

**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**

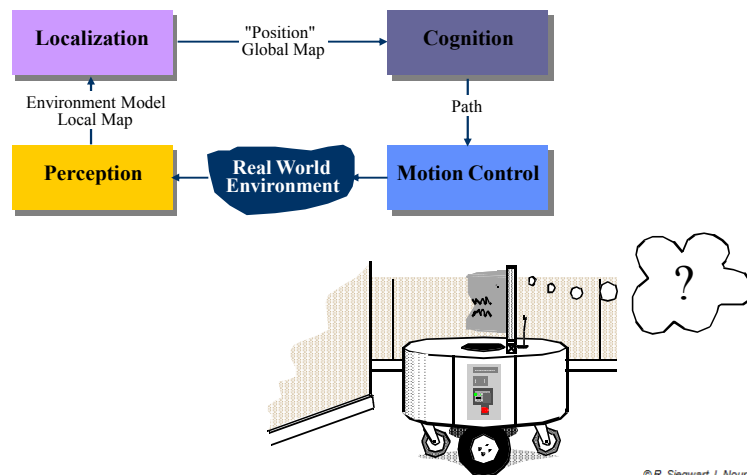
**Geração de Mapas de Ocupação  
Geração de Mapas Geométricos  
Geração de Mapas Topológicos**

**3. Navegação baseada em Mapas**

**Planejamento de Trajetórias  
Desafios e Problemas de Navegação**

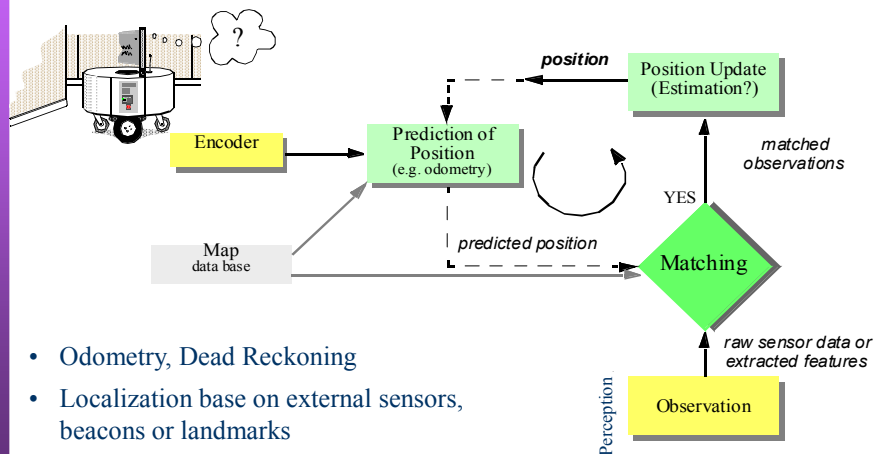
## Mapas – Construção e Uso

### Controle de Robôs Móveis Autônomos



## Mapas – Construção e Uso

### Controle de Robôs Móveis Autônomos



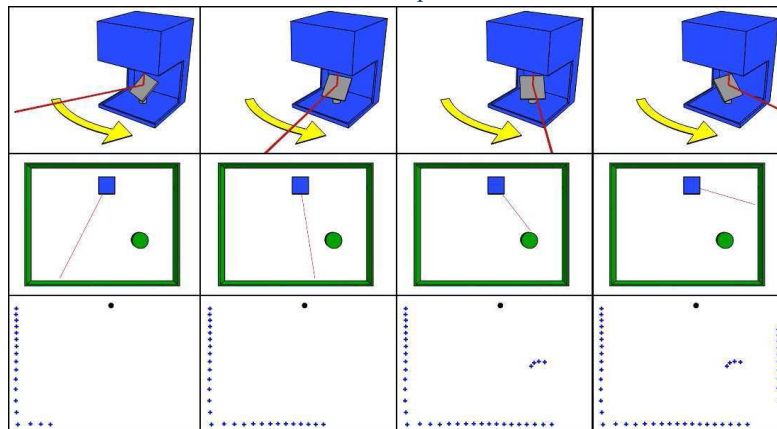
- Odometry, Dead Reckoning
- Localization base on external sensors, beacons or landmarks
- Probabilistic Map Based Localization

### 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

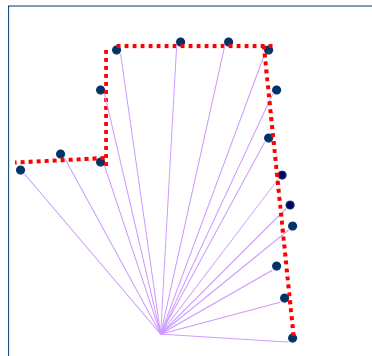
- Armazena os dados brutos obtidos a partir dos sensores:



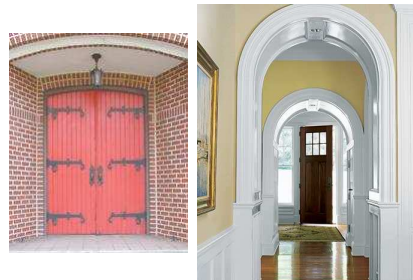
## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Sensorial

