

**USP - ICMC - SSC – Pós-Grad. CCMC  
SSC 5888 (RMA) - 1o. Semestre 2009**

**Disciplina de  
Robôs Móveis Autônomos  
SSC-5888**

**Prof. Fernando Santos Osório**  
**Email: fosorio [at] { icmc. usp. br , gmail. com }**  
**Web: <http://www.icmc.usp.br/~fosorio/>**

**Agenda:**

**Robôs Móveis e o uso de Mapas:**

**1. Planejamento de Trajetórias**

**Mapas Topológicos: Hierárquicos e Grafos**

**Mapas Geométricos: Grafo de visibilidade, Dijkstra**

**Mapas de Ocupação: A Star (A\*)**

**2. Navegação com desvio de obstáculos**

**Navegação Local x Navegação Global**

**Navegação por Referências: Direções, Landmarks, WayPoints**

**Campos Potenciais, VFF, VFH (Vector Force Fields/Histograms)**

**Aprendizado de Máquina: Evitando Obstáculos**

**Arbitragem de Comandos e Sistemas Híbridos de Navegação**

**3. Problemas e Desafios**

## Planejamento de Trajetórias

### Pré-Planejamento: Controle Deliberativo

Planejamento na I.A. Clássica:

*Planning and Scheduling [MacMillan Dict.]*

#### Planning

“The process of deciding how you will do something before you do it.”

#### Scheduling

“To plan for something to happen at a particular time”

Planejar:

- Partindo de um estado inicial, planejar uma seqüência de ações, de tal modo que possamos ir passando de um estado a outro, até atingir um estado desejado.

## Planejamento de Trajetórias

### Pré-Planejamento: Controle Deliberativo

Planejamento na I.A. Clássica:

*Planning and Scheduling [MacMillan Dict.]*

#### Planning

“The process of deciding

In known environments with available models  
planning can be done **offline**.  
Solutions can be found and evaluated  
**prior to execution.**

#### Scheduling

“To plan for something

In dynamically unknown environments  
the strategy often needs to be revised **online**.

Planejar:

- Partindo de um estado inicial, planejar uma seqüência de ações, de tal modo que possamos ir passando de um estado a outro, até atingir um estado desejado.

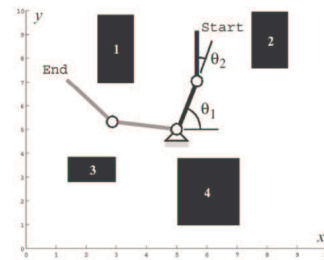
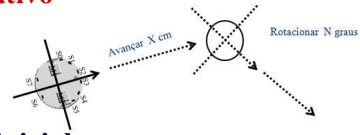
Espaço de Estados: Estado => Ação => Estado  
Estratégia de busca de soluções em espaços de estados  
Seqüenciamento de Ações (Pesquisa Operacional)

## Planejamento de Trajetórias

### Pré-Planejamento: Controle Deliberativo

#### Planejamento na I.A. Clássica:

Se for possível identificar um estado inicial e garantir uma seqüência de ações que me levam de um estado a outro até um estado final conhecido...



#### Planejamento – “Malha Aberta”

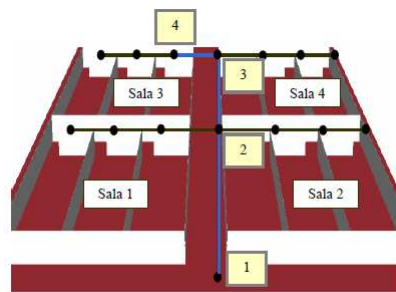
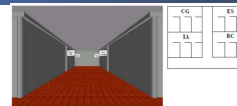
#### Script de Ações. Exemplo:

Frente (100cm), GiraEsq (90°), Frente (500cm), GiraDir(45°)

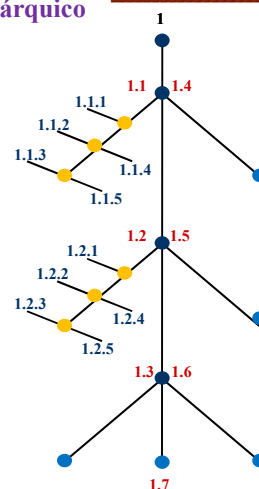
## Planejamento de Trajetórias

### Planejamento: Usando o Mapa Topológico

#### Planejamento em um mapa topológico hierárquico



Mapa topológico do ambiente.



