

**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/>**

**Aula 03: Mapas – Construção e Uso**

**Agenda:**

**Robôs Móveis e Mapas:**

**1. Tipos de Mapas**

**Mapas Sensorial, Mapa Métrico (Geométrico, Grade de Ocupação),  
Mapa Topológico, Informações Semânticas**

**2. Mapeamento**

**Geração de Mapas de Ocupação**

**Geração de Mapas Geométricos**

**Geração de Mapas Topológicos**

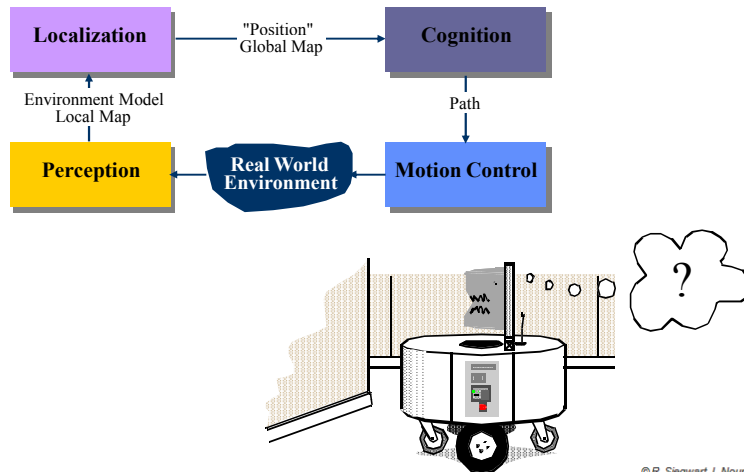
**3. Navegação baseada em Mapas**

**Planejamento de Trajetórias**

**Desafios e Problemas de Navegação**

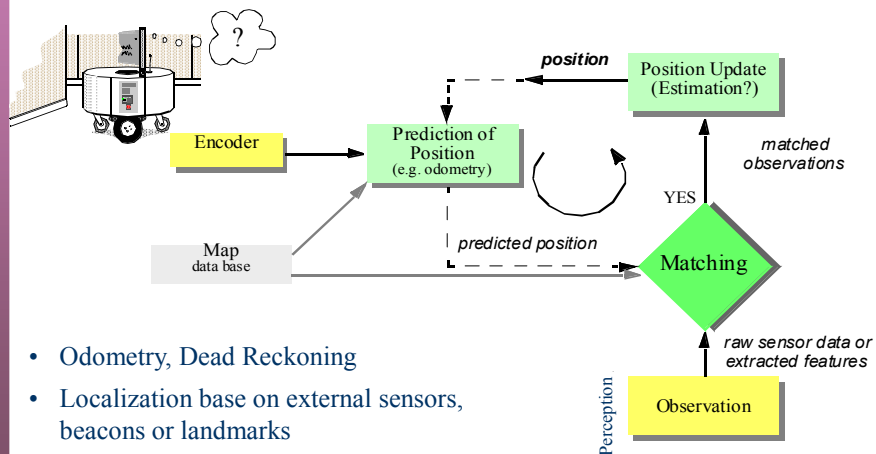
## Mapas - Construção e Uso

### Controle de Robôs Móveis Autônomos



## Mapas - Construção e Uso

### Controle de Robôs Móveis Autônomos



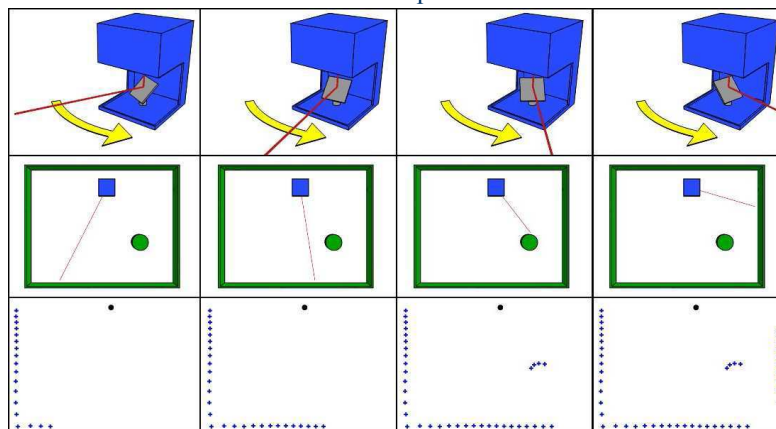
- Odometry, Dead Reckoning
- Localization base on external sensors, beacons or landmarks
- Probabilistic Map Based Localization

### Mapa Sensorial

- Armazena os dados brutos obtidos a partir dos sensores: “Nuvem de pontos” (Sonar, IR, Laser) ou mesmo Imagens
- São mapas baseados em leituras diretas dos sensores, permitindo conectar de modo mais direto possível a representação do ambiente com as leituras sensoriais
- A idéia básica é fazer medidas sensoriais conectadas com a informação de odometria, e então usar uma técnica como servo-controle: *Sensor-Based Servoing*  
E.g. Image-Based Servoing ou Visual Servoing  
[Dudek/Jenkin 2000 – Seções 7.3 e 8.1]