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



*Sensor-Based Servoing*



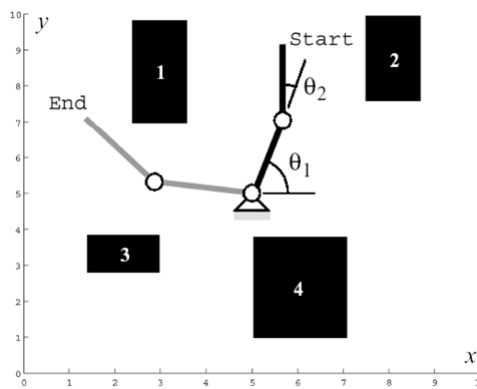
7

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Sensorial

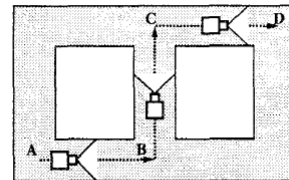
-Armazena os dados brutos obtidos a partir dos sensores:  
 “Nuvem de pontos” (Sonar, IR, Laser) ou mesmo Imagens



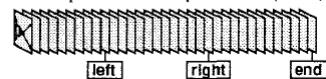
*Sensor-Based Servoing*

#### (1) Recording Run

Memorizing views along the route



View-Sequenced Route Representation (VSRR)



[Matsumoto, Inaba, Inoue 1996]

8

Maio 2009

© R. Siegwart, I. Nourbakhsh

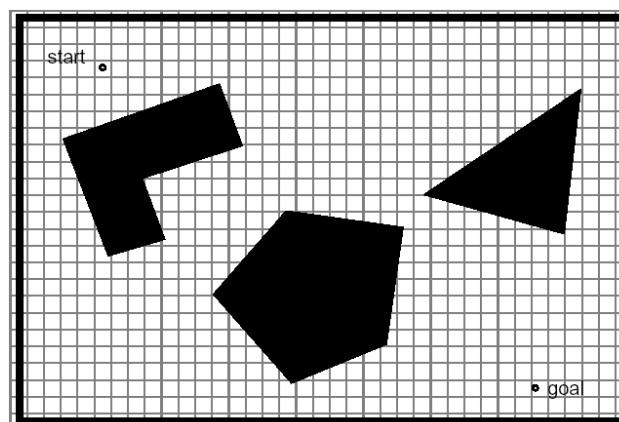
### Mapa Métrico

- 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

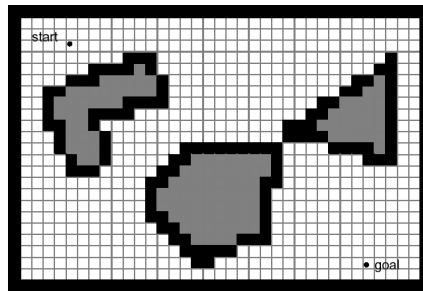
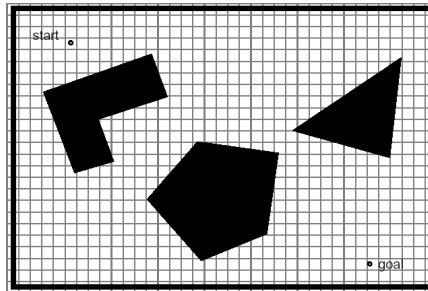


## RMA: Tipos de Mapas

### 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

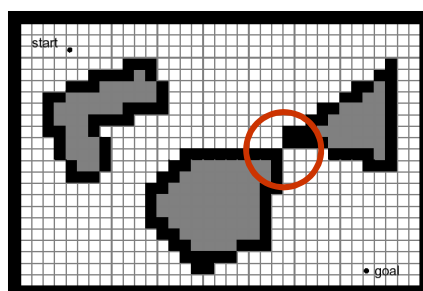
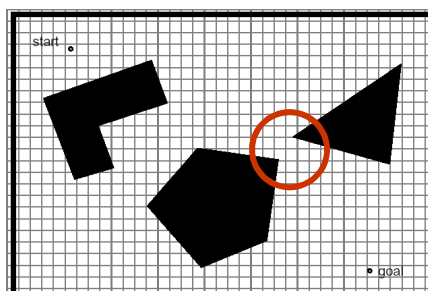
Maio 2009

## 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

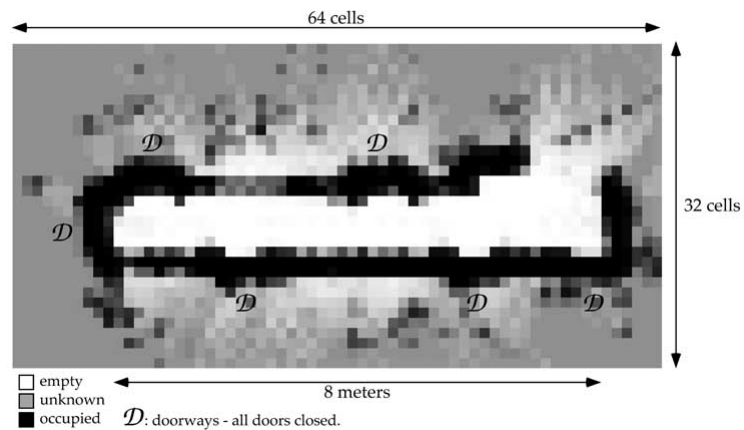
Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