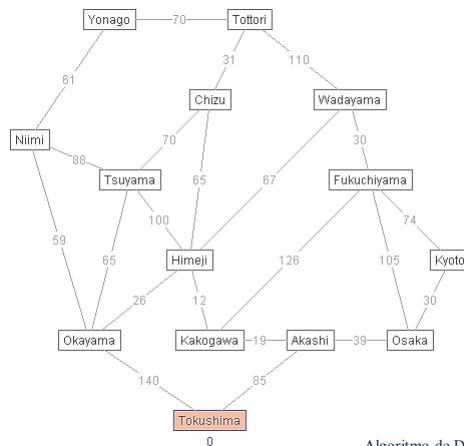
Planos:

- Ir de 1 até 1.2.5
- Ir de 1.1.2 até 1.3: 1.1.2 → 1.1 → 1.2 → 1.3

## Planejamento de Trajetórias

### Planejamento: Usando o Mapa Topológico

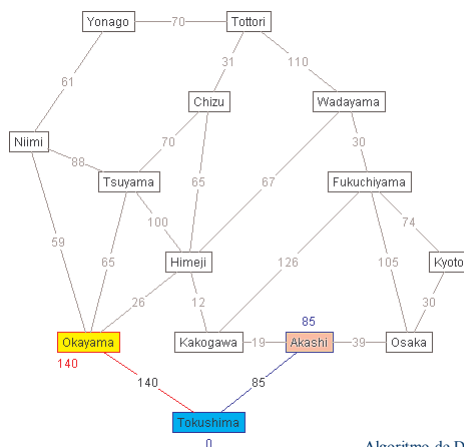
#### Planejamento em um mapa topológico do tipo grafo



## Planejamento de Trajetórias

### Planejamento: Usando o Mapa Topológico

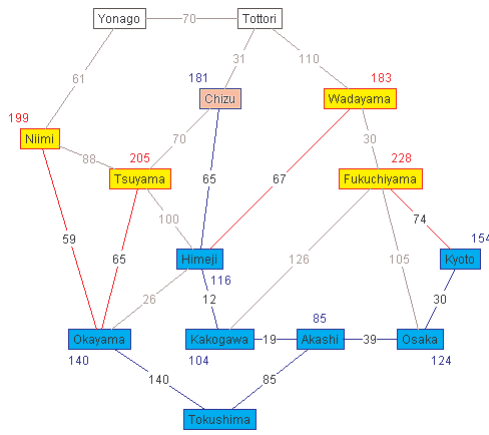
#### Planejamento em um mapa topológico do tipo grafo



## Planejamento de Trajetórias

### Planejamento: Usando o Mapa Topológico

#### Planejamento em um mapa topológico do tipo grafo



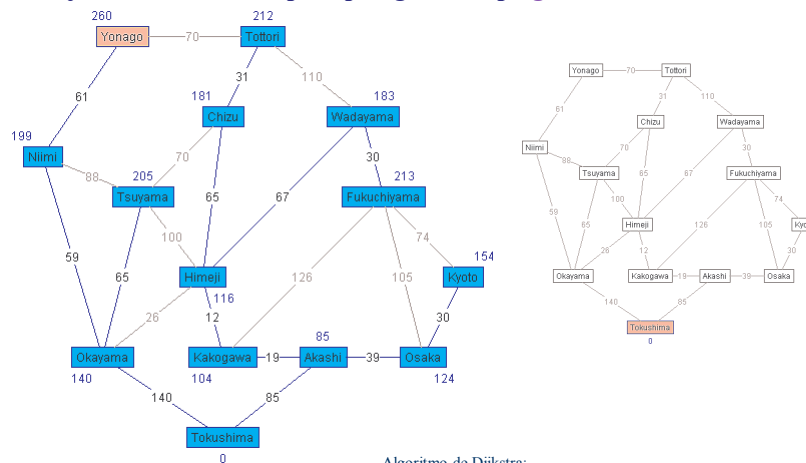
9  
 Maio 2009

Algoritmo de Dijkstra:  
<http://www-b2.is.tokushima-u.ac.jp/~iked/suuri/dijkstra/Dijkstra.shtml>

## Planejamento de Trajetórias

### Planejamento: Usando o Mapa Topológico

#### Planejamento em um mapa topológico do tipo grafo



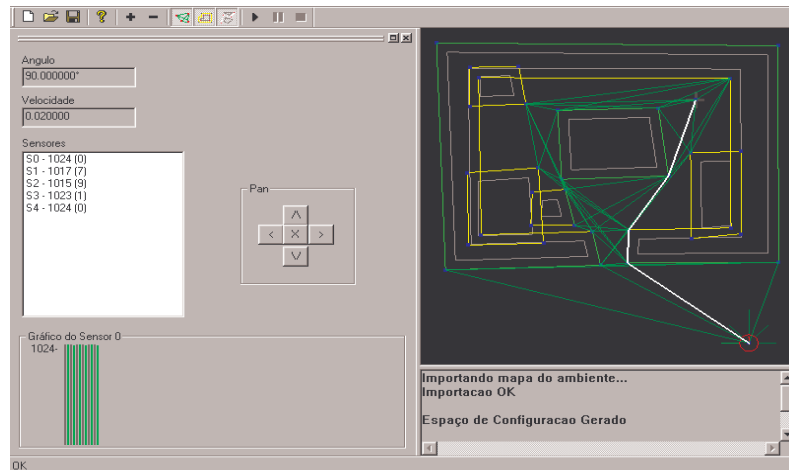
10  
 Maio 2009

Algoritmo de Dijkstra:  
<http://www-b2.is.tokushima-u.ac.jp/~iked/suuri/dijkstra/Dijkstra.shtml>

