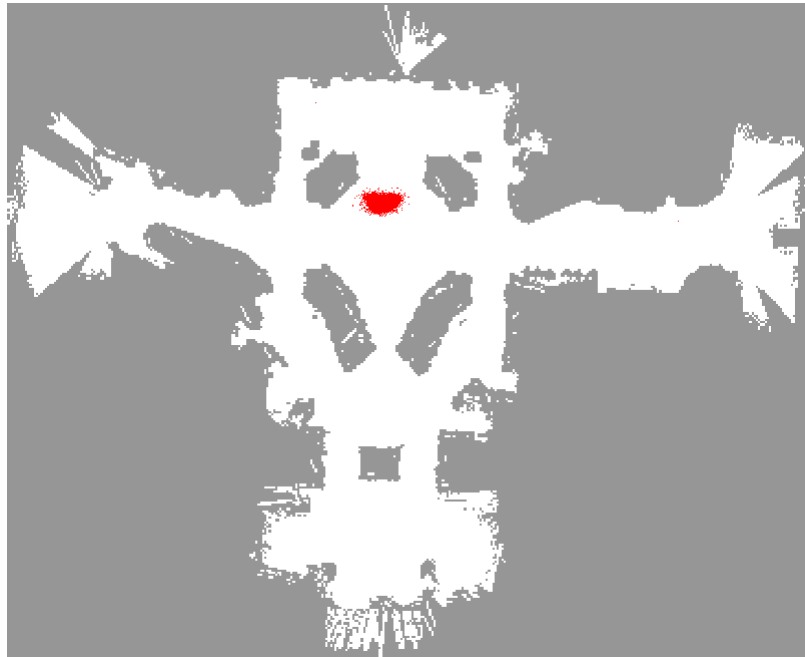
88



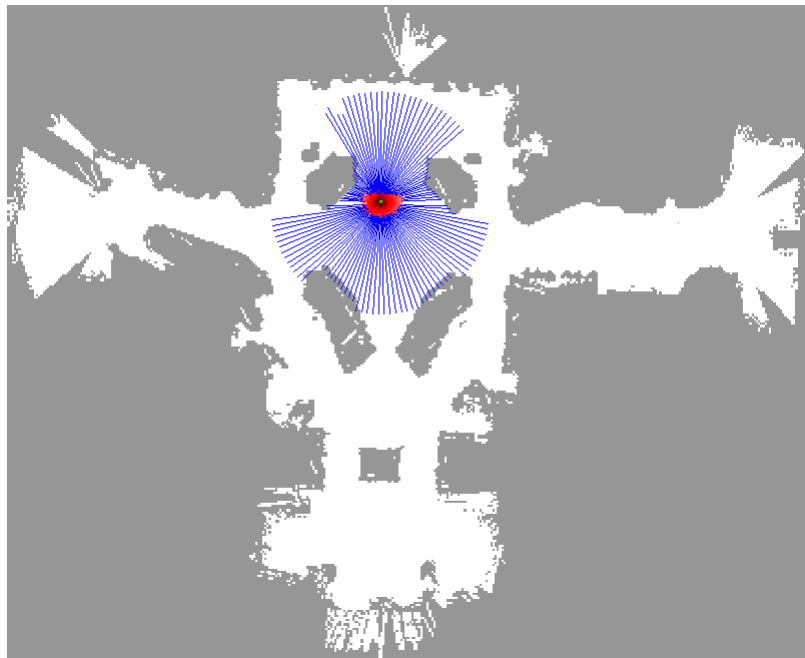
89



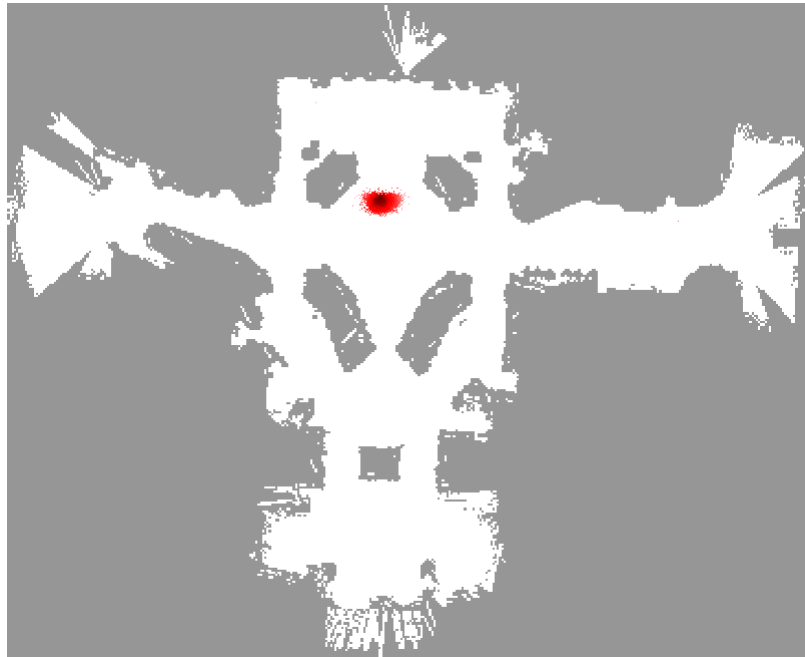
90