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



13

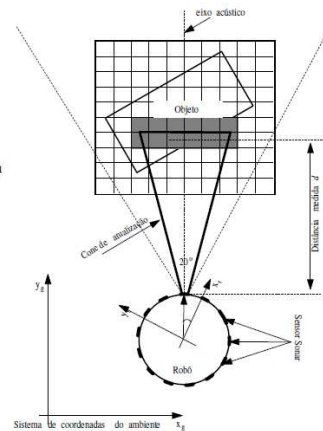
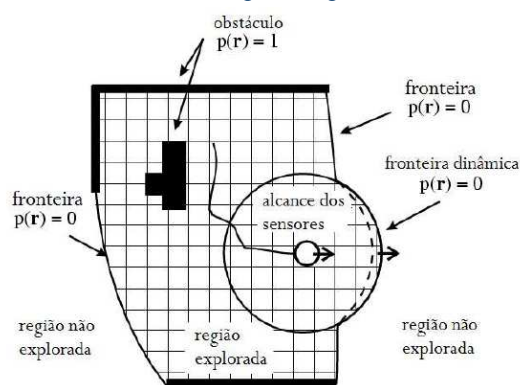
Maio 2009

## 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

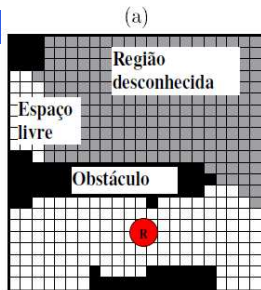
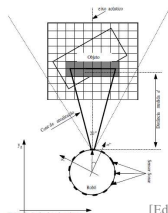
[Edson Prestes e Silva Jr 2003]

## RMA: Tipos de Mapas

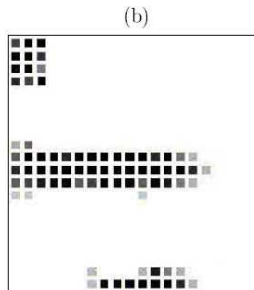
### Mapa Métrico

Mapeamento usando  
 Mapas de Ocupação

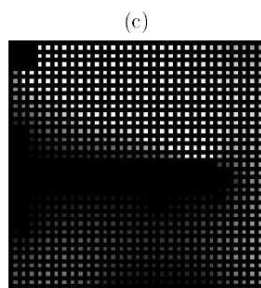
Certainty Occupancy  
 Grids, HIMM  
 [Elfes 87, 98]  
 [Borenstein 91]  
 [Prestes 2003]



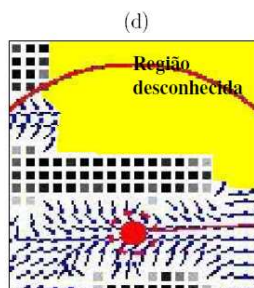
Propriedade Estado



Propriedade Certeza



(c)

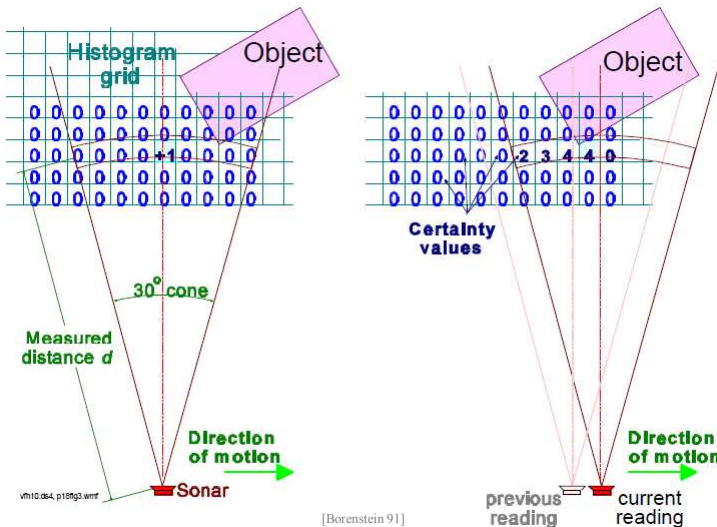


(d)

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Mapeamento usando Mapas de Ocupação