### Mapa Sensorial

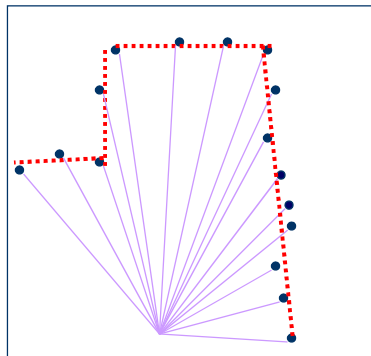
- Armazena os dados brutos obtidos a partir dos sensores:



## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Sensorial

-Armazena os dados brutos obtidos a partir dos sensores:  
 “Nuvem de pontos” (Sonar, IR, Laser) ou mesmo Imagens



*Sensor-Based Servoing*



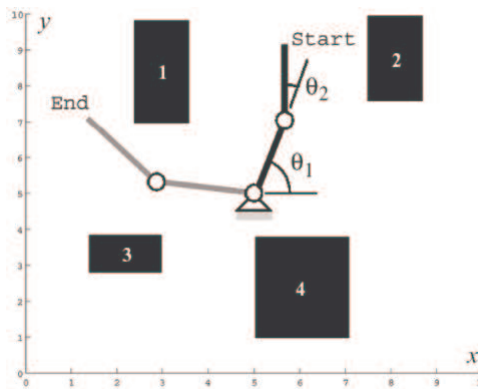
7

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Sensorial

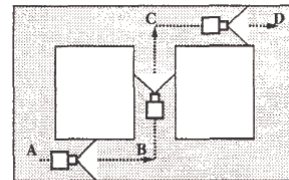
-Armazena os dados brutos obtidos a partir dos sensores:  
 “Nuvem de pontos” (Sonar, IR, Laser) ou mesmo Imagens



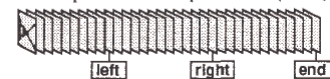
*Sensor-Based Servoing*

(1) Recording Run

Memorizing views along the route



View-Sequenced Route Representation (VSRR)



[Matsumoto, Inaba, Inoue 1996]

8

Maio 2009

© R. Siegwart, I. Nourbakhsh

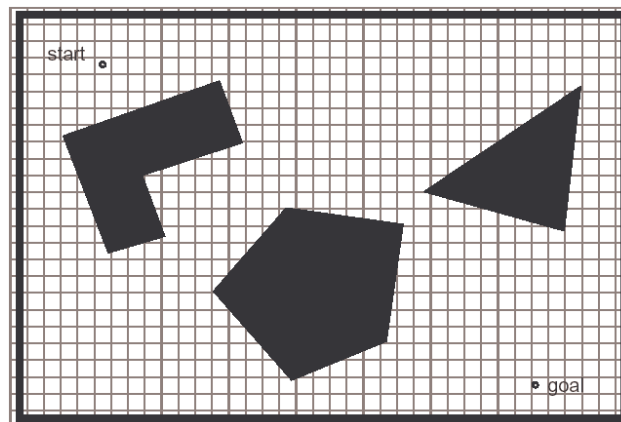
### Mapa Métrico

- Armazena uma descrição métrica do ambiente.
- Tipos de Mapas Métricos:
  - Mapa de Ocupação (e.g. grid 2D)
  - Mapa Geométrico 2D (e.g. planta baixa 2D)
  - Mapa Geométrico 3D (e.g. representação em VRML do ambiente)
- Os mapas métricos podem ser definidos a priori e fornecidos ao robô, mas também podem ser obtidos (construídos) pelo próprio robô a partir de suas leituras sensoriais do ambiente.
- Mapas métricos devem respeitar as dimensões e relações de tamanho e distância entre objetos e elementos presentes no ambiente.

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa de Ocupação – Grade 2D

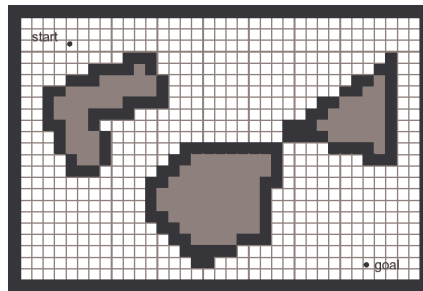
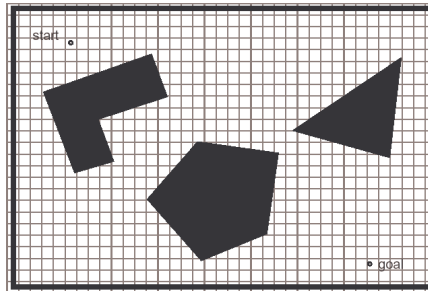


## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa de Ocupação - Grade 2D



Definições:

- Resolução/Amostragem (Lin x Col)
- Dimensão/Proporção (cada elemento da grade corresponde a  $X \text{ cm}^2$ )
- Informação da célula da grade (valores, quantização)

11

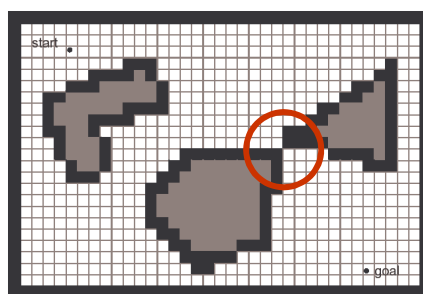
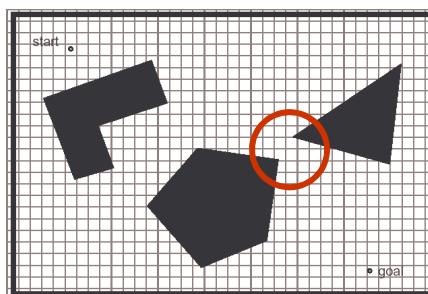
Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa de Ocupação - Grade 2D