## Planejamento de Trajetórias

### Planejamento: Usando o Mapa Geométrico

#### Planejamento em um mapa geométrico: Grafo de visibilidade + Dijkstra



11

Maio 2009

## Planejamento de Trajetórias

### Planejamento: Usando o Mapa Geométrico

#### Planejamento em um mapa geométrico: Grafo + A\*

O algoritmo percorre vários caminhos do nodo inicial até o nodo de destino.

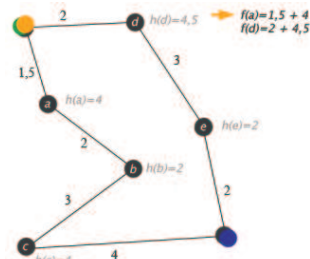
Para cada nodo que é explorado, são guardados 3 valores:

**g(x):** O custo do menor caminho até o nodo atual (percorrido)

**h(x):** O custo estimado (ou heurística) até o destino (estimado)

**f(x):**  $g(x) + h(x)$  ::  $g(x)$  = contabiliza quanto já foi percorrido

$h(x)$  = estima quanto ainda falta percorrer



- Explora possibilidades
- Se arrepende se o custo ficar alto demais
- Busca o caminho de menor custo

#### Graph search algorithms and Tree search algorithms

##### Search

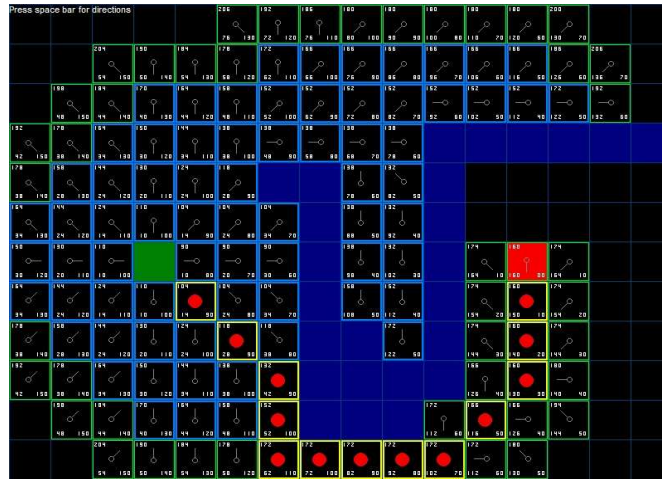
- Alpha-beta pruning
- A\*
- B\*
- Beam search
- Bellman-Ford algorithm
- Best-first search
- Bidirectional search
- Breadth-first search
- D\*
- Depth-first search
- Depth-limited search
- Dijkstra's algorithm
- Floyd-Warshall algorithm
- Hill climbing

12

Maio 2009

### Planejamento: Usando o Mapa de Ocupação

#### Planejamento em um Grid: Uso do A\*

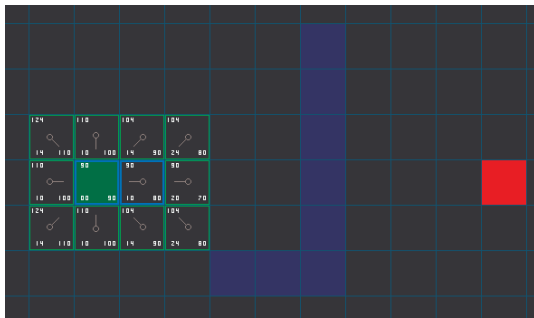
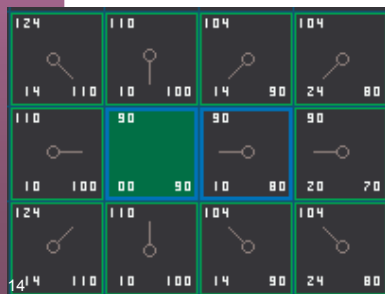
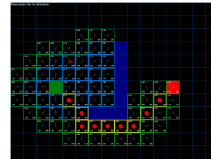