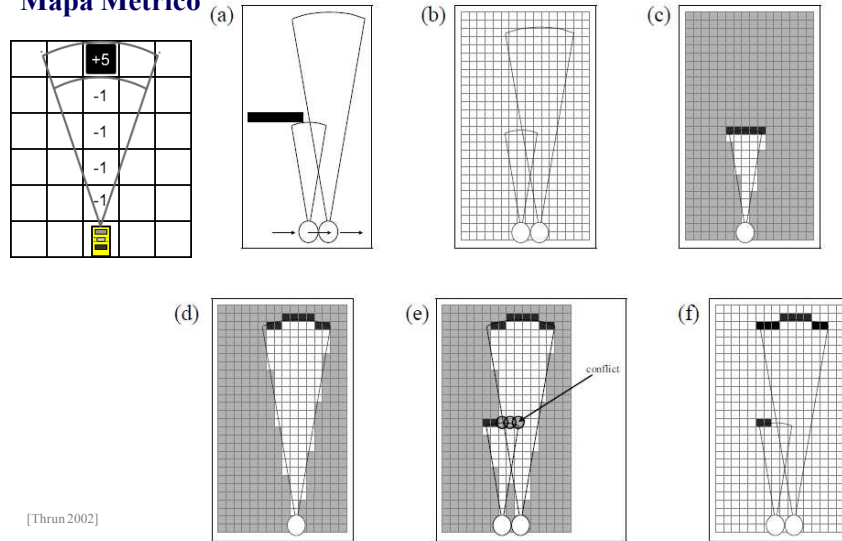




## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

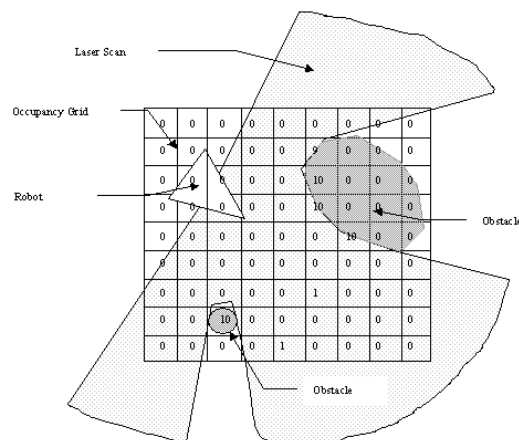
Mapeamento usando Mapas de Ocupação



## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

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

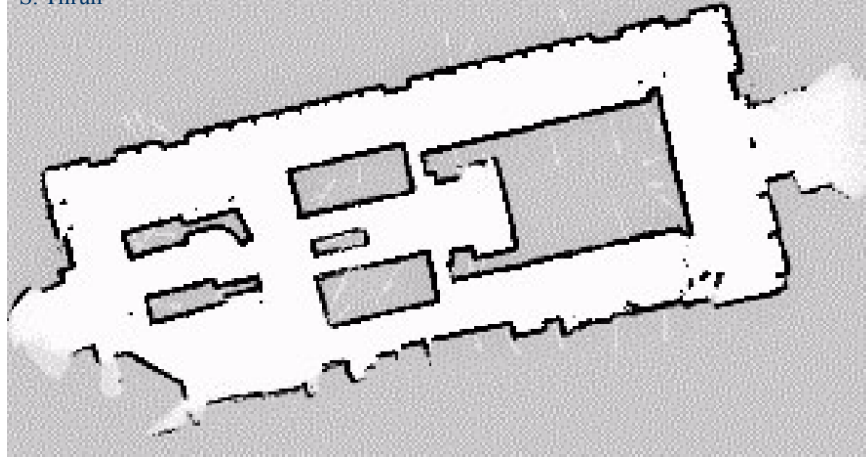


## RMA: Tipos de Mapas

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



S. Thrun

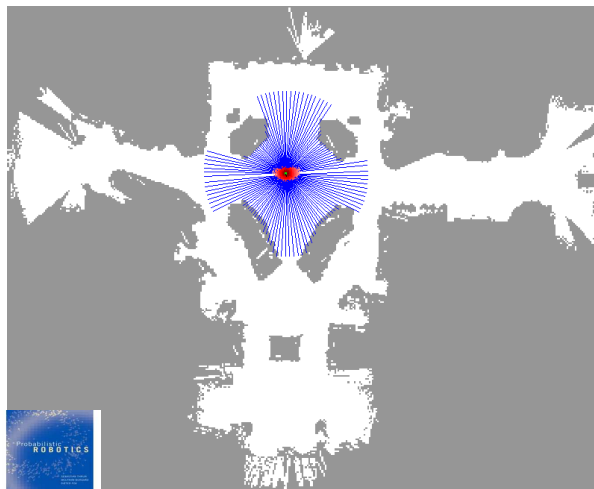


19

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

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



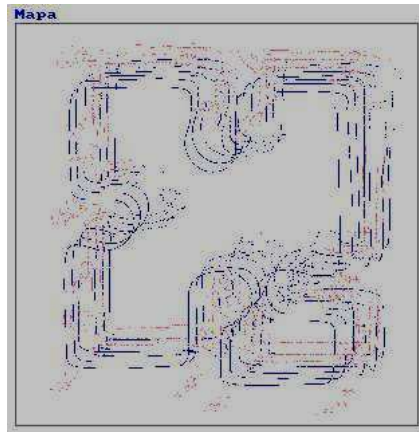
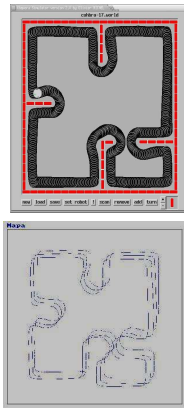
- Sensor Laser
- **Localização!**
- Mapeamento com “certainty grids”