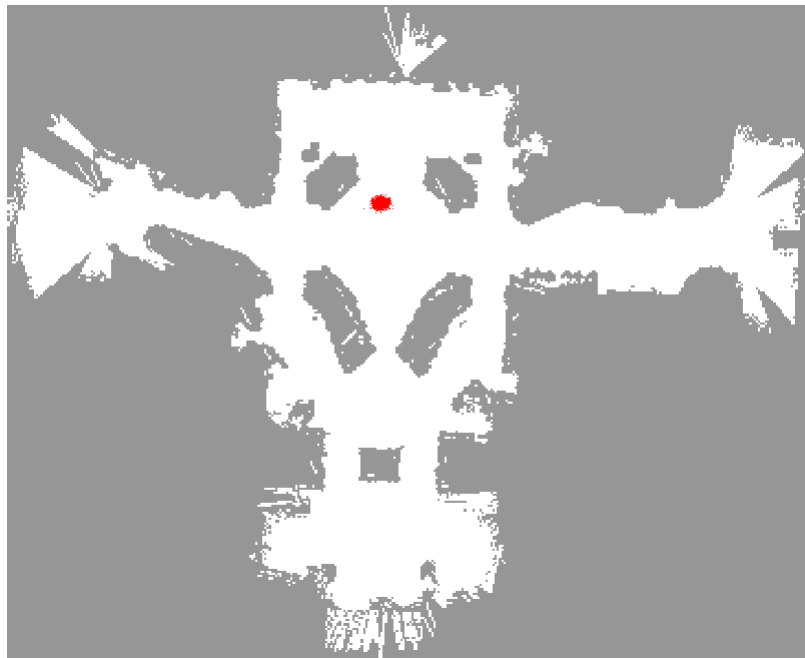
91



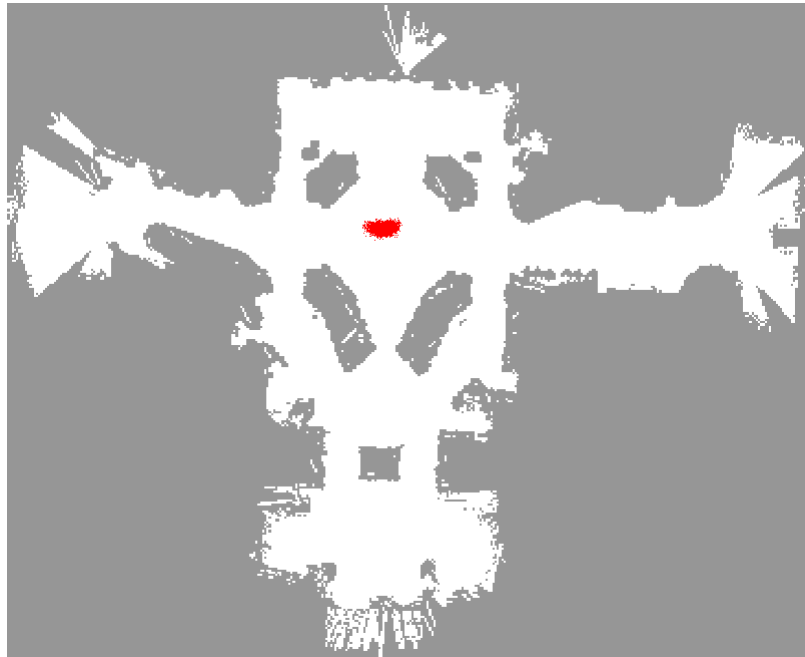
92



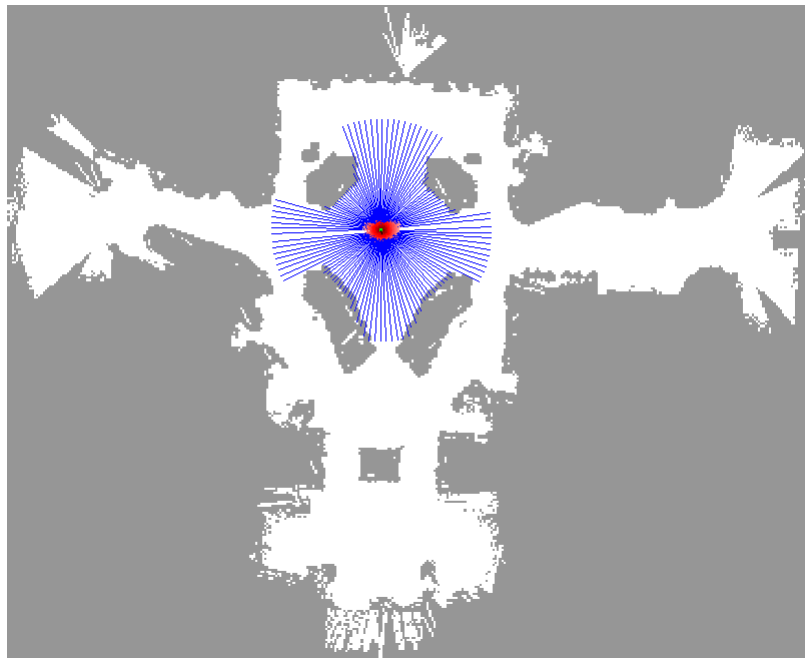
93