### A\* Search: [Tutorial *SBGames07*]

#### Busca Heurística de Caminhos

Custo de um Caminho

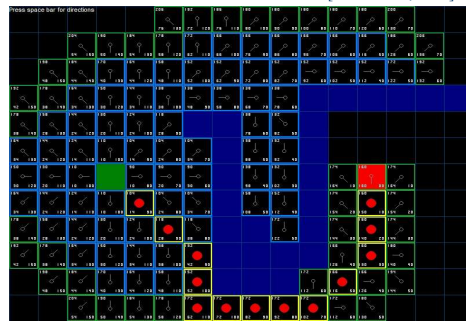
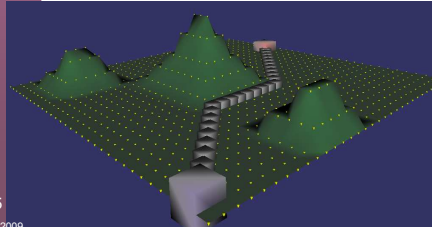
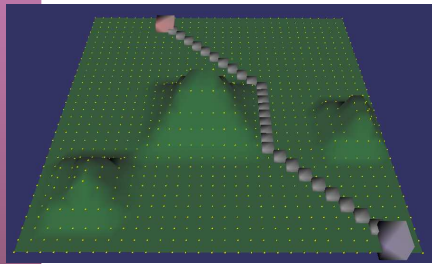
$$F(x) = G(x) + H(x) \quad \dots \quad G = \text{Percorrido}, H = \text{Estimado}$$



## Planejamento de Trajetórias

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

[Lester 2004, 2007]



15

Maio 2009

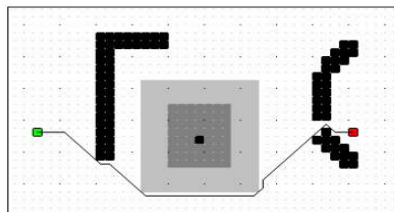
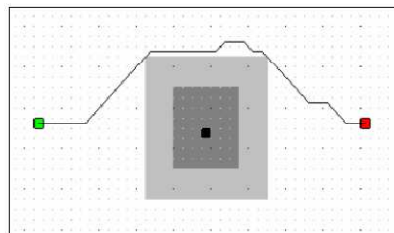
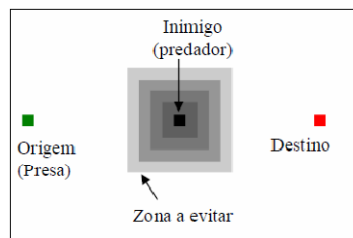
## Planejamento de Trajetórias

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

MAPA: Custo do Terreno a ser Atravessado

Custo de um Caminho

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



16

Maio 2009



## Planejamento de Trajetórias

### Planejamento: Usando o Mapa de Ocupação

#### Planejamento em um Grid: Uso do D\*

The D\* algorithm (Dynamic A\*) plans optimal traverses in real-time by incrementally repairing paths to the robot's state as new information is discovered.

It is widely used in vehicle navigation applications.

In several navigation and exploration applications, the environment is not known prior to pathfinding.

A\* needs to know the MAP to (pre)plan. D\* is an incremental algorithm.

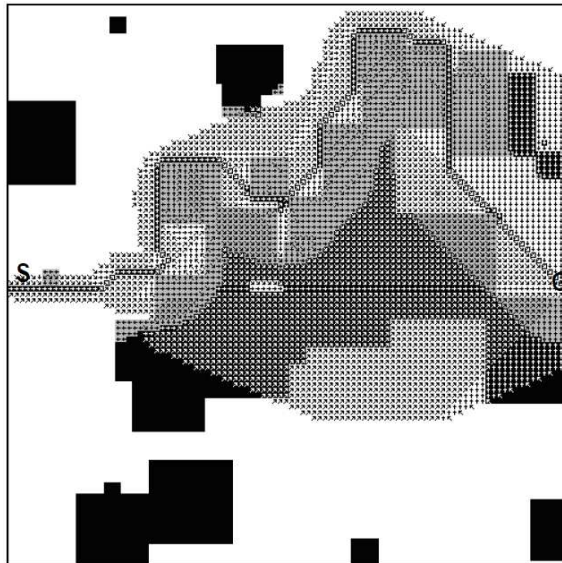
Reference: *The Focussed D\* Algorithm for Real-Time Replanning*

