



Aula 7 – Robótica Móvel

Mapeamento

Prof. Assoc. Marcelo Becker

SEM - EESC - USP

Laboratório de Robótica Móvel

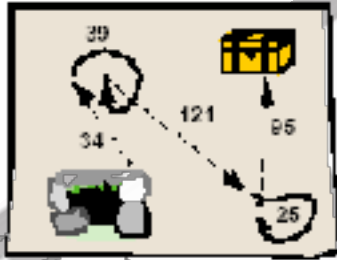
LabRoM

Sumário da Aula

- **Tipos de Mapas**
- Mapeamento 2D
- Mapeamento 3D
- Implementação
- Bibliografia Recomendada

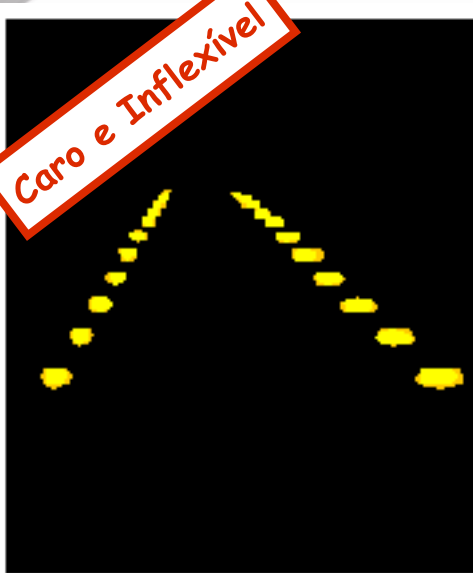
Métodos de Representar e Modelar Ambientes

Não Aplicável



Mapa do Tesouro

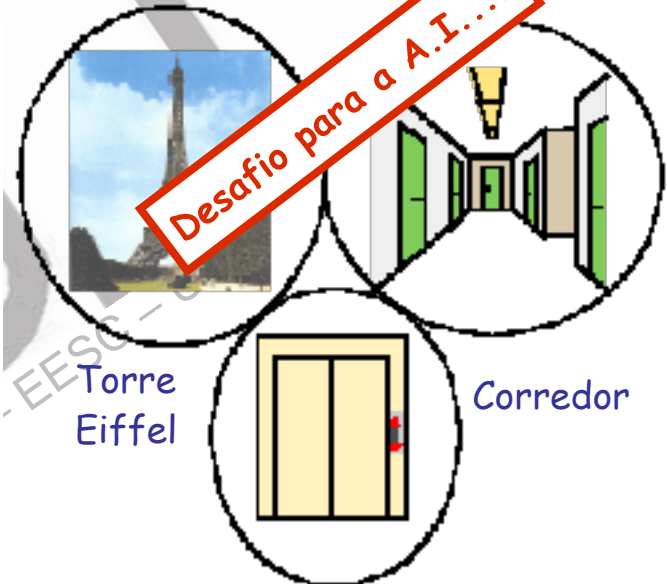
Odometria



Pista de Pouso à Noite

Modificar Ambientes - Marcas

Caro e Inflexível



Torre Eiffel

Corredor

Porta de Elevador

Reconhecimento de Características

Desafio para a A.I....

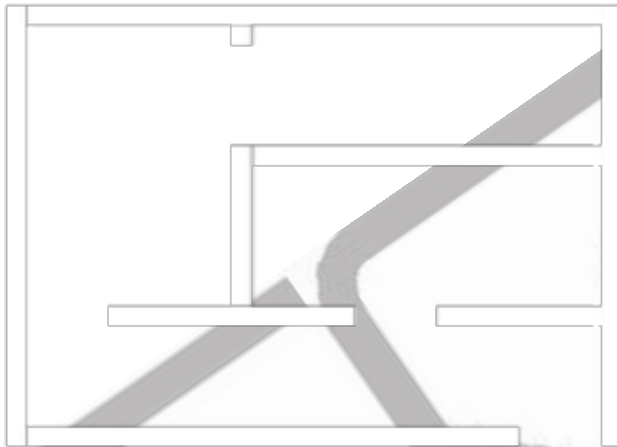
Mapeamento

- **Mapa Métrico:** Informações Detalhadas
 - Desenhos tipo CAD
 - Características Métricas do Ambiente
- **Mapa Topológico:** planejamento de trajetórias grosseiro
 - Nós
 - Arcos
- **“Grid Map”**
 - Probabilidades – planejamento de trajetórias detalhado

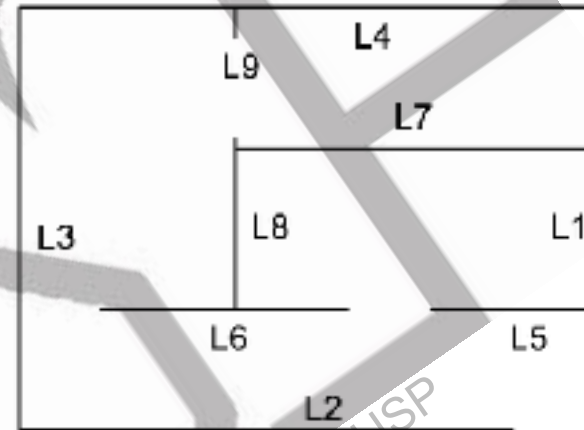
Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Mapas

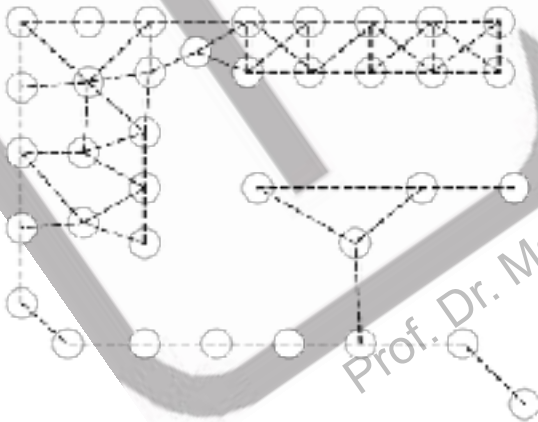
Ambiente



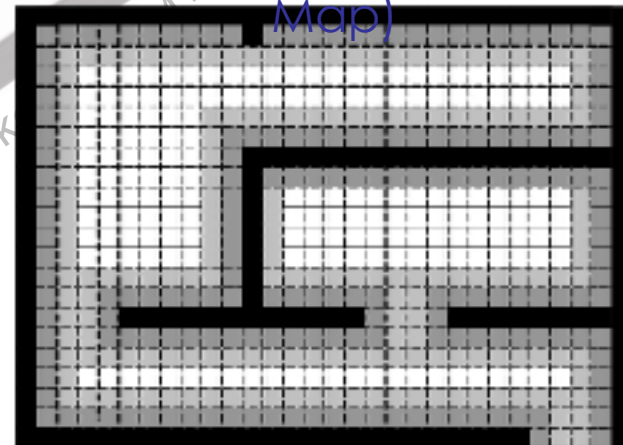
Mapa Métrico



Mapa Topológico

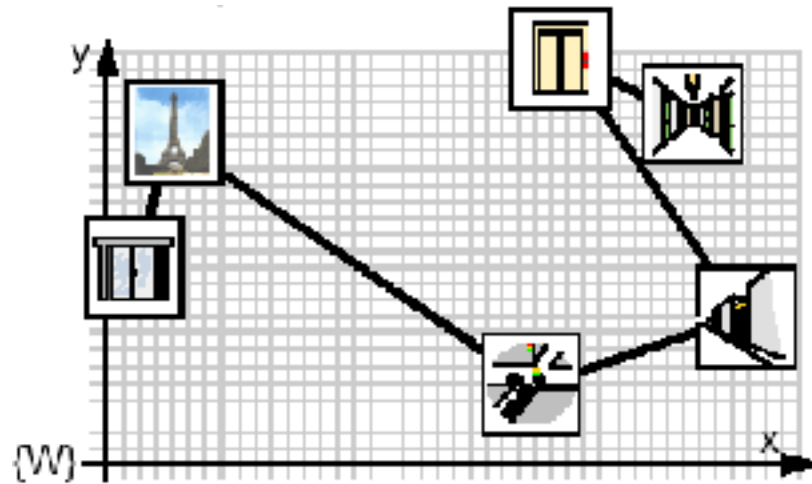


Mapa Probabilístico (Grid Map)

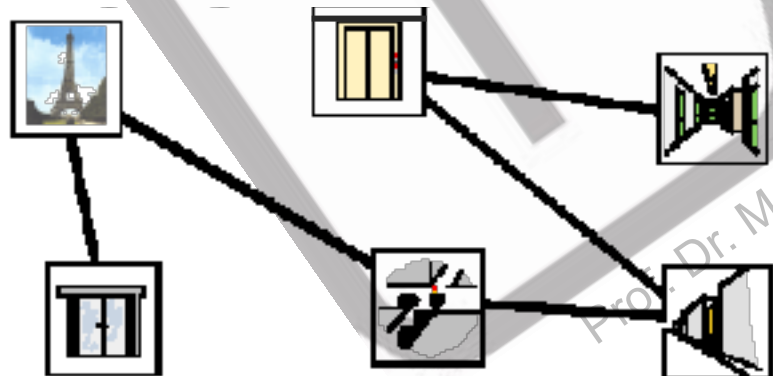


Mapeamento

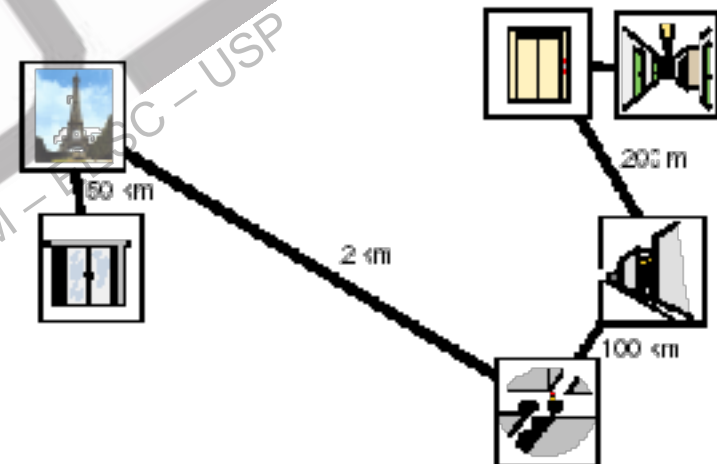
Mapa Métrico



Mapa Topológico

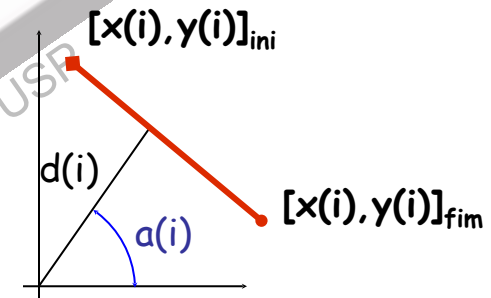
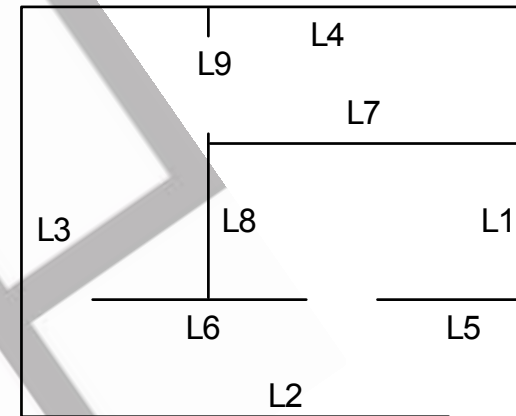