Definições:

- Resolução/Amostragem (Lin x Col)
- Dimensão/Proporção (cada elemento da grade corresponde a  $X \text{ cm}^2$ )
- Informação da célula da grade (valores, quantização)

12

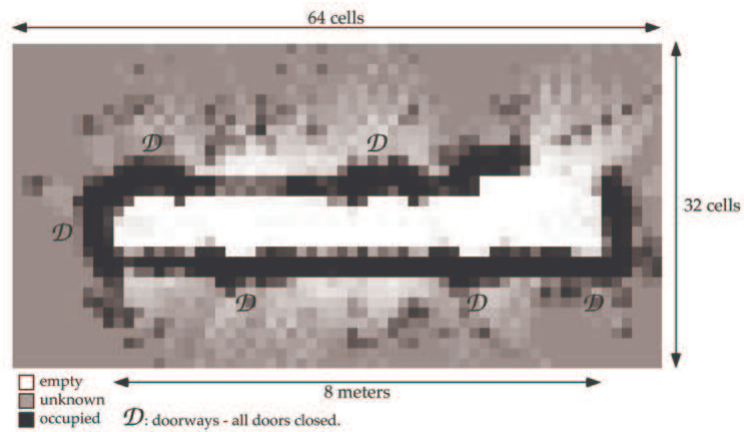
Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa de Ocupação - Grade 2D - Mapas Probabilísticos (Grau de Certeza)



13

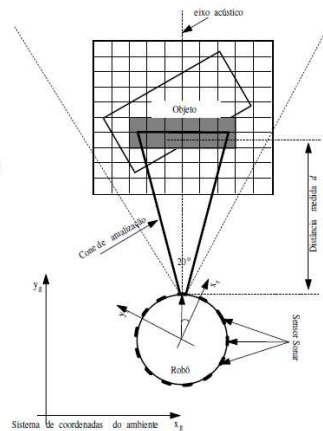
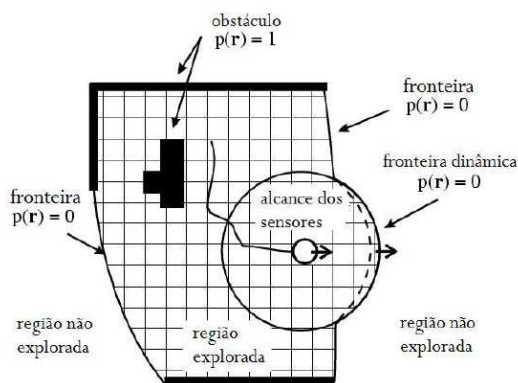
Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Mapeamento usando Mapas de Ocupação:  
 usando um Sonar para mapear o ambiente

Algoritmo HIMM [Borenstein 91]  
 Histogrammic In-Motion Mapping



14

Maio 2009

[Edson Prestes e Silva Jr 2003]