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"

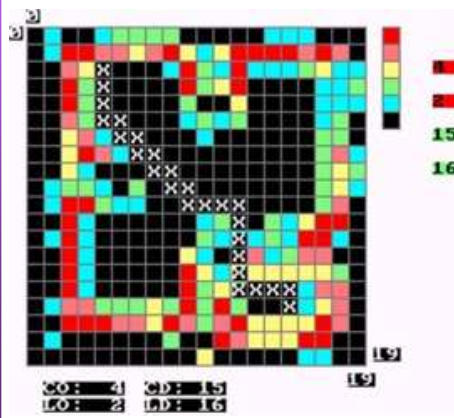
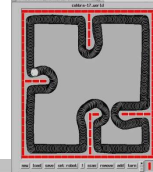
**ERRO DE LOCALIZAÇÃO!**

21

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

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



22

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

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

#### Environment Map: Occupancy Grid

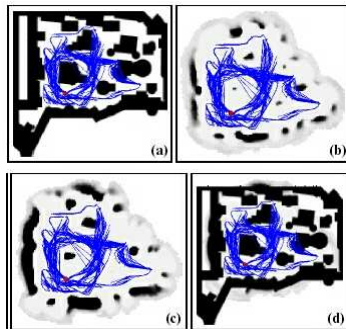


Fig. 9. Integrating multiple maps: (a) CAD map of the museum ( $21 \times 20m^2$ ) modeling only the static obstacles, (b) laser map, (c) sonar map, and (d) the integrated map used for path planning.

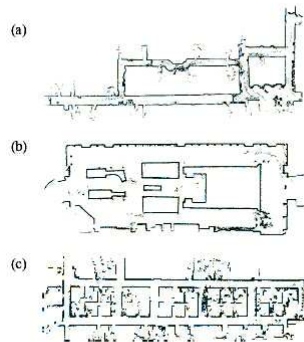


Figure 5: Maps generated in other large-scale environments of sizes (a) 75m, (b) 45m, and (c) 50m. In some of these runs, the cumulative odometric error exceeds 30 meters and 90 degrees.

23

Maio 2009

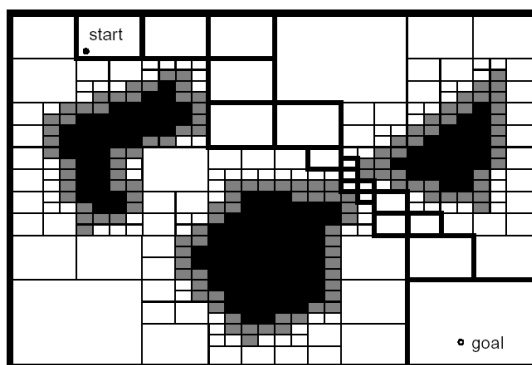
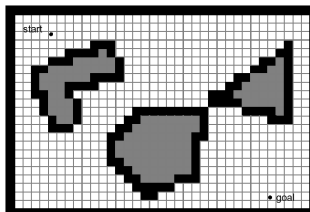
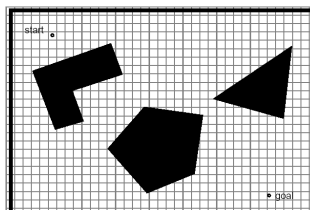
Sebastian Thrun / CMU

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa de Ocupação – Grade 2D com diferentes representações



Adaptive Cell Decomposition

© R. Siegwart, I. Nourbakhsh

24

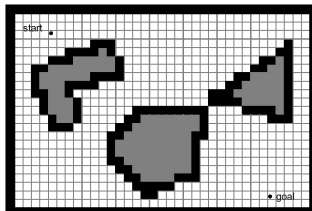
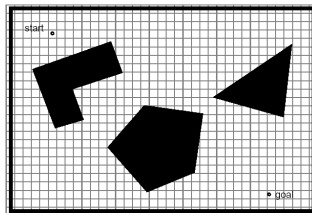
Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

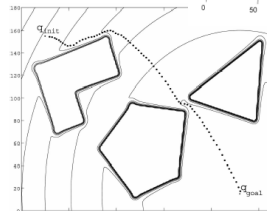
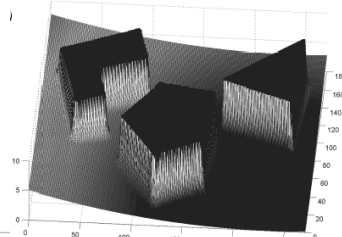
Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa de Ocupação – Grade 2D com diferentes representações