Mapa Métrico-Topológico



Mapa Métrico

- Representação Compacta – Relações Geométricas do Ambiente
- Linhas ou arcos são os elementos mais comuns – mas podem ser usadas quaisquer figuras geométricas
- Boa ferramenta se o ambiente é completamente conhecido...
- Pode ser difícil de implementar o planejamento de trajetórias

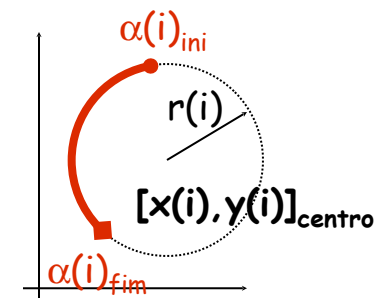


Parâmetros Típicos para representar segmentos de reta

$$L_i = (d(i), \alpha(i), x(i)_{ini}, y(i)_{ini}, x(i)_{fim}, y(i)_{fim})$$

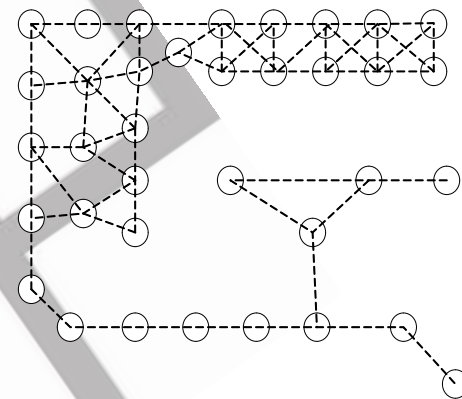
Parâmetros Típicos para representar arcos

$$A_i = (r(i), \alpha(i)_{ini}, \alpha(i)_{fim}, x(i)_{centro}, y(i)_{centro})$$

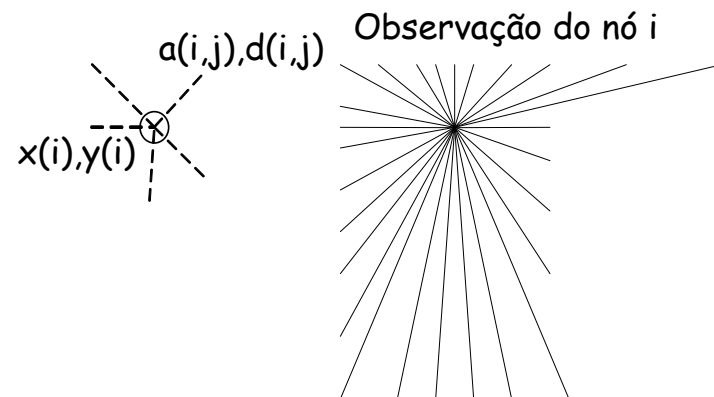


Mapa Topológico

- Nós e Arcos – relações relativas entre os nós
- Boa ferramenta para planejamento de trajetórias
- As Trajetórias são planejadas de acordo com alguma função que deve ser minimizada
- Difícil de implementar um planejamento detalhado de Trajetórias



Componentes Típicos de um Nó

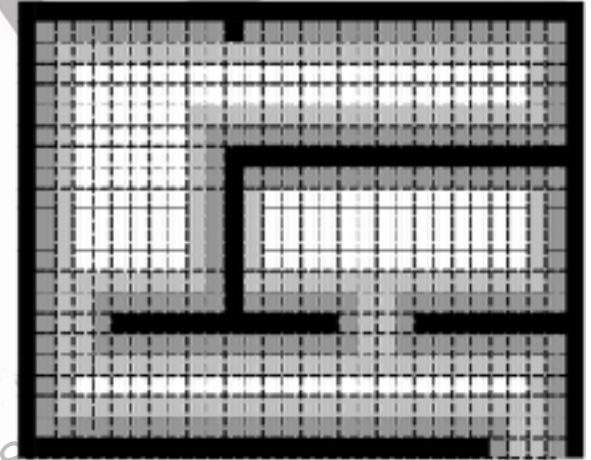


Mapa Probabilístico (*Grid Map*)

- Representação Discreta do “mundo” (ambiente)
- Consome muita memória
- Bom para planejamento detalhado de trajetórias
- Fácil de incorporar diferentes leituras de diferentes sensores
- Robusto contra ruído de sensores
- O ambiente deve ser conhecido...

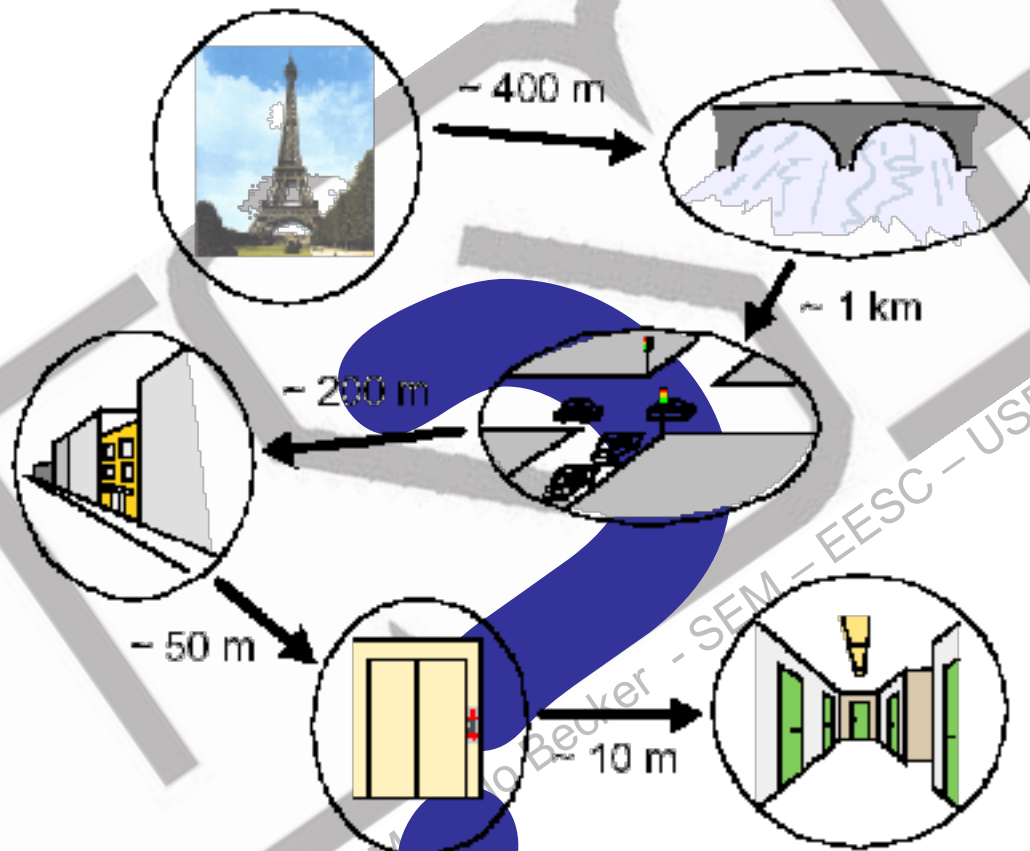
Cada célula do grid (x,y): $p_{x,y} = [0,1]$

O número de células pode se tornar muito grande. Por exemplo, um ambiente de 100 x 200 m com um mapa de resolução de 5 cm terá 8 milhões de células (cada qual com 2 valores...).



Hans P. Moravec & A.E. Elfes, 1985

Navegação Humana



Topológica e sujeita a medidas imprecisas...

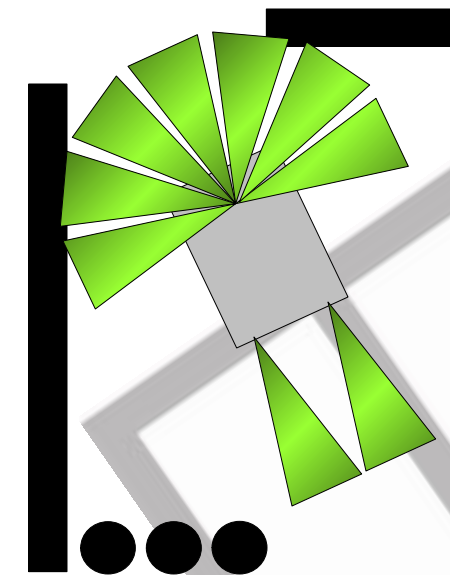
Sumário da Aula

-
- **Mapeamento 2D**
- Mapeamento 3D
- Implementação
- Bibliografia Recomendada

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Em que consiste o Mapeamento?

De modo muito Simplificado!!