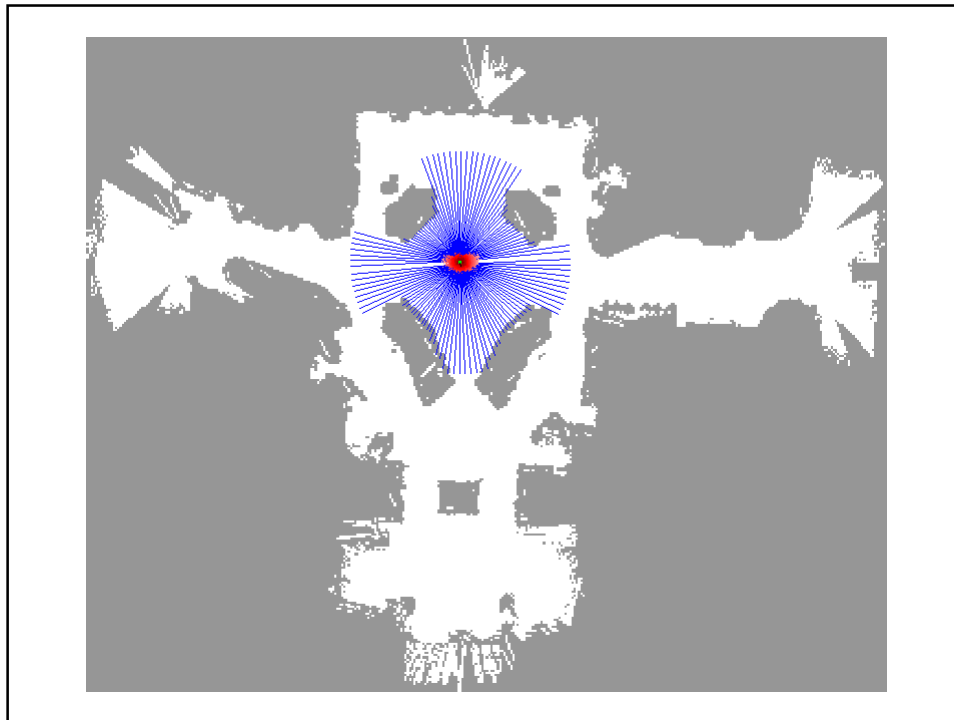
94



95



96



USP – ICMC – SSC5888 - Turma 2011/1
 Robôs Móveis Autônomos (PG_CCMC)
 Prof. Fernando Osório