*Anthony Stentz - Robotics Institute - Carnegie Mellon University, 1995*

## Planejamento de Trajetórias

### Planejamento: Usando o Mapa de Ocupação

#### Planejamento em um Grid: Uso do D\* [Stentz 95]



Focussed D\* Algorithm

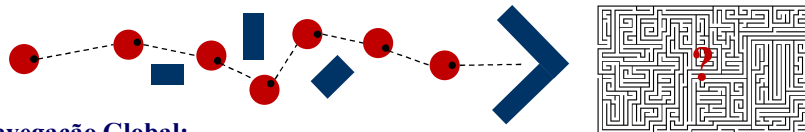
## Navegação com desvio de obstáculos

### Navegação: Global versus Local

#### Navegação Local:

Desvio de Obstáculos pode ser reativo

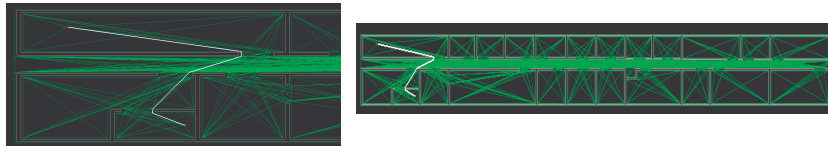
Problema: Pode ficar bloqueado em um mínimo local



#### Navegação Global:

Desvio de obstáculos é planejado com uso de mapa

Problema: Alto custo computacional, Uso de um Mapa



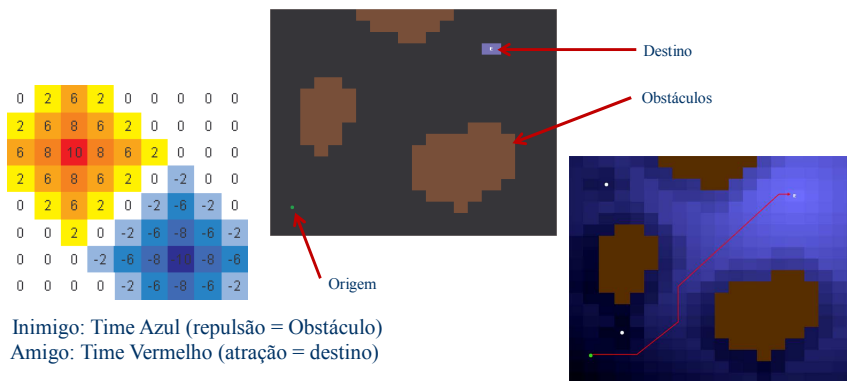
19

Maio 2009

## Navegação com desvio de obstáculos

### Navegação: Campos Potenciais

Campos Potenciais permitem o desvio de obstáculos (repulsão) ao mesmo tempo que se direciona para o alvo (atração)



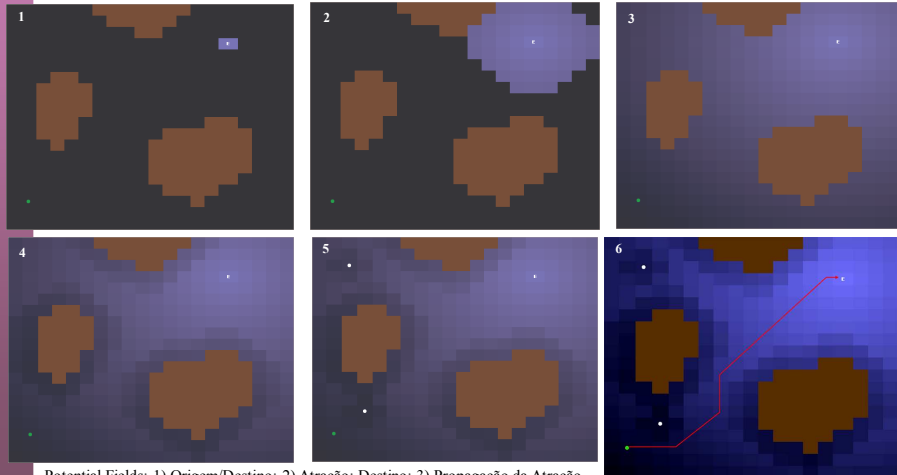
20

Maio 2009

Potential Fields in Games: <http://aigamedev.com/open/article/potential-fields/> (Obstáculos e Inimigos)