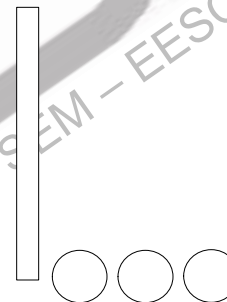


1) O robô observa algo no ambiente...

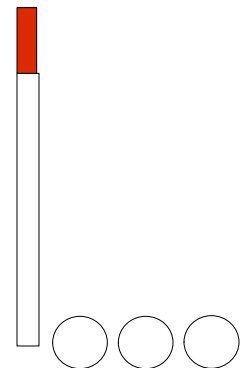
2) Essa nova informação é adicionada ao mapa do ambiente...



Última Observação



Mapa Existente

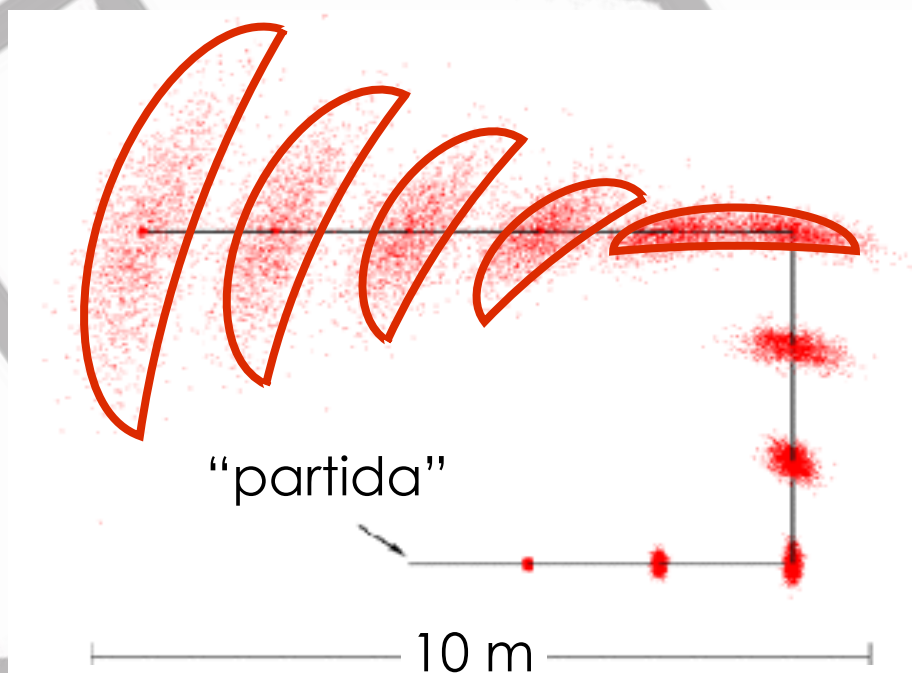


Mapa Atualizado

3) Calcular uma nova trajetória para exploração baseado nas informações atualizadas... ... (1)

Objetivo do Mapeamento

- Produzir e atualizar Mapas dos ambientes “indoor” nos quais o veículo irá se deslocar
- Problema: localização



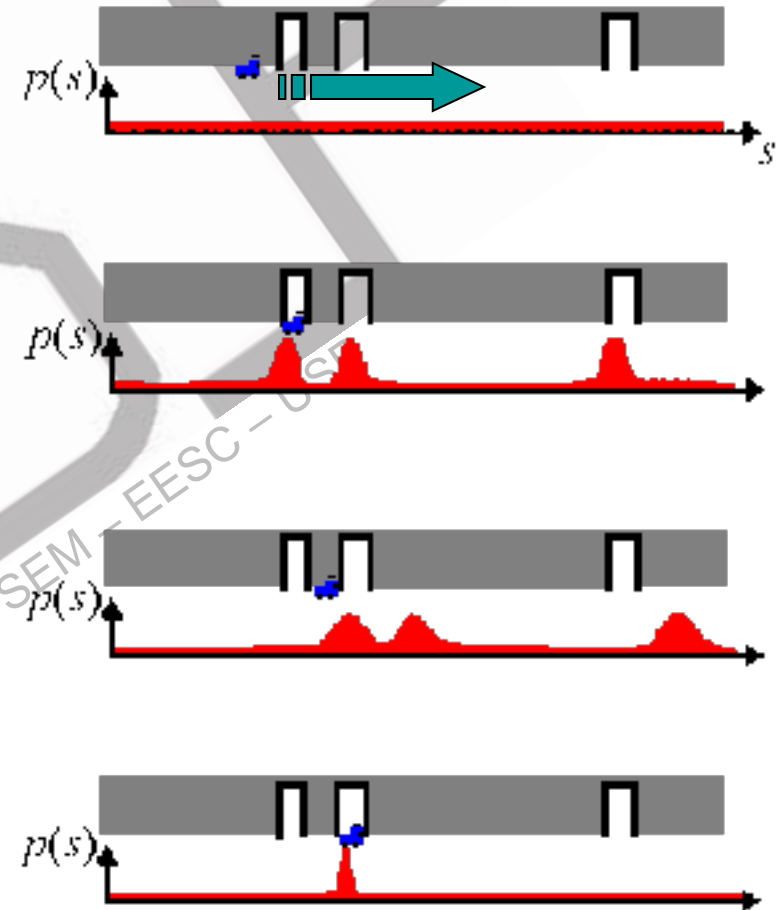
Incertezas

- Por natureza, sujeitos a incertezas
- As incertezas vêm de 4 fatores principais:
 - “aleatoridade”, “imprevisibilidade” do ambiente
 - e do veículo
 - limitações dos sensores, ruídos
 - modelos “inacurados”
- Uso de Paradigmas Probabilísticos e *Fuzzy Logic*
 - capazes de lidar com modelos inacurados
 - capazes de lidar com as imperfeições dos sensores
 - robustos em aplicações reais

Prof. Dr. Marcelone Becker - SEM - EESC - USP

Localização do Robô: Problema Probabilístico

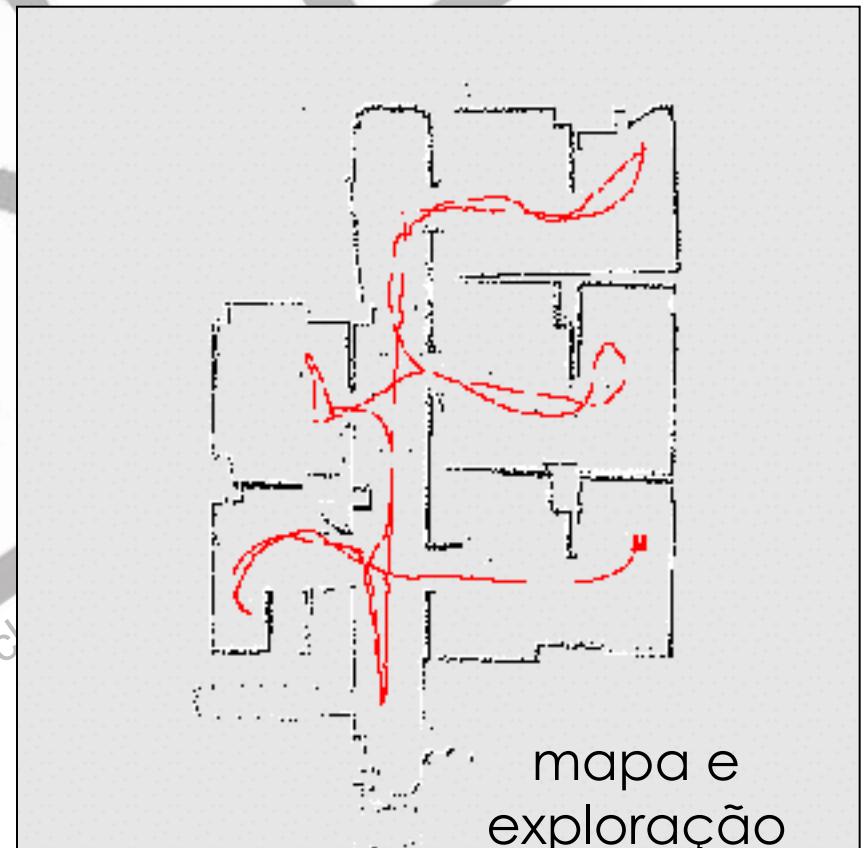
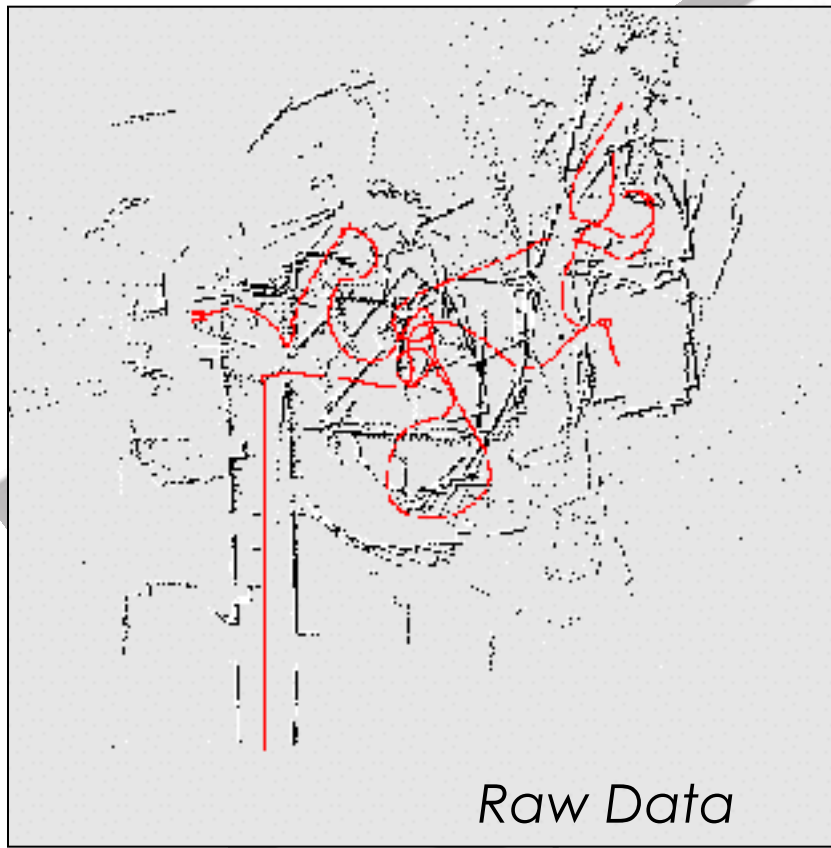
- Incertezas tratadas através de filtros:
 - Filtro de Kalman
 - Filtro de Kalman Extendido
 - Filtro de Partículas
 - ETC.
- Usado para:
 - Mapeamento
 - Localização
 - Modelagem



Problema: Mapeamento e Localização Simultâneos

- Problema do tipo clássico: “*Quem nasceu primeiro, o ovo ou a galinha?*”
 - Mapear sabendo a posição é “*simples*”
 - Localizar-se em um Mapa dado é “*simples*”
 - Porém, fazer ambos simultaneamente é um problema!
- Atualmente, as melhores soluções são as Probabilísticas!