Métodos de Auto-Localização

a) Continuous map
with *single hypothesis*

b) Continuous map
with *multiple hypothesis*

c) Discretized map
with probability distribution

d) Discretized topological
map with probability
distribution

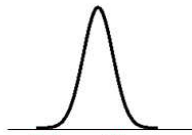
98

Maio 2010

node
of topological map

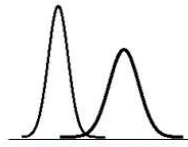
Métodos de Auto-Localização

What is the Right Representation?



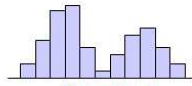
Kalman filter

[Schiele et al. 94], [Weiß et al. 94], [Borenstein 96],
[Gutmann et al. 96, 98], [Arras 98]



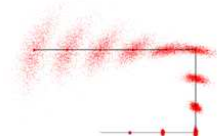
Multi-hypothesis

[Weckesser et al. 98], [Jensfelt et al. 99]



Histograms
(metric, topological)

[Nourbakhsh et al. 95], [Simmons et al. 95], [Kaelbling et al. 96],
[Burgard et al. 96], [Konolige et al. 99]



Particles

[Kanazawa et al. 95] [de Freitas 98]
[Isard/Blake 98] [Doucet 98]

Localização

Métodos de Localização:

- ⇒ Localização baseada no Filtro de Kalman (KF, EKF, UKF)
- ⇒ Localização baseada em Modelos de Markov
- ⇒ Localização baseada em Filtro de Partículas (MCL – Monte Carlo)

SLAM:

- ⇒ Simultaneous Localization and Mapping

Planejamento & Navegação

Planejamento:

- ⇒ Espaço de Configuração + Grafo de Visibilidade + Dijkstra
- ⇒ A Star (A*), D Star (D*)
- ⇒ RRT: Rapidly-exploring Random Trees
- ⇒ Genetic Algorithms Path Planning

Navegação:

- ⇒ Campos Potenciais
- ⇒ VFH: Vector Field Histogram
- ⇒ Redes Neurais Artificiais
- ⇒ Regras de Desvio (Otimização por Algoritmo Genético)
- ⇒ Seguimento de Trajetória:
Way-Points, Ajuste de Trajetória baseado em Referência

Planejamento & Navegação

Navegação:

http://en.wikipedia.org/wiki/Motion_planning

- ⇒ Campos Potenciais (Potential Fields, Vector Fields)
- ⇒ VFH: Vector Field Histogram
<http://en.wikipedia.org/wiki/VFH>
- ⇒ Redes Neurais Artificiais
Robombeiros [Gustavo Pessin]
- ⇒ Regras de Desvio (Otimização por Algoritmo Genético)
- ⇒ Seguimento de Trajetória:
Way-Points, Ajuste de Trajetória baseado em Referência



INFORMAÇÕES SOBRE A DISCIPLINA

USP - Universidade de São Paulo - São Carlos, SP
ICMC - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
SSC – Depto. de Sistemas de Computação / Grupo SEER
LRM – Lab. de Robótica Móvel: <http://www.lrm.icmc.usp.br/>

Prof. Fernando Santos OSÓRIO

Web institucional: <Http://www.icmc.usp.br/ssc/>

Página pessoal: <Http://www.icmc.usp.br/~fosorio/>

E-mail: [fosorio \[at\] icmc. usp. br](mailto:fosorio@icmc.usp.br) ou [fosorio \[at\] gmail. com](mailto:fosorio@gmail.com)

Disciplina de Robôs Móveis Autônomos (PG-CCMC)

Web Disciplinas: <Http://www.icmc.usp.br/~fosorio/>

- **Programa, Material de Aulas, Critérios de Avaliação,**
- **Material de Apoio, Trabalhos Práticos**
- **Wiki ICMC: <Http://wiki.icmc.usp.br> SSC5888**