## Navegação com desvio de obstáculos

### Navegação: Campos Potenciais

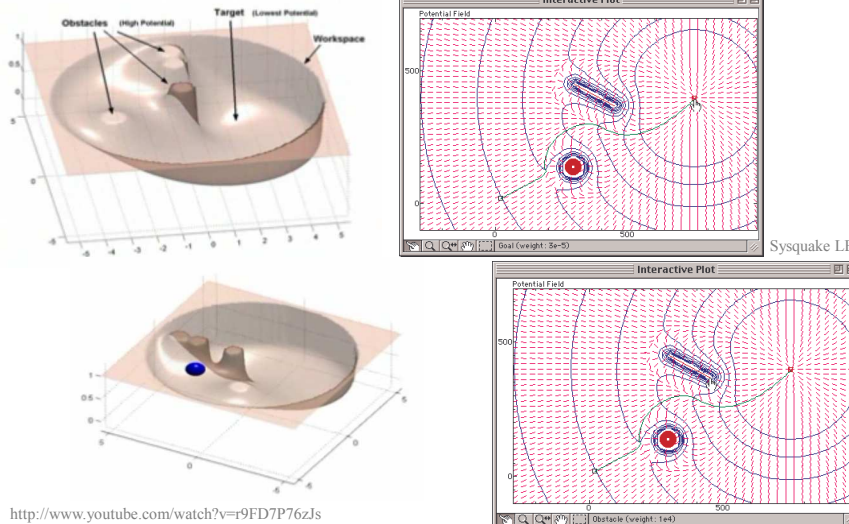


21  
Maio 2009

Potential Fields: 1) Origem/Destino; 2) Atração: Destino; 3) Propagação da Atração  
4) Repulsão: Obstáculo; 5) Adição repulsão; 6) Trajetória  
Potential Fields in Games: <http://aigamedev.com/open/article/potential-fields/> (Obstáculos e Inimigos)

## Navegação com desvio de obstáculos

### Navegação: Campos Potenciais [Demos]



22  
Maio 2009

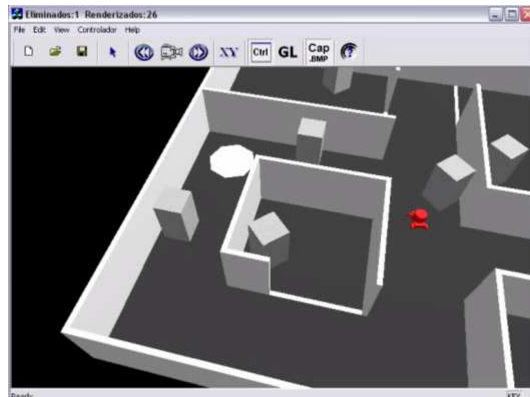
<http://www.youtube.com/watch?v=r9FD7P76zJs>

## Navegação com desvio de obstáculos

### Navegação: Campos Potenciais [Demos]

#### NAVEGAÇÃO GLOBAL x LOCAL

#### A\* + Campos Potenciais



DESVIO:  
Repulsão aos obstáculos

23

Maio 2009

Farlei Heinen - <http://ncc.unisinos.br/robotica/simulador/>

## Navegação com desvio de obstáculos

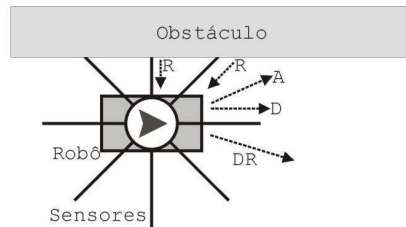
### Navegação: Campos Potenciais [Demos]

#### NAVEGAÇÃO GLOBAL x LOCAL

#### A\* + Campos Potenciais

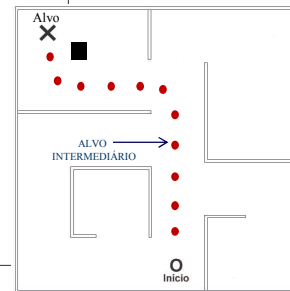
DESVIO:  
Repulsão aos obstáculos

R = Vetores de Repulsão  
 A = Vetor do Alvo  
 D = Vetor de Direção do Robô  
 DR = Vetor de Direção Resultante



Alvo  
X

A\* Planejamento Global  
 Geração de WayPoints



24

Maio 2009

Farlei Heinen - <http://ncc.unisinos.br/robotica/simulador/>

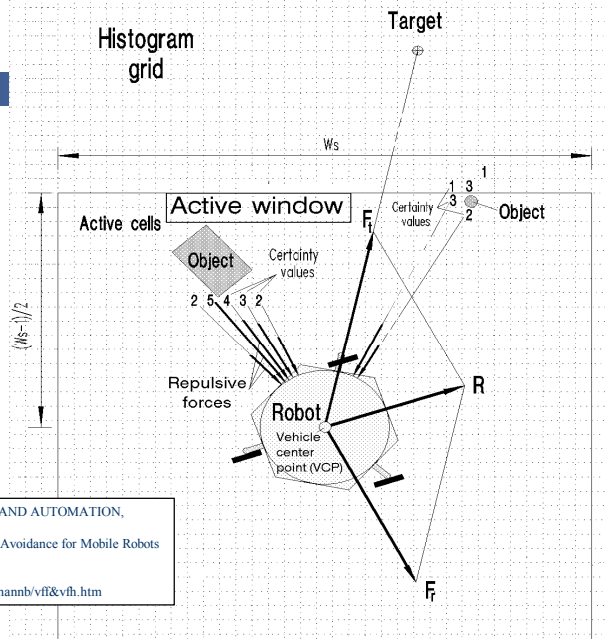
## Navegação: Campos Potenciais

### Algoritmos:

- VFF  
 Vector Force Fields
- VFH  
 Vector Force Histogram
- Implementado no  
 Player/Stage

IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION,  
 VOL. 7, NO. 3, JUNE 1991  
 The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots  
 Johann Borenstein, Yoram Koren.