Mapear apenas com odometria



S.Thrun - CMU

Mapear apenas com odometria

mapa e
exploração

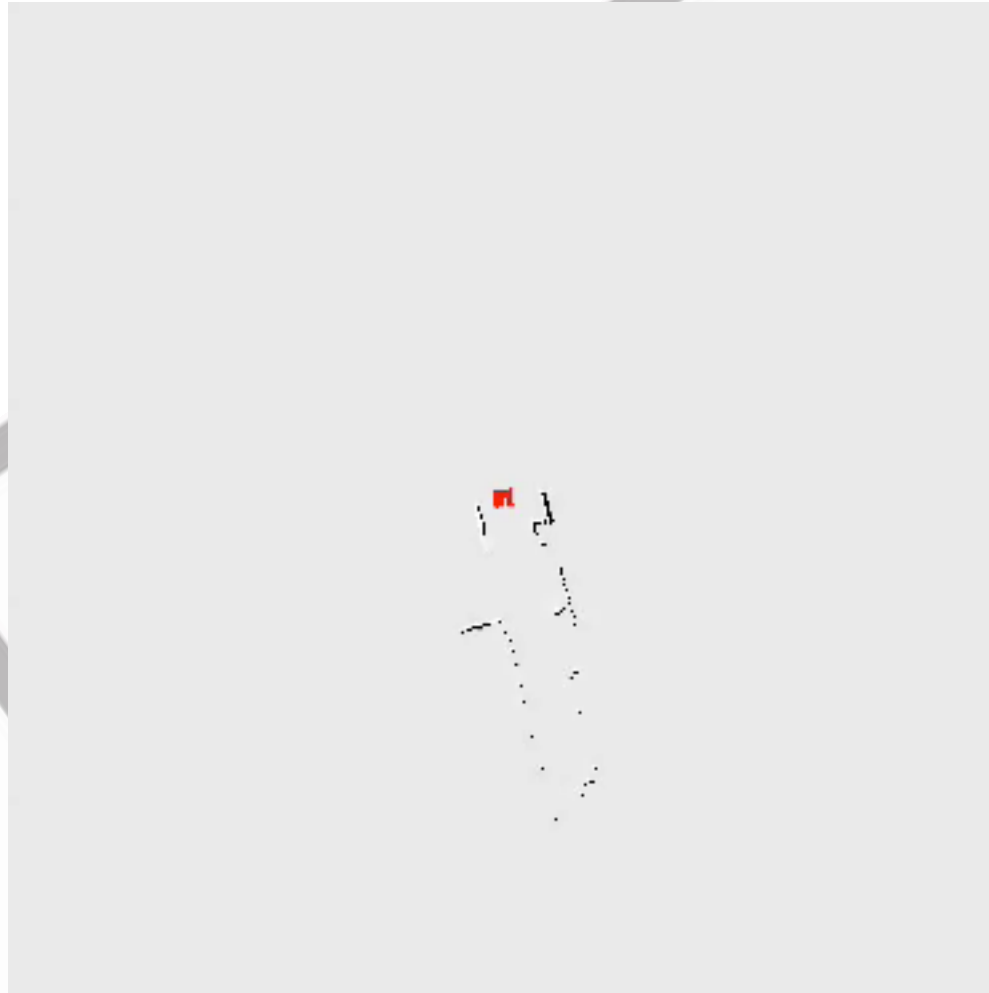


Raw Data

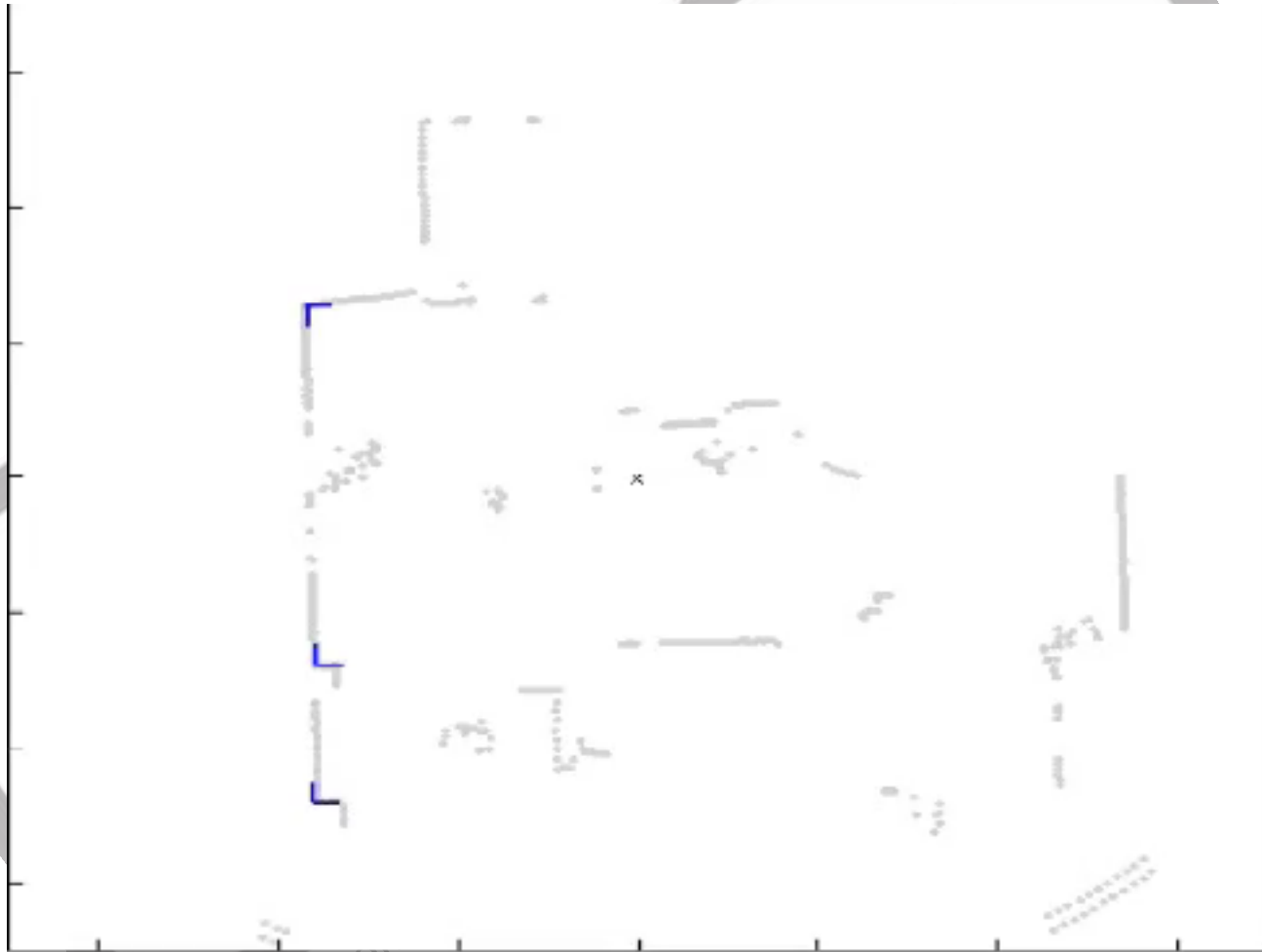


Intel research Lab - USA

Exemplo de Mapeamento



Exemplo de Mapeamento

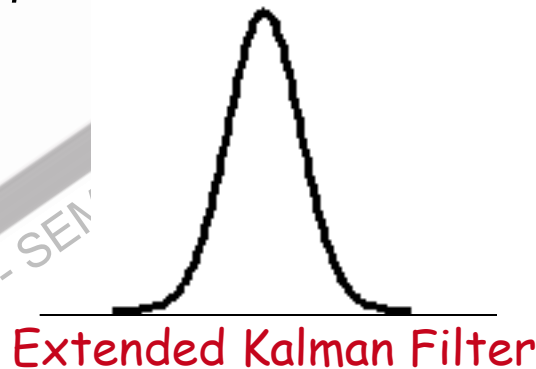


ASL@EPFL

Como fazer o Mapeamento?

- Estimativa da posição
 - ~~– LS - Least Square~~
 - ~~– ML - Maximum Likelihood~~
 - EKF - Extended Kalman Filter

EKF é muito empregado para resolver problemas de localização em diversas aplicações em robótica, navegação de aeronaves, foguetes, satélites, mísseis, etc.



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

Desvantagens do EKF

- Propriedades estatísticas do processo e dos ruídos das medidas
- Armazenar os passos anteriores para serem utilizados na “nova” estimativa de posição.
- ☹️ Simplificações podem introduzir “*graus de liberdade*” no Filtro resultando em um aumento nas incertezas da posição do veículo e das características extraídas.

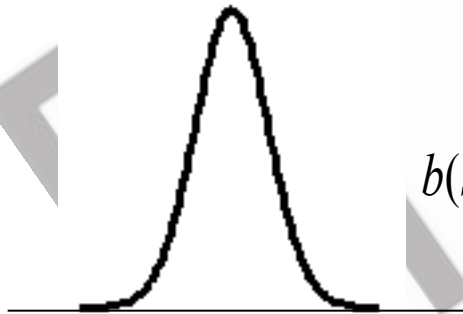
Como fazer o Mapeamento?