Potential Fields

© R. Siegwart, I. Nourbakhsh



25

Maio 2009

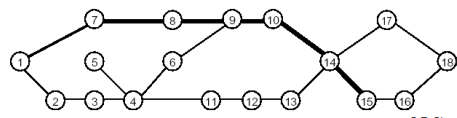
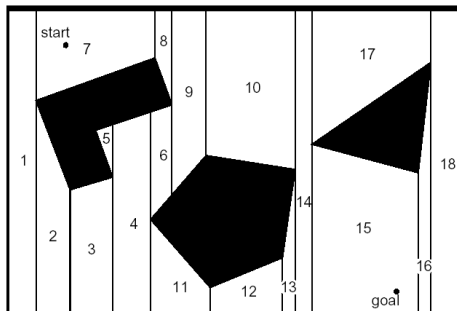
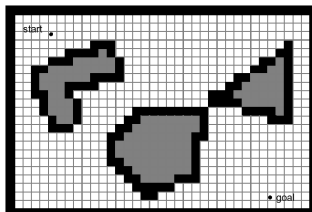
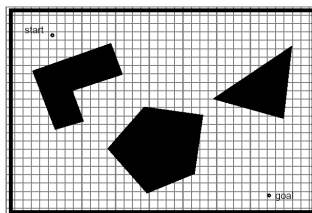
## RMA: Tipos de Mapas

### 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

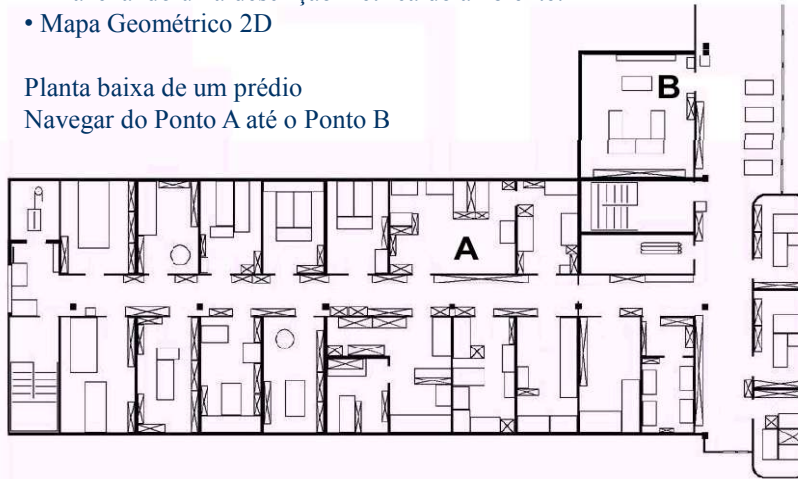
### Mapa Métrico

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

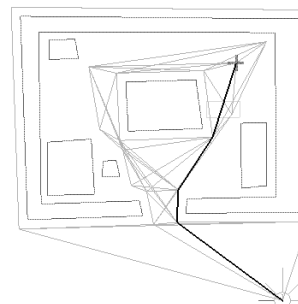
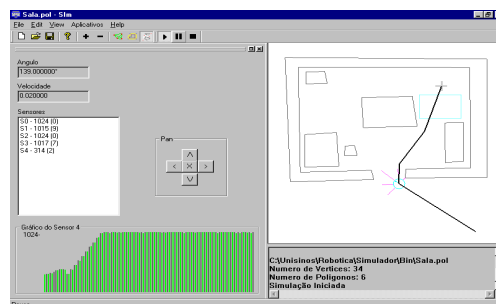
### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D

Planta baixa de um prédio

Navegar do Ponto A até o Ponto B



28

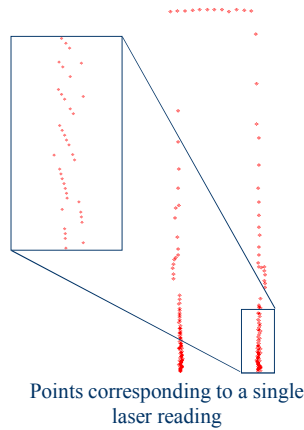
Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

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



29

Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

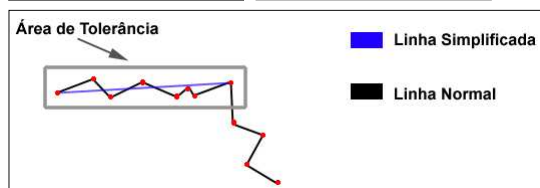
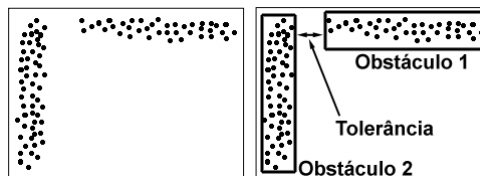
### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