WEB: <http://www-personal.umich.edu/~johannb/vff&vfh.htm>

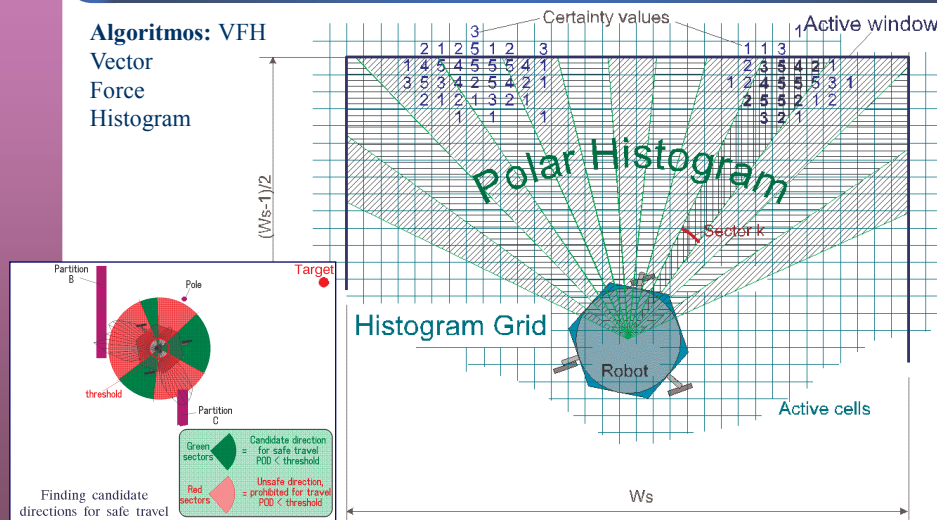


25  
 Maio 2009

**Virtual Force Field (VFF)** concept: Occupied cells exert repulsive forces onto the robot; magnitude is proportional to the certainty value  $c(i,j)$  of the cell and inversely proportional to  $r^2$

## Navegação com desvio de obstáculos

- ### Algoritmos: VFH
- Vector
  - Force
  - Histogram



26  
 Maio 2009

**Virtual Force Histogram (VFH)**: The above figure is the heart of the VFH method  
 Mapping active cells onto the polar histogram: Safe and Unsafe cells.

## Navegação com desvio de obstáculos

### Navegação: Direcionamento + Desvio de Obstáculos

DIRECIONAMENTO GLOBAL (Posição + Bússola)

NAVEGAÇÃO LOCAL (Desvio)



Robombeiros:

- Navegação com obstáculos esparsos

- Desvio local

- Conhecimento:  
Posição do Robô  
Posição do Alvo  
Direção

- Método usado: RNA  
(Machine Learning)

27

Maio 2009

Gustavo Pessin - <http://pessin.googlepages.com/>

## Navegação com desvio de obstáculos

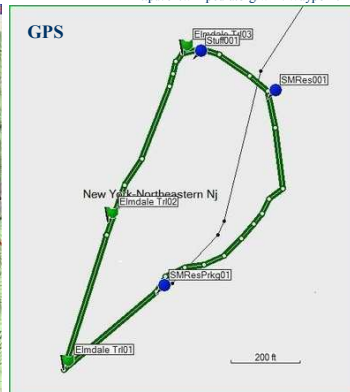
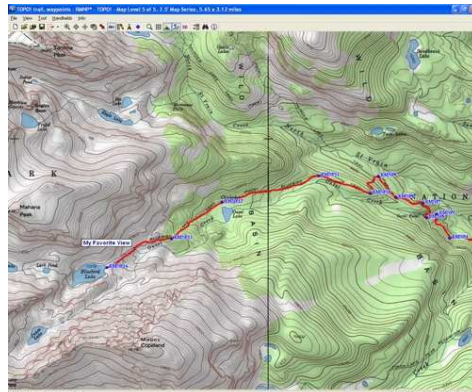
### Navegação baseada em Referências

\* REFERÊNCIA baseada na DIREÇÃO: Orientação do Destino

\* REFERÊNCIA baseada em PONTOS: WayPoints

\* REFERÊNCIA baseada em MARCOS: LandMarks

<http://en.wikipedia.org/wiki/Navigation>  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Waypoint>