- Mapeamento Métrico Estocástico
 - *Stochastic Map*
 - [Smith et al. 90]
 - Usa o EKF para estimar as posições
 - Vetor de estado representa as estimativas de posicionamento do veículo e dos elementos
 - Uma matriz covariância de erro associada, representa as incertezas destas estimativas
 - Inclui tanto as correlações entre os estados do veículo e cada *features*, como também as correlações entre os elementos

Problema:

Mapeamento Estocástico e EKF

- $(N+3)^2$ distribuições Gaussianas
- A dimensão da matriz cresce a cada novo “elemento”
- *Row Data* -> *Features*



$b(s_t, m) =$

$$\begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_N \\ x \\ y \\ \theta \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \begin{matrix} \sigma_{l_1}^2 & \sigma_{l_1 l_2} & \cdots & \sigma_{l_1 l_N} \\ \sigma_{l_1 l_2} & \sigma_{l_2}^2 & \cdots & \sigma_{l_2 l_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{l_1 l_N} & \sigma_{l_2 l_N} & \cdots & \sigma_{l_N}^2 \end{matrix} & \begin{matrix} \sigma_{l_1 x} & \sigma_{l_1 y} & \sigma_{l_1 \theta} \\ \sigma_{l_2 x} & \sigma_{l_2 y} & \sigma_{l_2 \theta} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{l_N x} & \sigma_{l_N y} & \sigma_{l_N \theta} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \sigma_{l_1 x} & \sigma_{l_2 x} & \cdots & \sigma_{l_N x} \\ \sigma_{l_1 y} & \sigma_{l_2 y} & \cdots & \sigma_{l_N y} \\ \sigma_{l_1 \theta} & \sigma_{l_2 \theta} & \cdots & \sigma_{l_N \theta} \end{matrix} & \begin{matrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{x\theta} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{y\theta} \\ \sigma_{x\theta} & \sigma_{y\theta} & \sigma_\theta^2 \end{matrix} \end{pmatrix}$$

Problema:

Mapeamento Estocástico e EKF

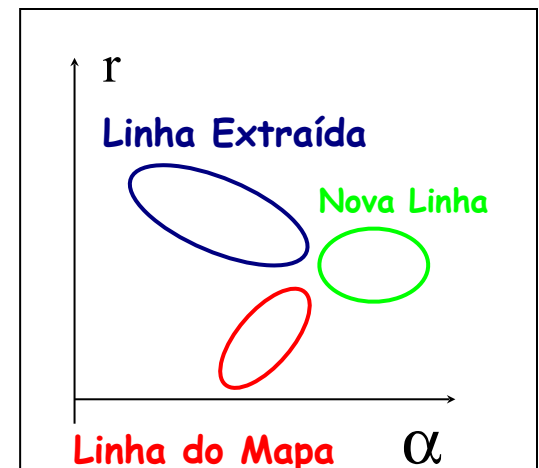
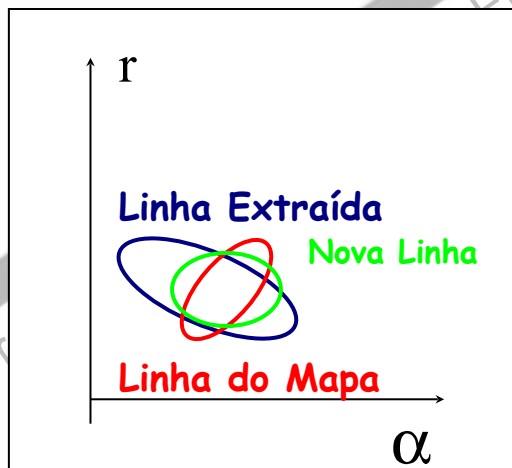
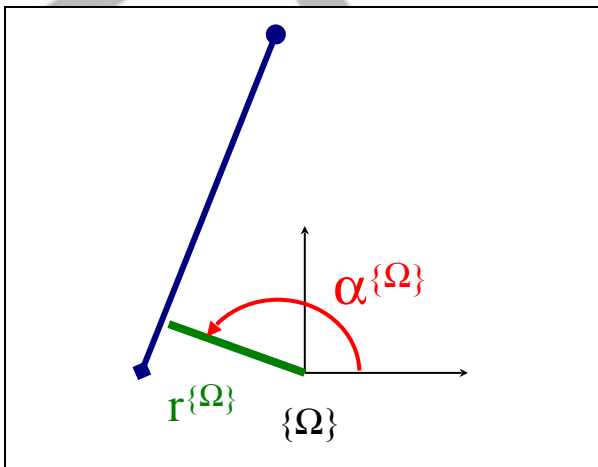
- Conseqüências de Simplificações no EKF:
 - Um número menor de elementos na matriz
 - Ambientes complexos:
 - aumento das incertezas de posição
 - deformações
 - rotações e/ou translações dos elementos do mapa
 - As interdependências entre os elementos do mapa estão sendo desconsideradas

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Implementação

SmartROB-2, IfR-ETHZ

- Ambiente modelado em 2D - extração de *features*
- EKF simplificado
 - ~~– Elementos cruzados~~
 - Elementos da diagonal principal
- *Matching*, fusão e atualização no espaço $(r-\alpha)$

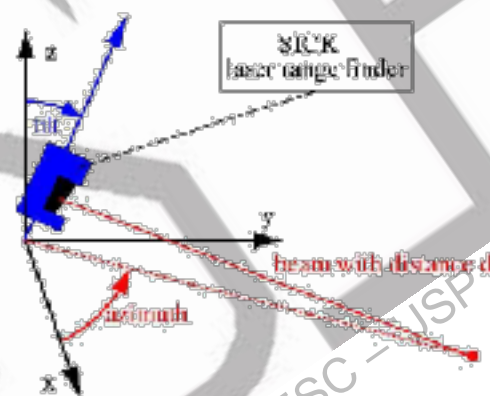
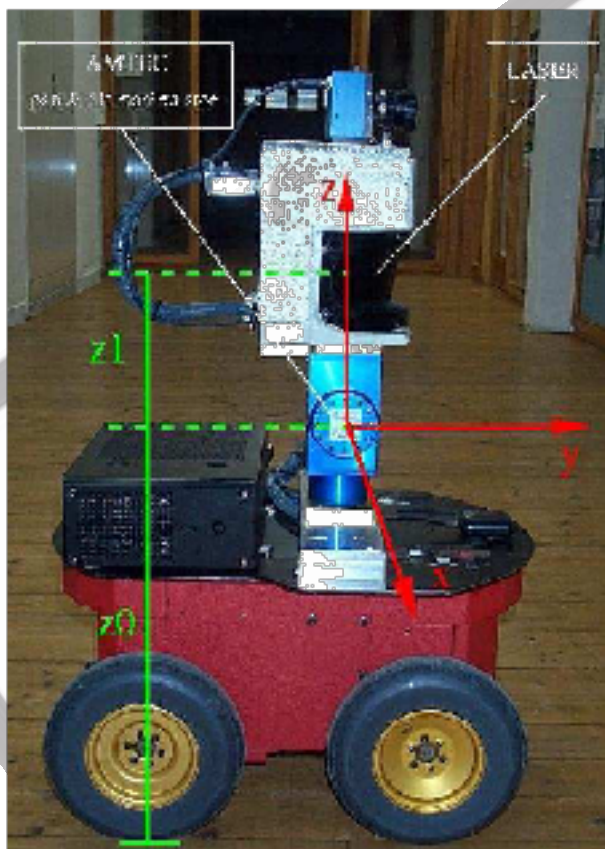


Sumário da Aula

- Introdução
- Mapeamento 2D
- **Mapeamento 3D**
- Implementação
- Bibliografia Recomendada

Mapeamento 3D

- Aquisição de dados



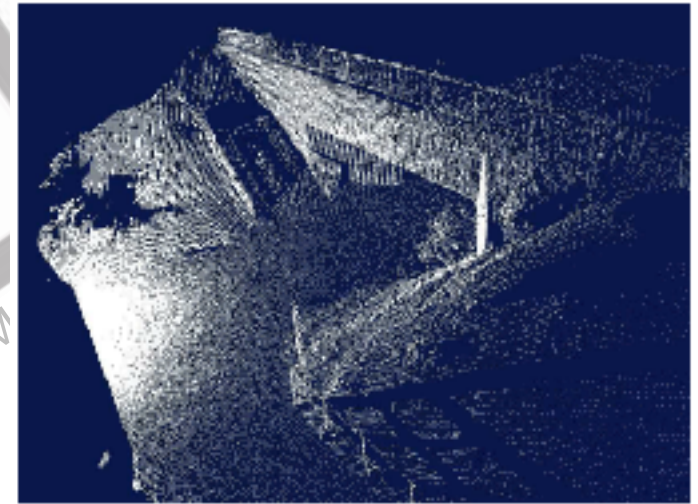
$\alpha = \text{azimuth}$

$\gamma = \text{tilt}$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) z_1 \\ \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) z_1 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) z_1 + z_0 \end{pmatrix}}_{\text{range of the range finder}} + d \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \\ -\sin(\alpha) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \end{pmatrix}$$

Mapeamento 3D

- Formas de representação típica:
 - Coleção de todos os pontos medidos
 - 200K pontos (pouco útil para navegação)
 - Grid 3D
 - Alta acurácia
 - Dispendioso (processamento e memória)
 - Grid 2D
 - Baixo custo (aproximação)
 - Bom para navegação
 - Extração de Superfícies



Mapeamento 3D

- Atualização de Mapas de Áreas Externas:



Kalman filter equations

z_t = measurement at time t

μ_t = estimated elevation at time t

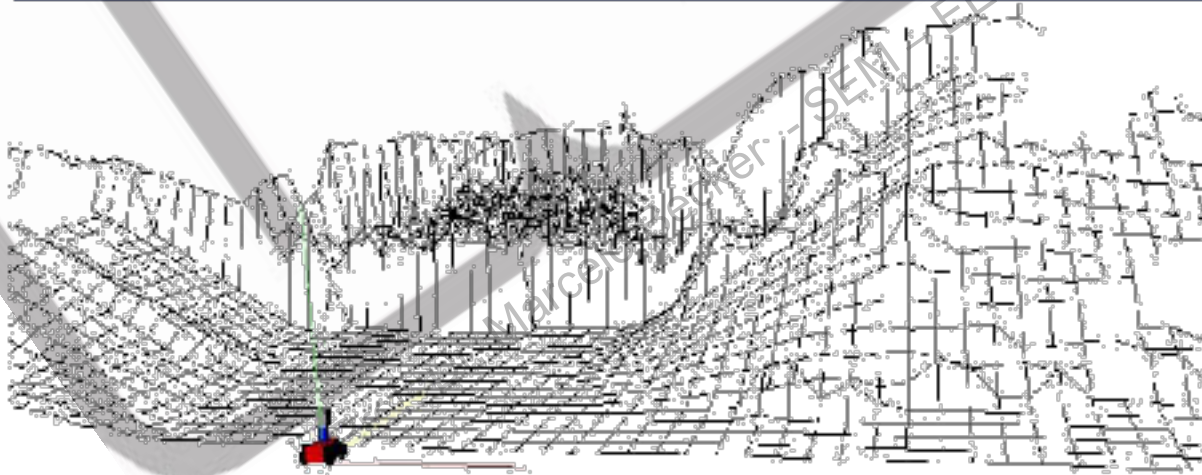
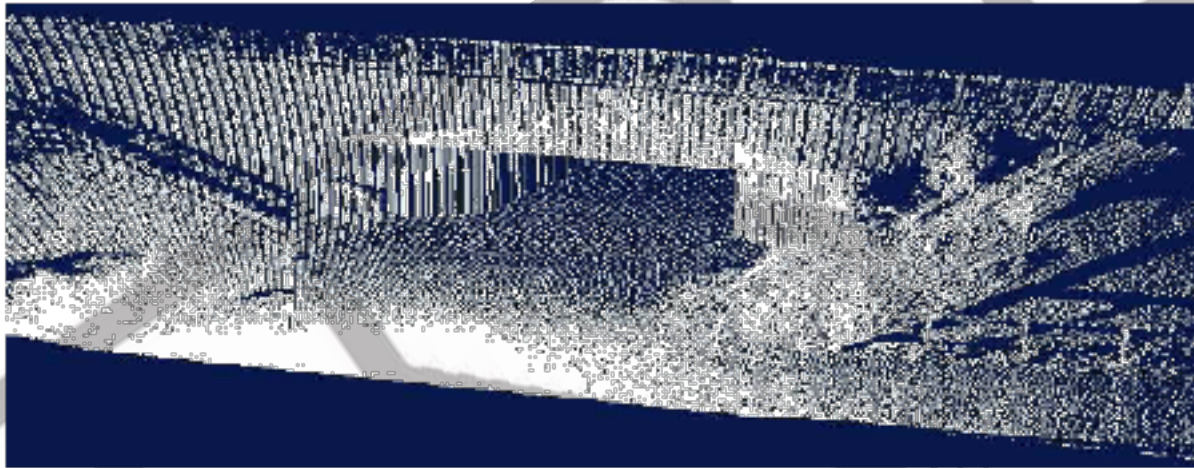
σ_{1t} = std. deviation at time t

$$\mu_{1t} = \frac{\sigma_t^2 \mu_{1,t-1} + \sigma_{1,t-1}^2 z_t}{\sigma_{1,t-1}^2 + \sigma_t^2}$$

$$\sigma_{1t}^2 = \frac{\sigma_{1,t-1}^2 \sigma_t^2}{\sigma_{1,t-1}^2 + \sigma_t^2}$$

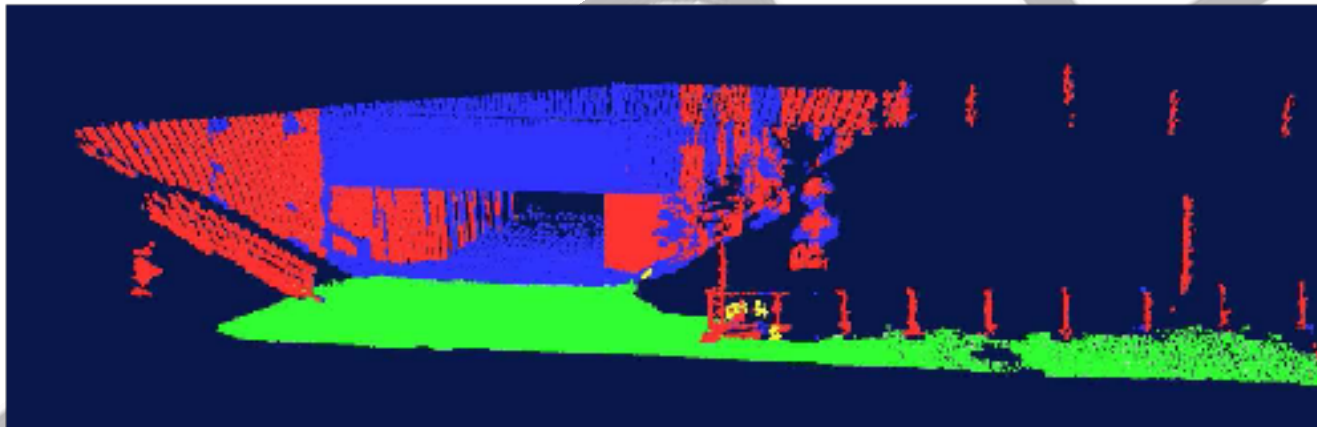
Mapeamento 3D

- Mapa Típico de Elevação:

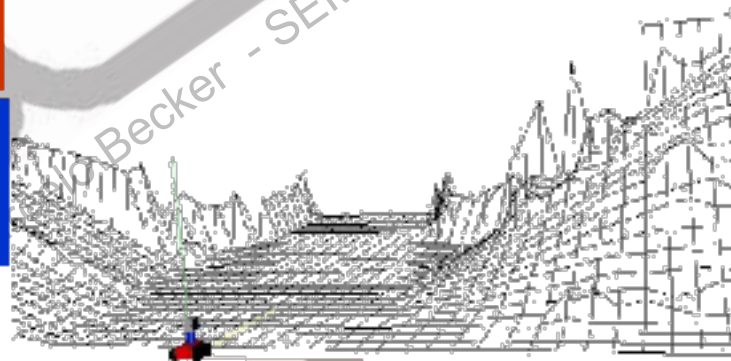


Mapeamento 3D

- Mapa Elevação Pós-processado:

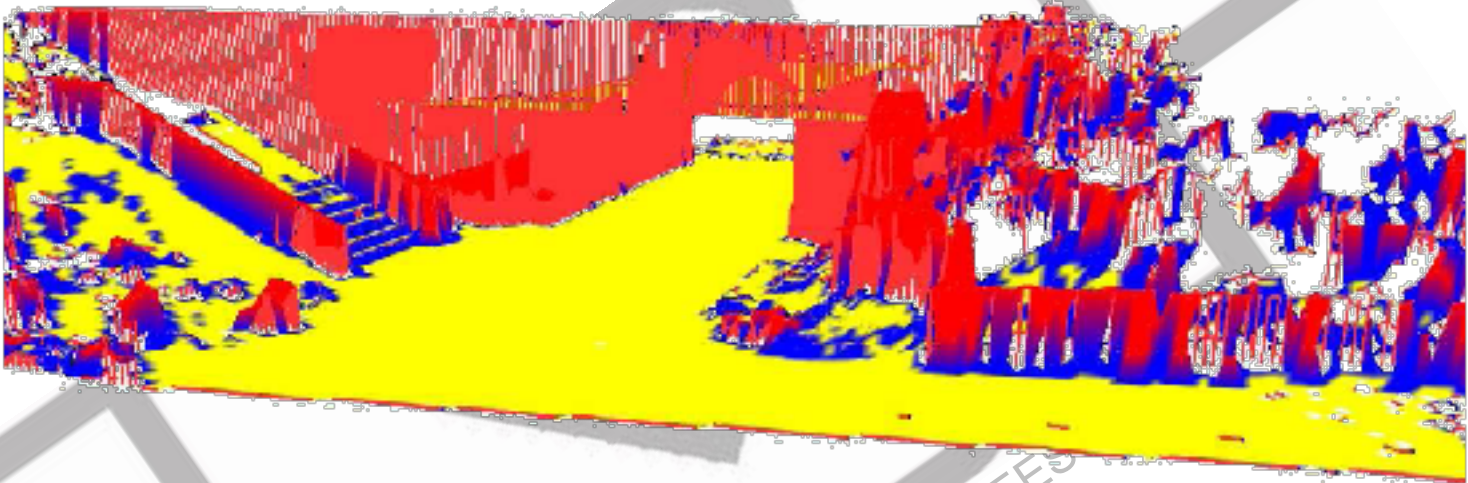


- Traversable cells
- Cells with vertical objects
- Cells with a big vertical gap e.g., windows, bridges, door frames
- Non traversable cells, seen from above



Mapeamento 3D

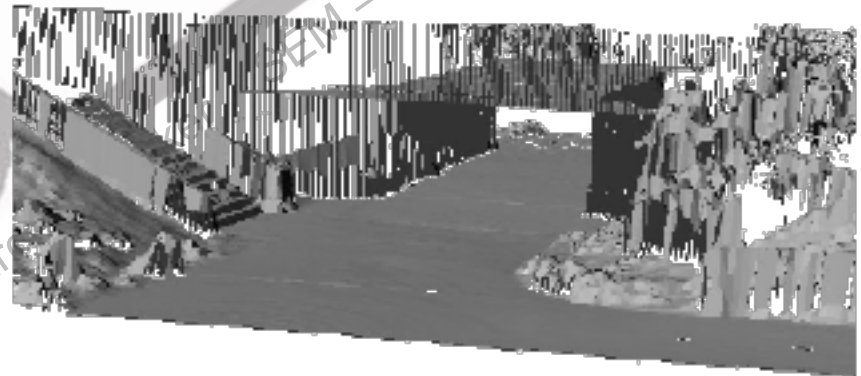
- Mapa com Múltiplas Superfícies (MLS):