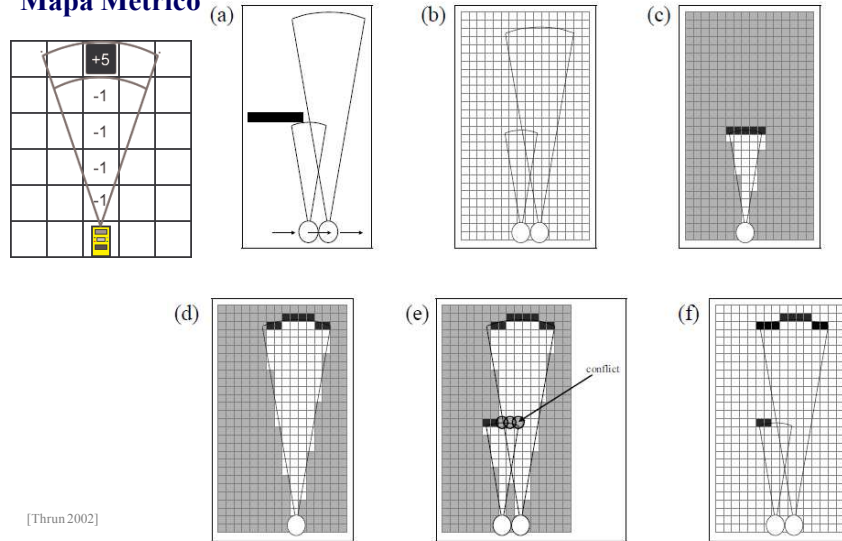




## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

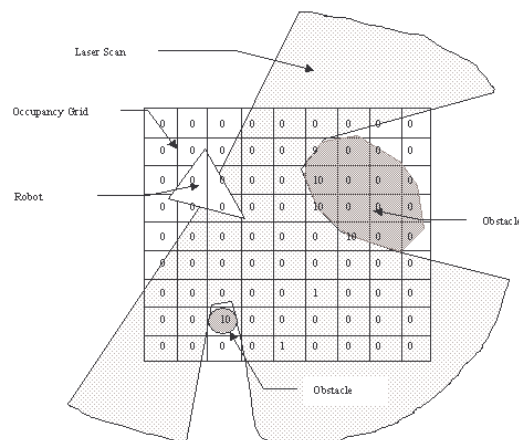
### Mapeamento usando Mapas de Ocupação



## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

### Mapeamento usando Mapas de Ocupação: usando o Laser para mapear o ambiente

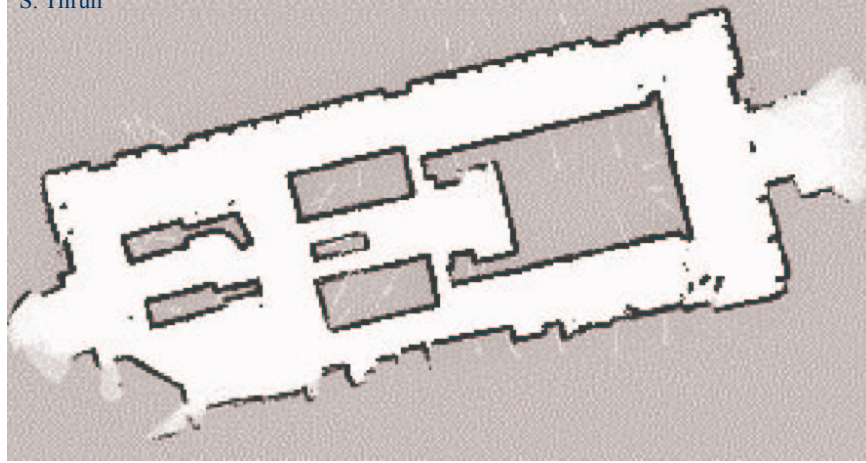


## RMA: Tipos de Mapas

**Mapa Métrico** Mapeamento usando Mapas de Ocupação:  
usando o Laser para mapear o ambiente



S. Thrun

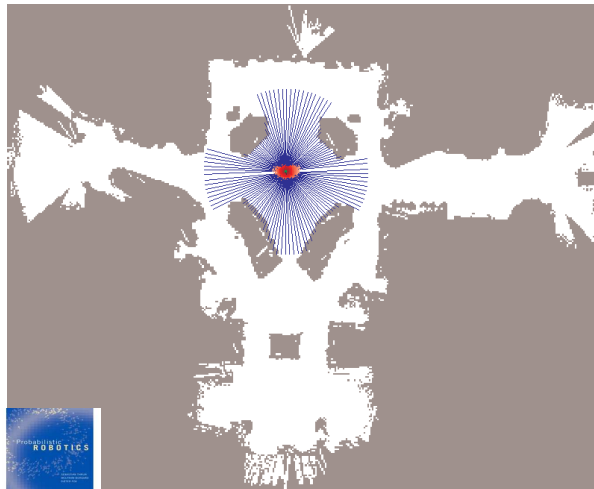


19

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

**Mapa Métrico** Mapeamento usando Mapas de Ocupação:  
usando o Laser para mapear o ambiente



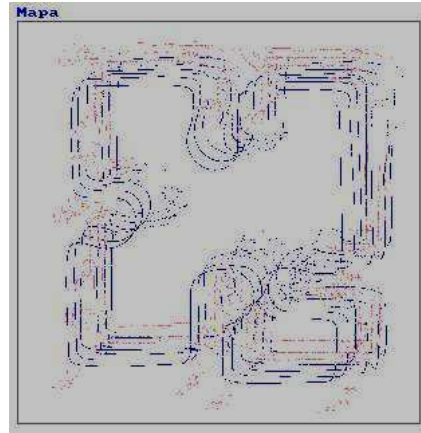
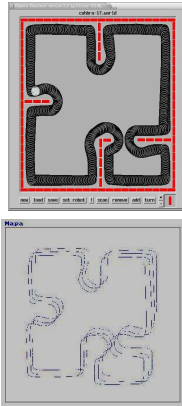
- Sensor Laser
- **Localização!**
- Mapeamento com “certainty grids”

20

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

**Mapa Métrico** Mapeamento usando Mapas de Ocupação:  
usando o Khepera + IR para mapear o ambiente



- Sensor Laser
- **Localização!**
- Mapeamento com "certainty grids"

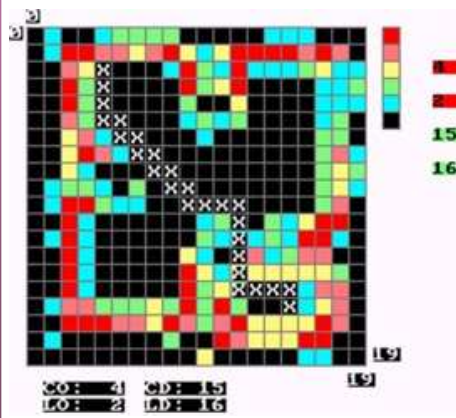
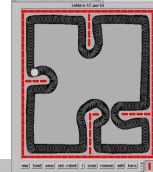
**ERRO DE LOCALIZAÇÃO!**