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

#### Mapeamento:

- Nuvem de pontos
- Extração de contorno



30

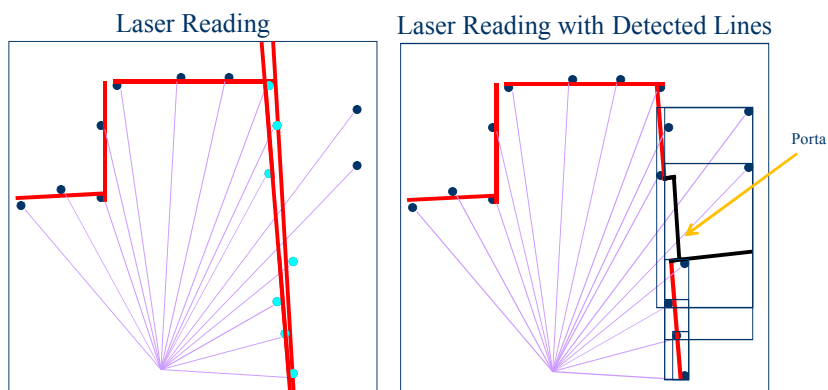
Maio 2009

## RMA: Tipos de Mapas

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

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



31

Maio 2009

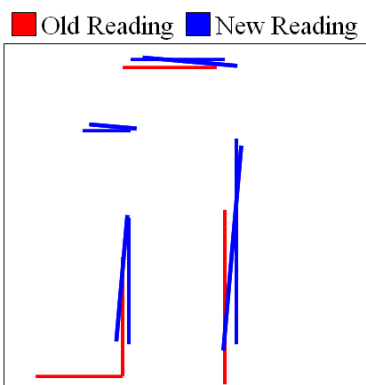
<http://www.cs.wustl.edu/~ajm7/map>

## 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>

32

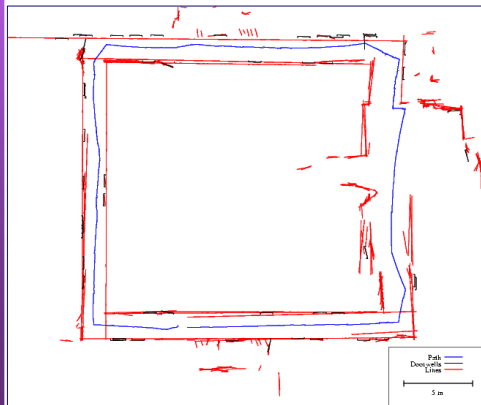
Maio 2009



### 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

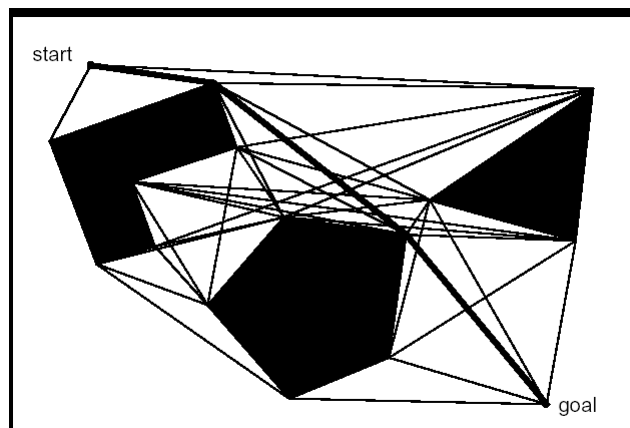
33

Maio 2009

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 2D – Representações para Navegação



Mapa Geométrico  
com grafo de visibilidade

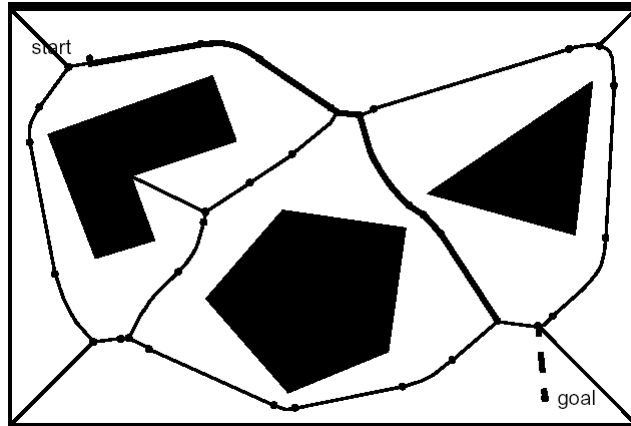
34

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

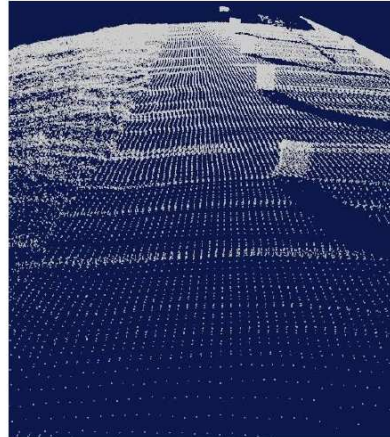
Maio 2009

[Alberto Hata - Denis Wolf]

### Mapa Métrico

Armazenando uma descrição métrica do ambiente:

- Mapa Geométrico 3D – Representações para Navegação



37

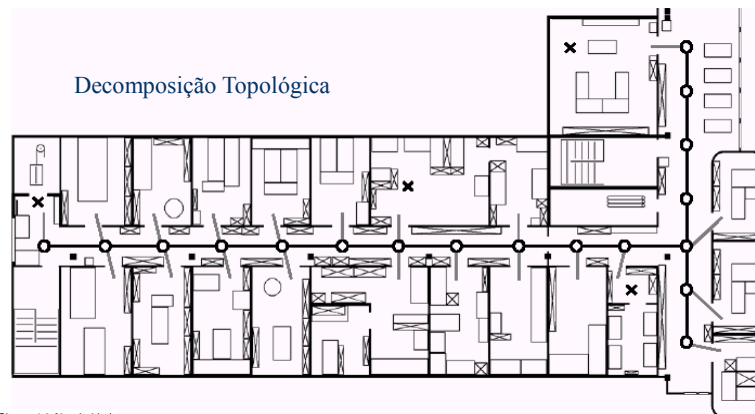
Maio 2009

[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

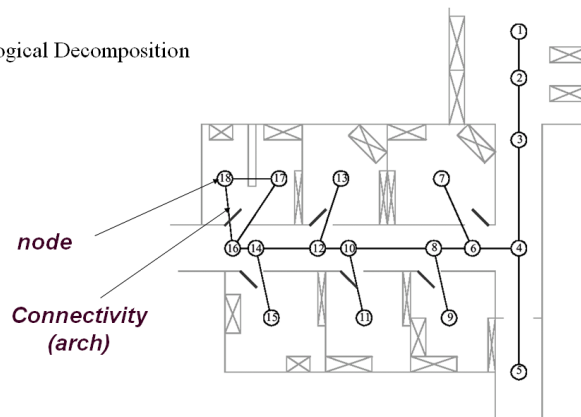
## RMA: Tipos de Mapas

### 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

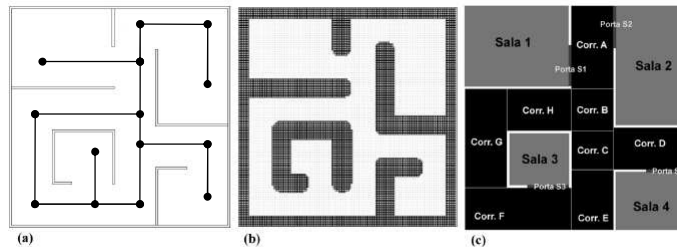
© R. Siegwart, J. Nourbakhsh

## 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

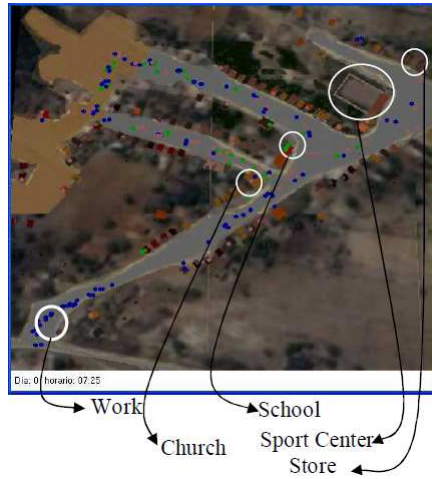
### Mapa Semântico

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

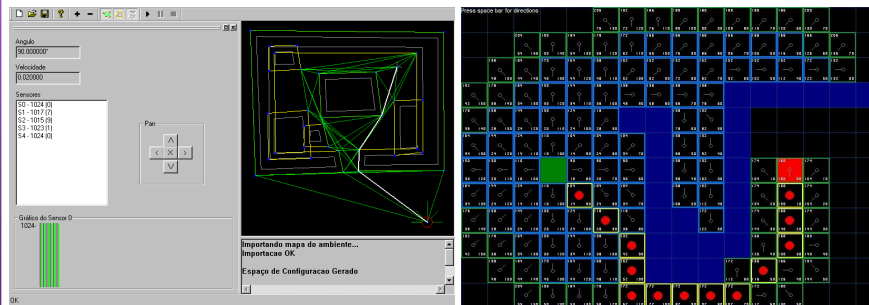
## RMA: Navegação com Mapas

### 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



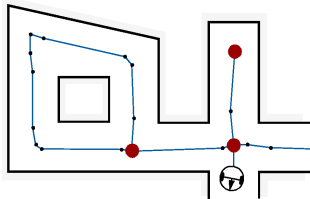
42


Maio 2009

# Path Planning Overview

## 1. Road Map, Graph construction

- Identify a set of routes within the free space

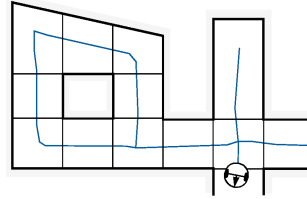


- Where to put the nodes?
- Topology-based:
  - at distinctive locations 
- Metric-based:
  - where features disappear or get visible



## 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**