- Traversable Surface Patches

- Cells with vertical objects

- Non traversable Surface Patches



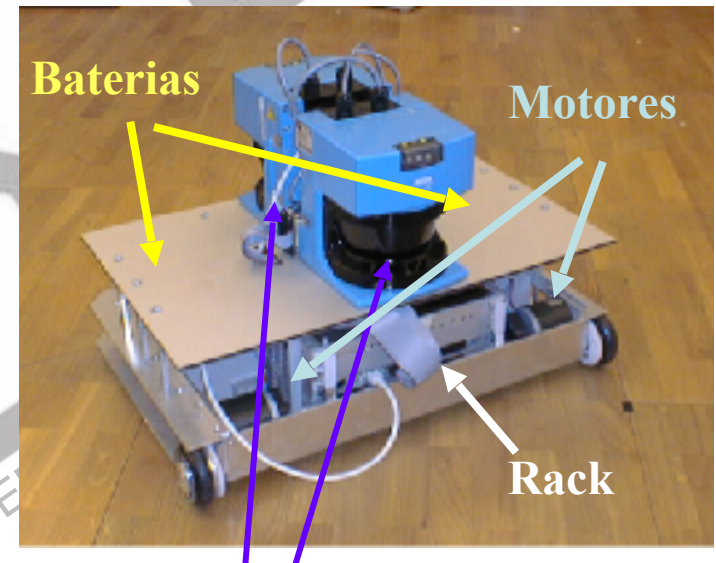
Sumário da Aula

- Introdução
- Ambiente 2D
- Ambiente 3D
- **Implementação**
- Bibliografia Recomendada

Implementação

SmartROB-2, IfR-ETHZ

- Plataforma: SmartROB-2
 - 0,60 x 0,35 x 0,40 m, 20 kg
 - Acionamento diferencial
 - 2 SICK LMS200
 - cobertura de 360°
 - resolução de 2°
 - erro radial $< \pm 20$ mm (50 m)
 - XOberon
 - tempo real
 - orientado a objeto
 - *Wireless*