28

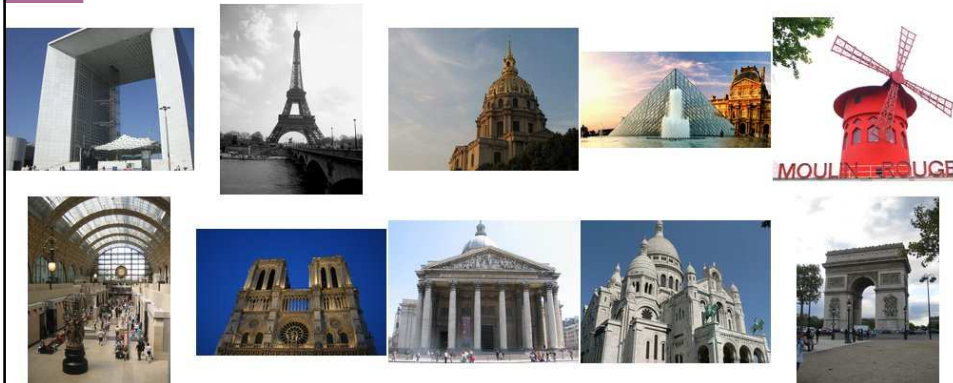
Maio 2009

## Navegação com desvio de obstáculos

### Navegação baseada em Referências

- \* REFERÊNCIA baseada na DIREÇÃO: Orientação do Destino
- \* REFERÊNCIA baseada em PONTOS: WayPoints
- \* REFERÊNCIA baseada em MARCOS: LandMarks

<http://en.wikipedia.org/wiki/Navigation>  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Waypoint>



## Navegação com desvio de obstáculos

### Navegação: Sistemas Híbridos

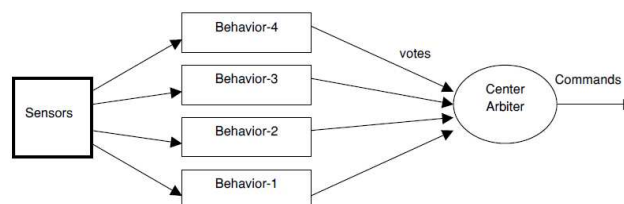
Navegação: A\* + Campos Potenciais

Navegação: WayPoints + LandMarks

Navegação: Coordenada/Direção + RNA

#### SISTEMAS HÍBRIDOS

- Necessidade de um **árbitro** para selecionar o comportamento adequado e a ação a ser realizada.
- Múltiplos comportamentos com seleção: *Behavior Selection / Coordination*



### Planejamento e Navegação: Problemas e Desafios

- **Construção de Mapas / Tipos de Mapas**
- **Localização: Posição e Orientação**
- **Equilíbrio entre planejamento global e planejamento local**
- **Planejamento Local: Evitar Mínimos Locais**
- **Planejamento Global: Custo Computacional, Ambientes Dinâmicos**
- **Composição e coordenação de múltiplos comportamentos**
- **Combinação: Mapa + Localização**
  - + Planejamento Global (Deliberativo)
  - + Planejamento Local (Reativo)

#### Seleção de Técnicas e Algoritmos:

**Campos Potenciais, VFH, Desvio Reativo, Direcionamento Reativo, Planejamento A\*, Planejamento Grafo/Dijkstra, D\*, Localização Markov, Localização Monte-Carlo, Mapas Sensoriais, Métricos, Topológicos, LandMarks, WayPoints, Marcos Visuais, ...**

### Referências:

#### >> Dijkstra

- Demo Java: <http://www-b2.is.tokushima-u.ac.jp/~iked/suuri/dijkstra/Dijkstra.shtml>
- Demo: <http://www.unf.edu/~wkloster/foundations/DijkstraApplet/DijkstraApplet.htm>

#### >> A Star (A\*)

- A\* Demo1: [http://www.policyalmanac.org/games/aStarTutorial\\_port.htm](http://www.policyalmanac.org/games/aStarTutorial_port.htm)
- A\* Demo2: <http://www.gamedev.net/REFERENCE/ARTICLES/ARTICLE2003.ASP>
- A\* Descrição: <http://www.inf.unisinos.br/~sbgames/anais/tutorials/Tutorial3.pdf>

#### >> Campos Potenciais

- Demo Java: <http://web.mit.edu/mgreytak/Public/NPFwebsite/index.html>
- Intro: <http://www.gamedev.net/reference/articles/article1125.asp>
- Intro: <http://aigamedev.com/open/article/potential-fields/>

#### Complementos:

*Wikipedia* - [A\\*\\_search\\_algorithm](#), [D\\*\\_search\\_algorithm](#),  
[Dijkstra's\\_algorithm](#)





INFORMAÇÕES SOBRE A DISCIPLINA

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

**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[at]icmc.usp.br) ou [fosorio \[at\] gmail.com](mailto:fosorio[at]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**