21

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

**Mapa Métrico** Mapeamento usando Mapas de Ocupação:  
usando o Khepera para mapear o ambiente



22

Maio 2009

**Mapa Métrico** Mapeamento usando Mapas de Ocupação:  
 usando o Laser para mapear o ambiente

**Environment Map:  
 Occupancy Grid**

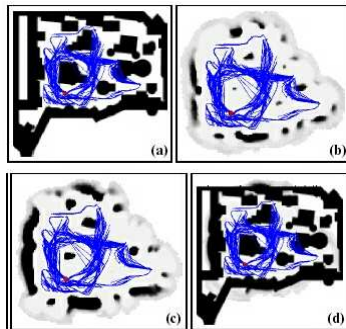


Fig. 9. Integrating multiple maps: (a) CAD map of the museum ( $21 \times 20m^2$ ) modeling only the static obstacles, (b) laser map, (c) sonar map, and (d) the integrated map used for path planning.

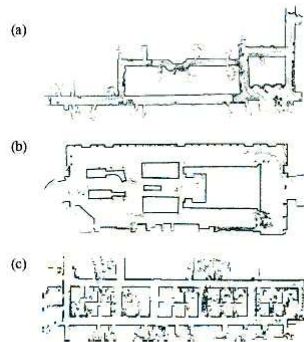
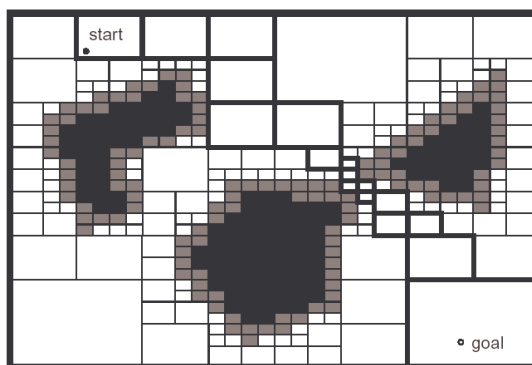
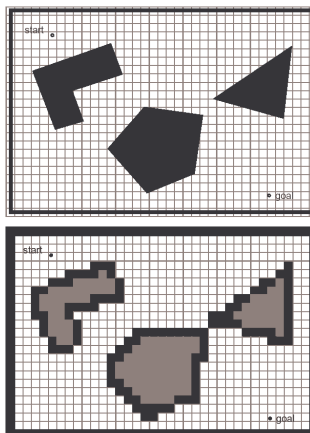


Figure 5: Maps generated in other large-scale environments of sizes (a) 75m, (b) 45m, and (c) 50m. In some of these runs, the cumulative odometric error exceeds 30 meters and 90 degrees.

**Mapa Métrico**

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa de Ocupação – Grade 2D com diferentes representações



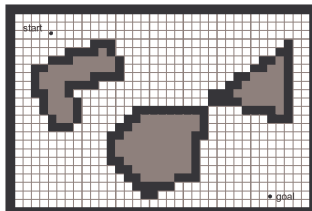
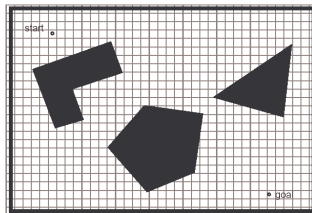
Adaptive Cell Decomposition

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

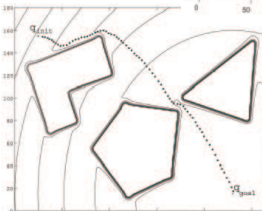
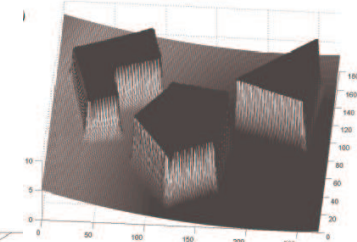
Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa de Ocupação – Grade 2D com diferentes representações



Potential Fields

© R. Siegwart, I. Nourbakhsh



25

Maio 2009

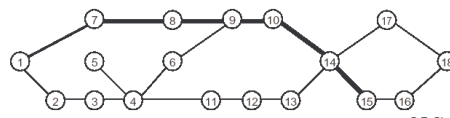
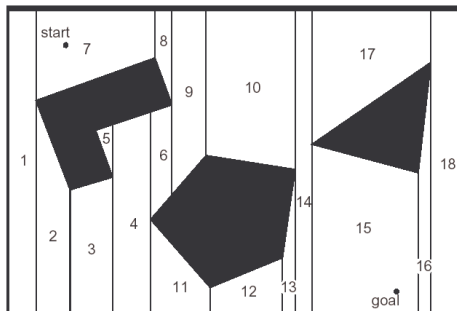
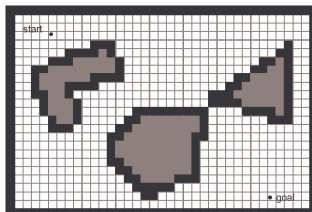
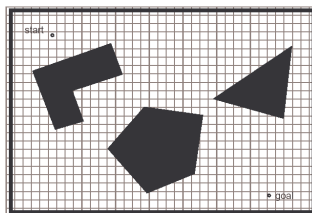
## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