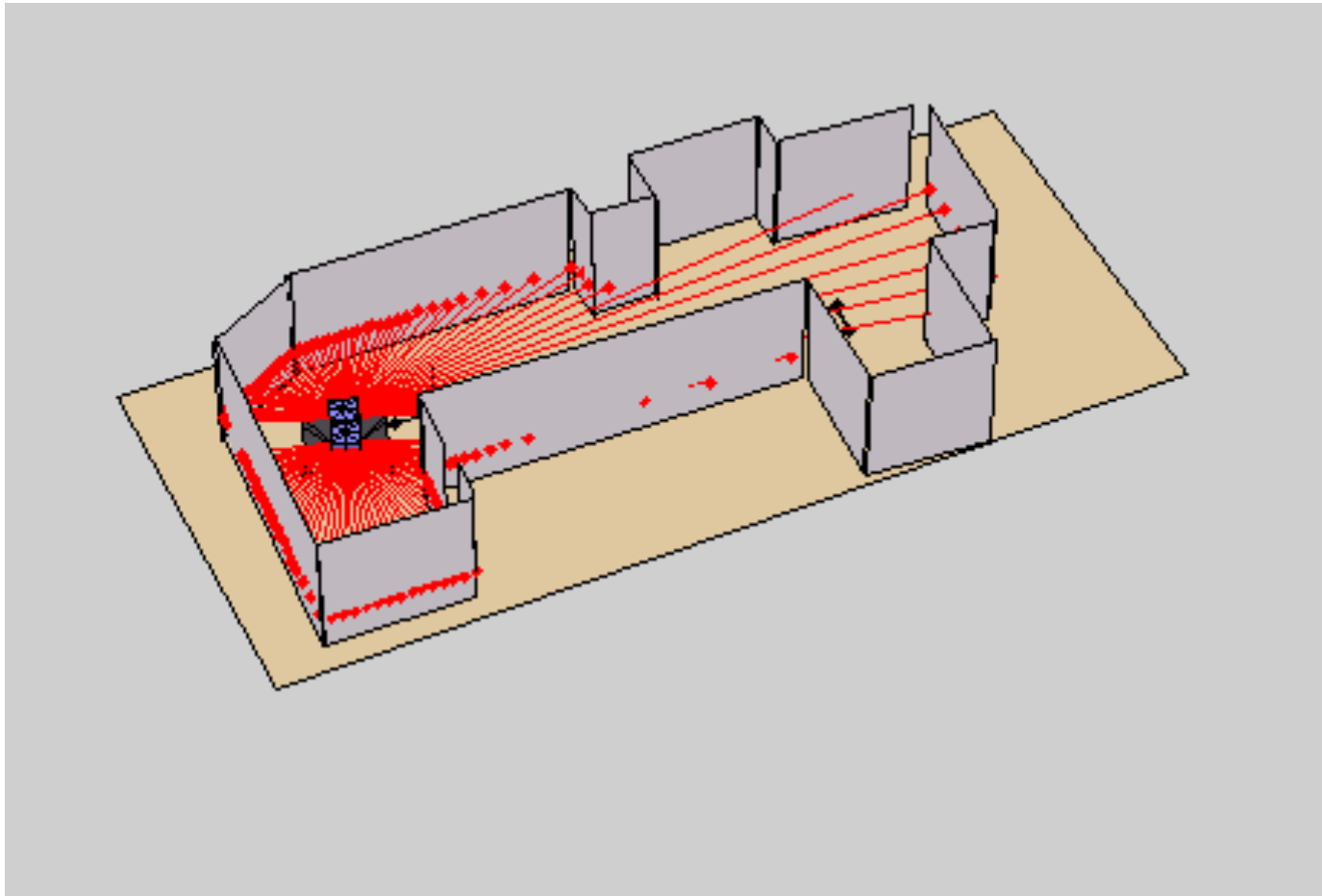
2 sensores Laser SICK LMS200

Prof. Dr. Marcelo Becker - SE

Mapeamento de Ambiente Estreitos

Visualização em 3D

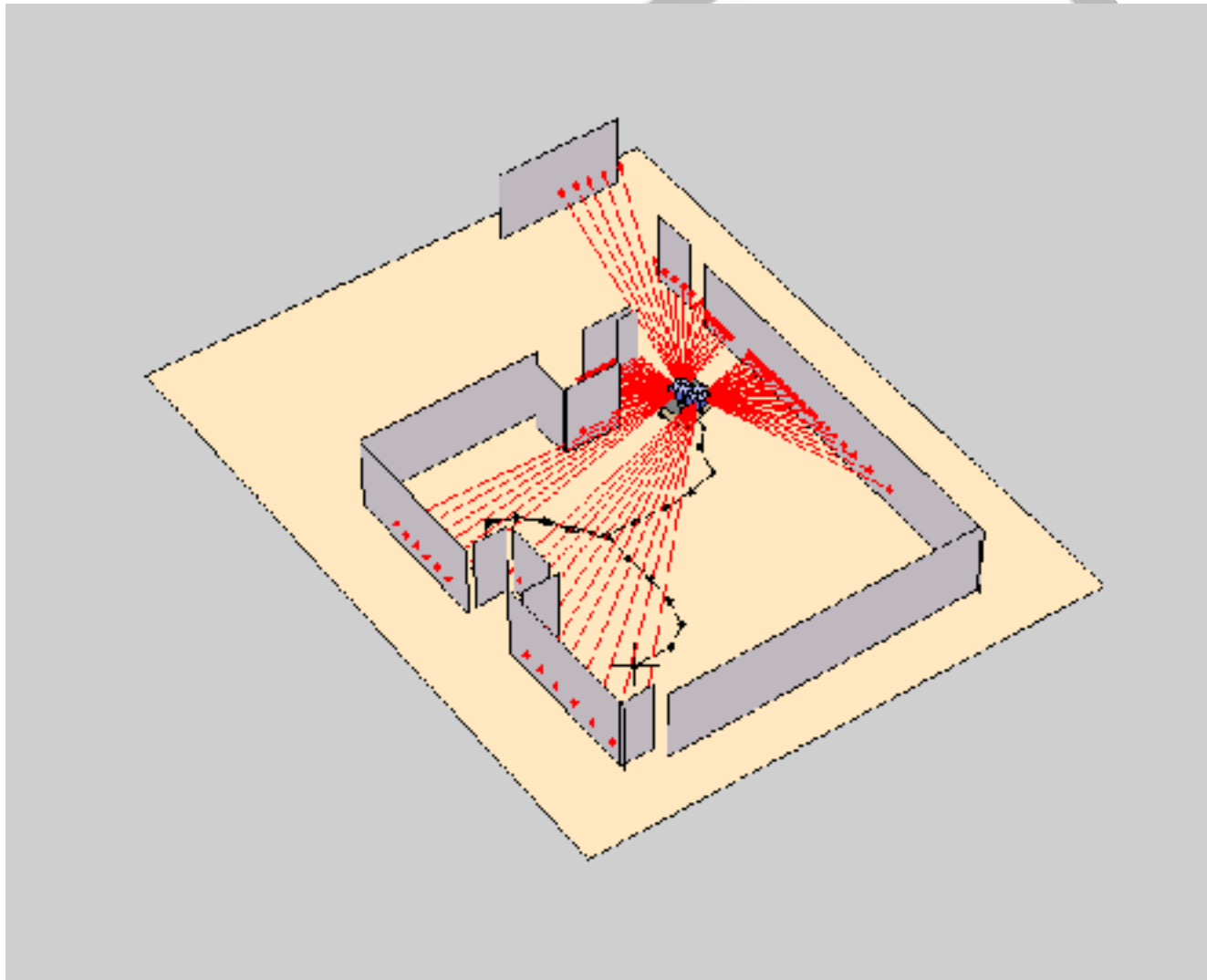
IfR – ETH, 1999



Mapeamento de Ambientes Largos

Visualização em 3D

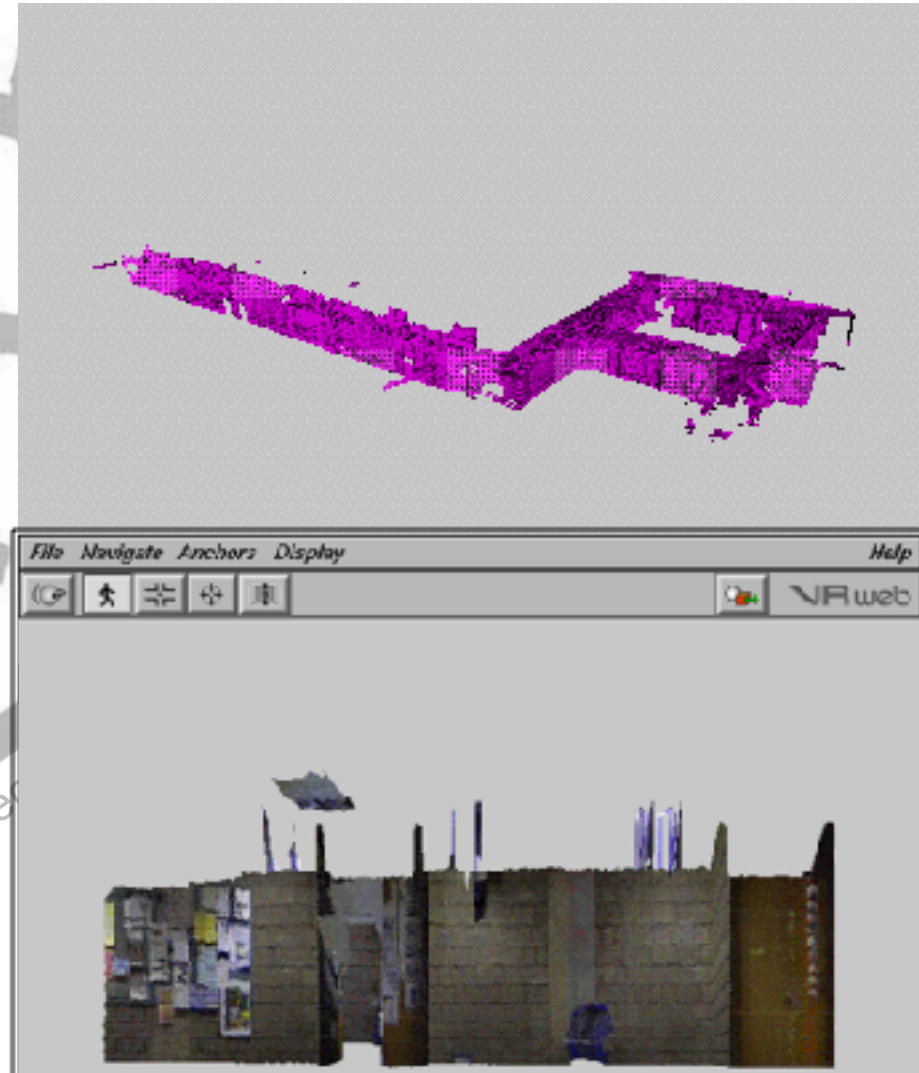
IfR – ETH, 2000



Mapeamento de Ambiente 3D

Visualização em 3D

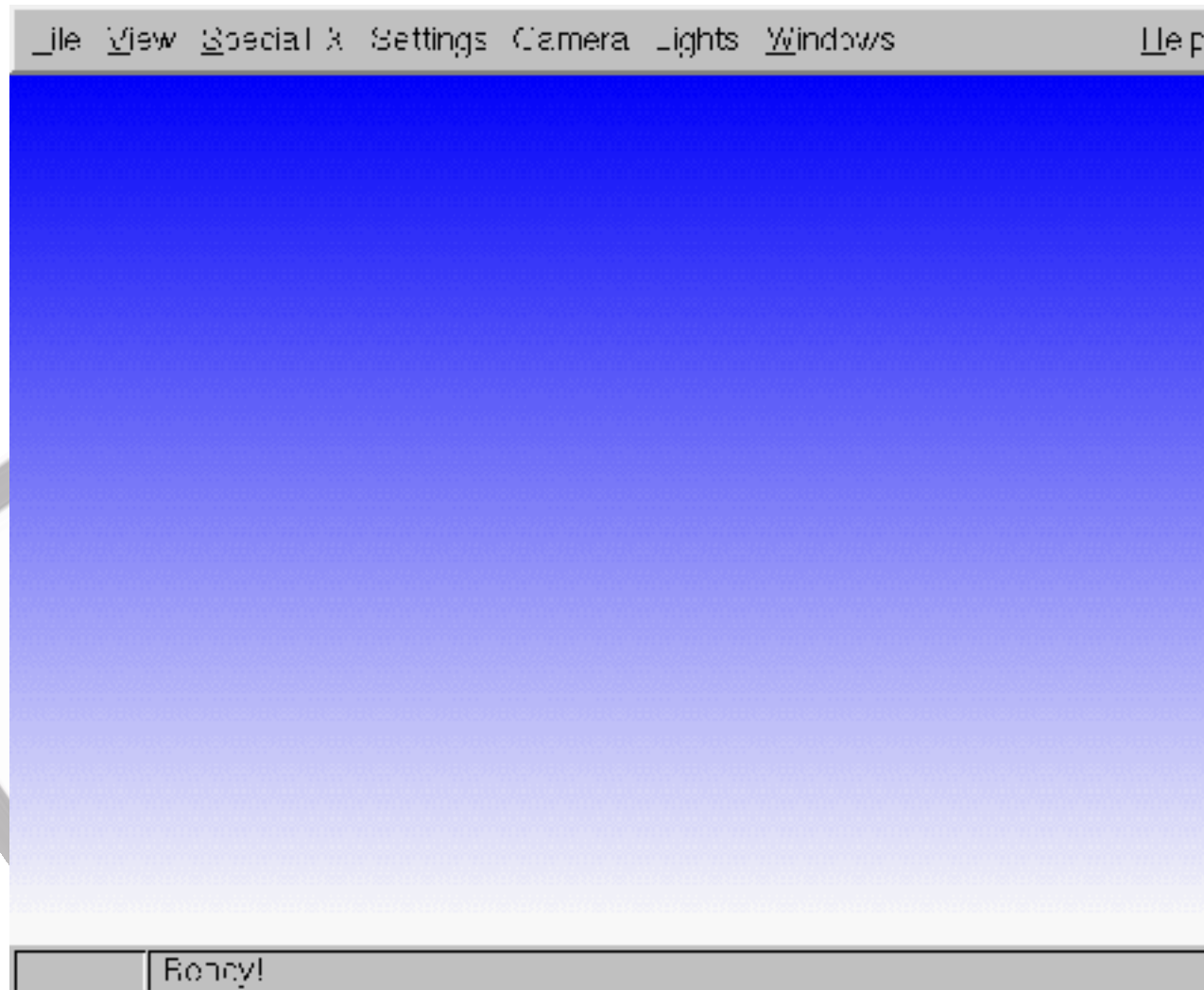
S.Thrun - CMU



Mapeamento de Ambiente 3D

Visualização em 3D

S.Thrun - CMU



Mapeamento de Ambiente 3D

Visualização em 3D

S.Thrun - CMU



Mapeamento de Ambiente 3D

Visualização em 3D

CMU



Mapeamento de Ambiente 3D

Visualização em 3D

CMU



Prof. Dr. Marcelo

Sumário da Aula

- Introdução
 - Desenho 2D
 - Desenho 3D
 - Implementação
- **Bibliografia Recomendada**

Bibliografia Recomendada

LIVROS

- SIEGWART, R. and NOURBAKHS, I. ***Introduction to Autonomous Mobile Robots***. MIT Press, 2004.
- MURPHY, R. R. ***Introduction to AI robotics***. MIT Press, 2000.
- EVERRET, H. R. ***Sensors for mobile robots: theory and application***. A. K. Peters Ltd: Natick, Massachusetts, USA, 1995.
- BEKEY, G. A. ***Autonomous Robots: From biological inspiration to implementation and control***. MIT Press: Cambridge, Massachusetts, USA, 2005.

Prof. Dr. Marcelo Becker

Bibliografia Recomendada

LIVROS

- WILLIAMS, K. ***Insectronics: build your own walking robot.*** McGrawHill: New York, 2003.
- BREAZEAL, C. L. ***Desinging socialible robots.*** MIT Press: Cambridge, Massachusets, 2002.
- KACHROO, P. and MELLODGE, P. ***Mobile robotic car design.*** McGrawHill: New York, 2005.
- DORIGO, M. and COLOMBETTI, M. ***Robot shaping.*** MIT Press: Cambridge, Massachusets, 1998.

Bibliografia Recomendada

SITES

- <http://www.mobilerobots.org>
- <http://www.sri.com/news/storykits/>
- <http://groups.csail.mit.edu/lbr/genghis/>
- <http://www.stanford.edu/~learnest/cart.htm>
- <http://www.asl.ethz.ch>
- <http://www.euron.org/>
- <http://www.bluebotics.com/>
- <http://www.inuktun.com/>
- <http://www.service-robots.org>
- <http://world.honda.com/ASIMO/history/>
- <http://world.honda.com/HDTV/ASIMO/>
- <http://robotics.usc.edu/~avatar/>

Bibliografia Recomendada

SITES

- <http://www.e-puck.org/>
- <http://www.swarm-bots.org>
- http://brl.ee.washington.edu/Research_Past/Biologically_Based/Biologically_Based_Index.html
- http://www.esa.int/home-ind/ESA-Article-fullArticle_par-17_1054042928063.html
- <http://www.neurotechnology.neu.edu/latmaneuvering.html>
- <http://eap.jpl.nasa.gov>
- <http://www.ias.uwe.ac.uk/energy-autonomy.htm>

Bibliografia Recomendada

SITES

- <http://web.mit.edu/spotlight/archives/troody.html>
- <http://omconsults.net/Bot/Mecanum.htm>
- <http://www.airtrax.com/vehicles/sidewinder.html>
- <http://www.msl.ricmu.edu/projects/ballbot>
- http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/3D_hopper/3D_hopper.html

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM-EESC-USP

Bibliografia Recomendada

NOTAS DE AULA

- **Siegwart, R.** (ETHZ - Suíça):
<http://www.mobilerobots.org>
- **Simões, A. S.** (UNESP - Brasil):
<http://www.sorocaba.unesp.br/professor/assimoes/rm/index.html>
- **Zufferey, J-C.** (EPFL - Suíça):
<http://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=261>