Exact Cell Decomposition

- Mapa de Ocupação – Grade 2D com diferentes representações



26

Maio 2009

© R. Siegwart, I. Nourbakhsh

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D

Planta baixa de um prédio

Navegar do Ponto A até o Ponto B



27

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

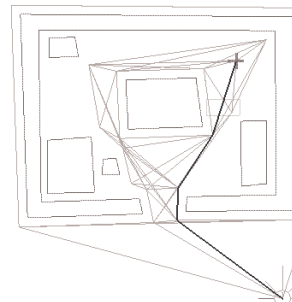
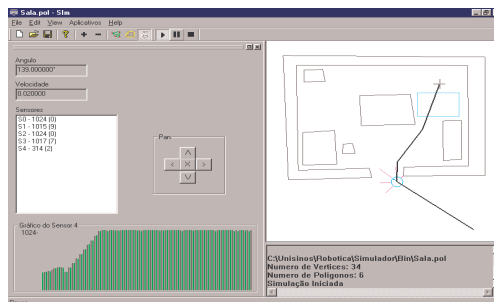
### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D

Planta baixa de um prédio

Navegar do Ponto A até o Ponto B



28

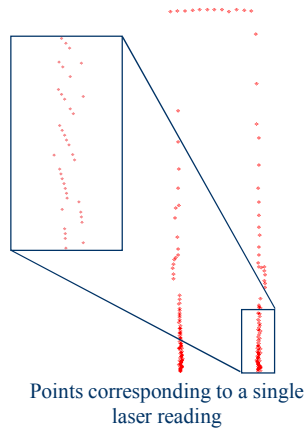
Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D – Do Mapa Sensorial ao Mapa Geométrico



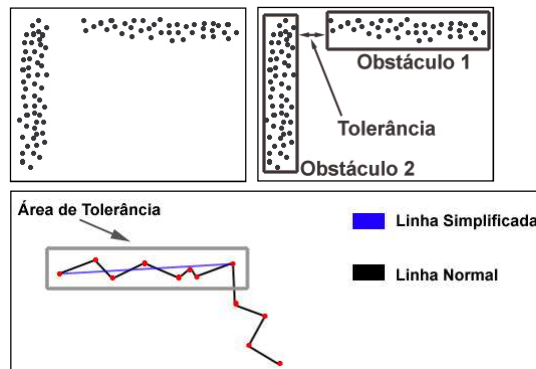
## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D – Do Mapa Sensorial ao Mapa Geométrico

**Mapeamento:**  
- Nuvem de pontos  
- Extração de contorno

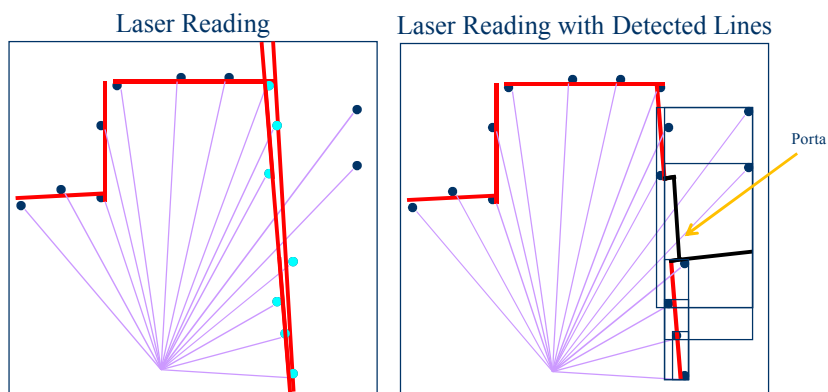


## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D - Do Mapa Sensorial ao Mapa Geométrico

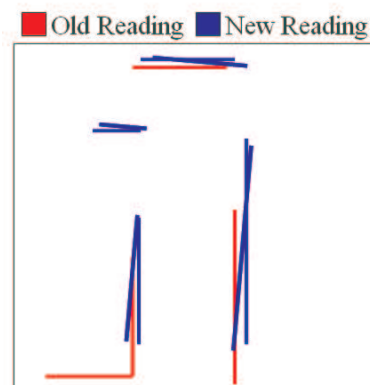


## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D - Do Mapa Sensorial ao Mapa Geométrico
- >> Problema das múltiplas leituras



- Match lines
- Histogram angle correction
- Choose largest value
- Average winning lines
- Apply rotation

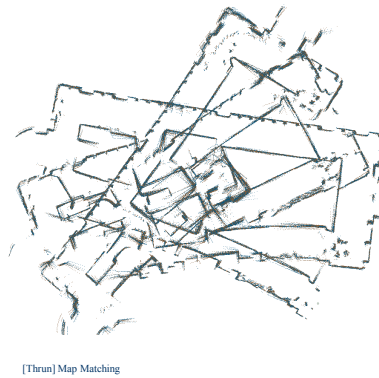
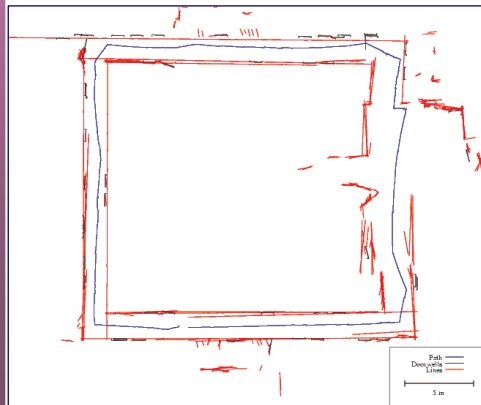
<http://www.cs.wustl.edu/~ajm7/map>



### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D - Do Mapa Sensorial ao Mapa Geométrico  
  >> Problema das múltiplas leituras + Erros de Odometria



[Thrun] Map Matching

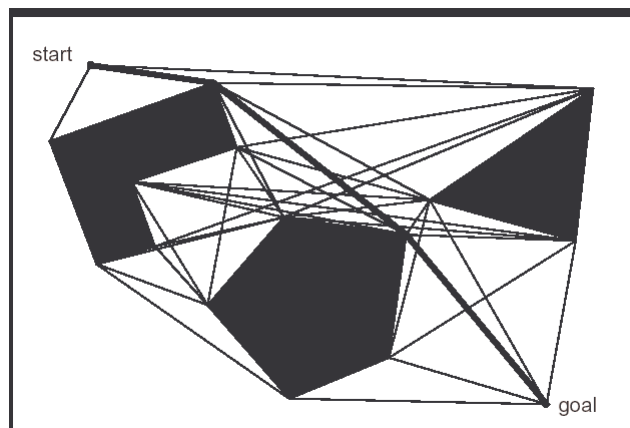
33

Maio 2009

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D - Representações para Navegação



Mapa Geométrico  
com grafo de visibilidade

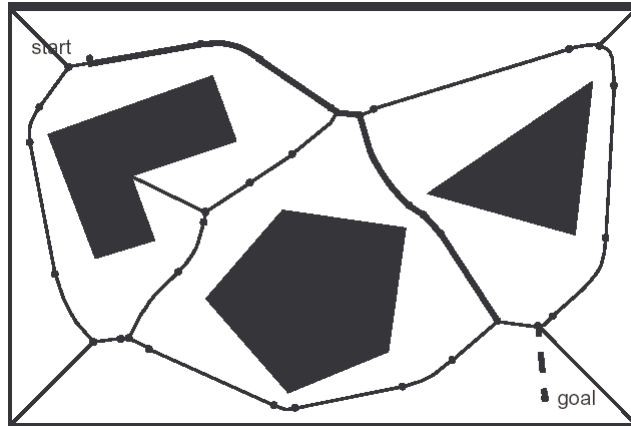
34

Maio 2009

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D - Representações para Navegação



Mapa Geométrico  
com  
Diagrama de Voronoi

35

Maio 2009

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 3D - Representações para Navegação



36

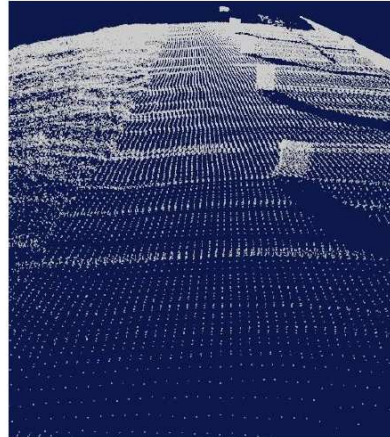
Maio 2009

[Alberto Hata - Denis Wolf]

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 3D – Representações para Navegação



37

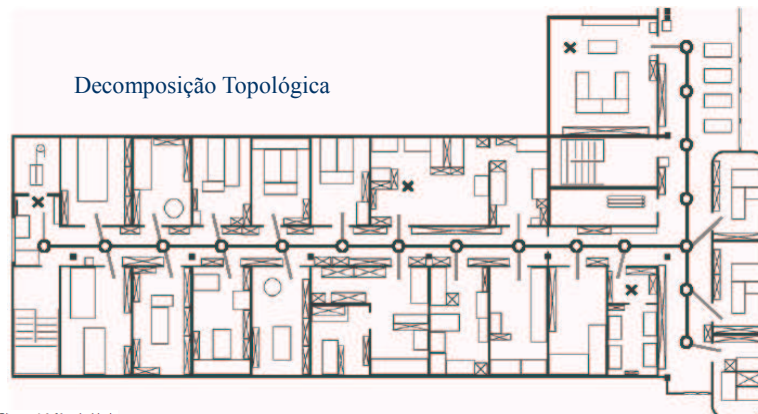
Maio 2009

[Alberto Hata – Denis Wolf]

### Mapa Topológico

Armazenando uma descrição de conectividade do ambiente:

- Mapa Topológico – Não é necessária uma representação métrica das distâncias e do tamanho dos elementos do mapa



38

Maio 2009

©R. Siegwart, I. Nourbakhsh

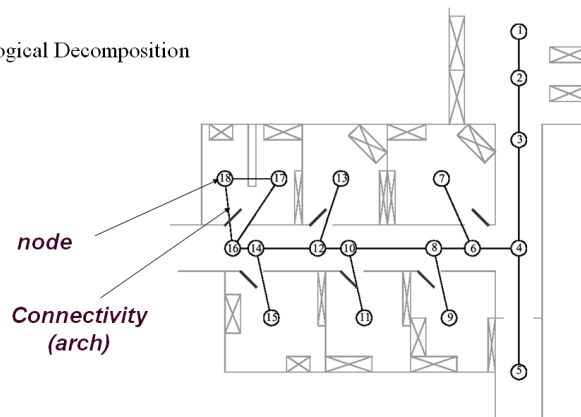
## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Topológico

Armazenando uma descrição de conectividade do ambiente:

- Mapa Topológico – Não é necessária uma representação métrica das distâncias e do tamanho dos elementos do mapa

- Topological Decomposition



39

Maio 2009

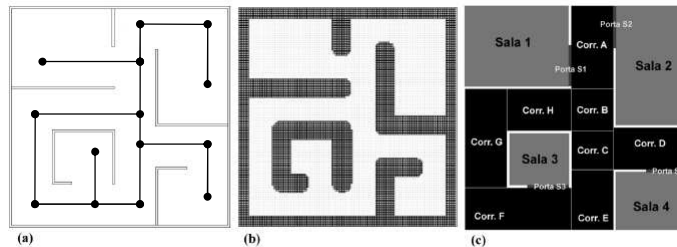
© R. Siegwart, J. Nourbakhsh

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Topológico

Armazenando uma descrição de conectividade do ambiente:

- Mapa Topológico – Não é necessária uma representação métrica das distâncias e do tamanho dos elementos do mapa



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

Mapa Topológico: Identifica as regiões do mapa e sua conectividade  
 Pode ser associado a **informações de odometria**

40

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

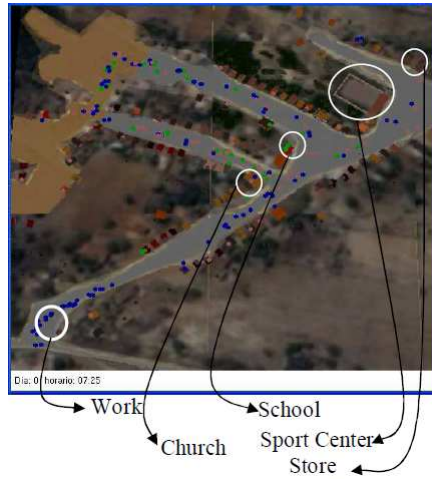
### Mapa Semântico

Associando um sentido e função aos elementos do ambiente:

- Mapa Semântico

Exemplos de  
Informações Semânticas:

- Porta (estado da porta: aberta/fechada);
- Elevador
- Escada
- Cadeira (elemento móvel)
- Armário (elemento estático)
- Locais no Mapa:  
Almoxarifado, Secretaria,  
Biblioteca, etc.



41

Maio 2009

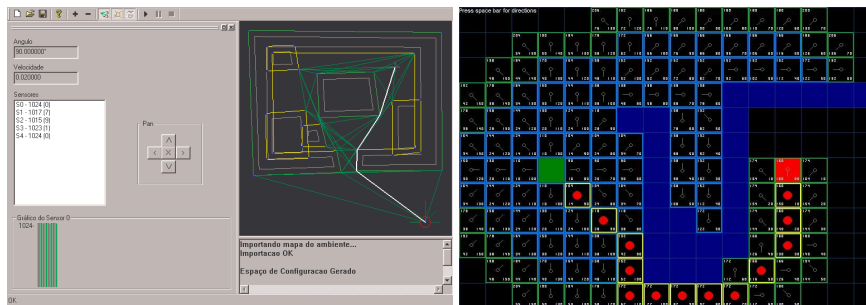
## RMA: Navegação com Mapas

### Navegação Baseada em Mapas

O tipo do mapa irá definir o algoritmo de navegação empregado.

Por exemplo:

- Mapa de Ocupação: A\*, campos potenciais
- Mapa Geométrico 2D: Grafo de Visibilidade, A\*
- Mapa Topológico: Navegação por pontos de referência



42

Maio 2009

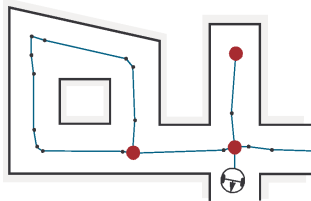
Grafo de Visibilidade + Dijkstra



A Star (A\*)

# Path Planning Overview

## 1. Road Map, Graph construction

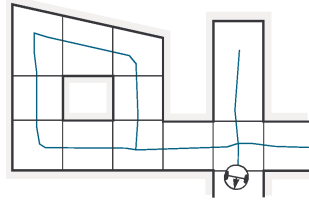
- Identify a set of routes within the free space



- Where to put the nodes?
- Topology-based:
  - at distinctive locations 
- Metric-based:
  - where features disappear or get visible 

## 2. Cell decomposition

- Discriminate between free and occupied cells



- Where to put the cell boundaries?
- Topology- and metric-based:
  - where features disappear or get visible

## 3. Potential Field

- Imposing a mathematical function over the space

©R. Siegwart, I. Nourbakhsh

## Referências Bibliográficas: Mapas

### Livros/Slides:

- \* Probabilistic Robotics - The MIT Press (2005)  
Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox
- \* Introduction to Autonomous Mobile Robots (2004)  
Roland Siegwart and Illah Nourbakhsh
- \* Computational Principles of Mobile Robotics (2000)  
Gregory Dudek, Michael Jenkin

### Material Complementar:

- Farlei Heinen - Dissertação de Mestrado  
<http://btdt.unisinos.br/>
- Edson Prestes e Silva Jr. - Tese de Doutorado  
<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3819>



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**