

Introdução à Robótica Móvel

Geovany Araujo Borges

Grupo de Instrumentação, Controle e Automação (GICA)
Grupo de Automação, Robótica e Visão Computacional (GRAV)
Grupo de Processamento Digital de Sinais (GPDS)

Departamento de Engenharia Elétrica.
Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília
e-mail: gaborges@ene.unb.br

Junho, 2005



Universidade de Brasília, Brasil.

Plano da apresentação

- Parte I - Um Panorama da Robótica Móvel
- Parte II - Desenvolvimento de Robôs Móveis
- Parte III - Mercado da Robótica Móvel



Parte I - Um Panorama da Robótica Móvel

- Inserção na Robótica
- Busca por Identidade
- Os Primeiros Robôs Móveis (Terrestres)
- Desenvolvimentos Recentes



Inserção na Robótica

- Inserção inicial na Robótica:
 - Robôs estáticos: indústria de manufatura;
 - Robôs móveis: aplicações de supervisão.
- Modalidades atuais de robôs móveis:
 - Robôs móveis (terrestres):
 - * Robôs a rodas.
 - * Robôs monópodes, bípedes, quadrúpedes, ...
 - * Mímicos da natureza: insetos.
 - * Sem forma definida.

Inserção na Robótica

- Modalidades atuais de robôs móveis:
 - Robôs aéreos (*Unmanned Aerial Vehicles*):
 - * Drones;
 - * Helimodelos robotizados;
 - * Quadrirotores.
 - Robôs sub-aquáticos :
 - * *Remotely Operated Vehicles* (ROVs);
 - * *Autonomous Underwater Vehicles* (AUVs).
 - Micro e nano-robôs.



Busca por Identidade

- Motivações e expectativas de desenvolvimento de robôs móveis:
 - Até os anos 80 (Promessas): Em vinte anos, robôs móveis poderão realizar qualquer tipo de tarefa de forma segura, se comunicar com os humanos e "protegê-los".
 - Anos 90 (Muito trabalho): Grandes desenvolvimentos na área da robótica móvel, com resultados experimentais tanto motivadores como frustrantes. Expansão das modalidades de robôs. Desilusão!
 - 2000 - Atual (Amadurecimento): Mudança de foco, com reforço das seguintes qualidades: assistência, colaboração, tele-operação e entretenimento.

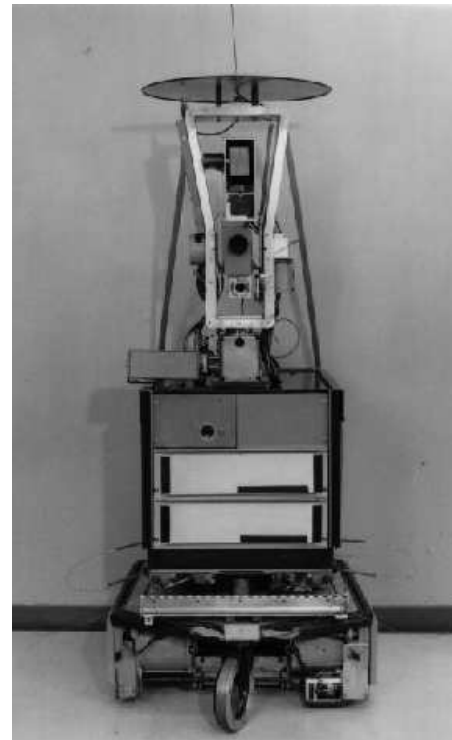
Busca por Identidade

- Áreas de conhecimento envolvidas:
 - Engenharias: concepção mecânica e elétrica, modelamento cinemático e dinâmico, controle e estimação, eletrônica, sensores, atuadores, interferência eletromagnética, processamento digital de sinais, etc.
 - Ciência da computação: algoritmos e estruturas de dados, sistemas operacionais, processamento paralelo, inteligência artificial, etc.
 - Matemática e Estatística: teoria das probabilidades, processos estocásticos, modelamento matemático, curvas parametrizáveis, etc.
 - Humanas: filosofia e psicologia;
 - Multidisciplinares: inteligência artificial, processamento da informação, visão computacional, otimização.

Os Primeiros Robôs Móveis (Terrestres)

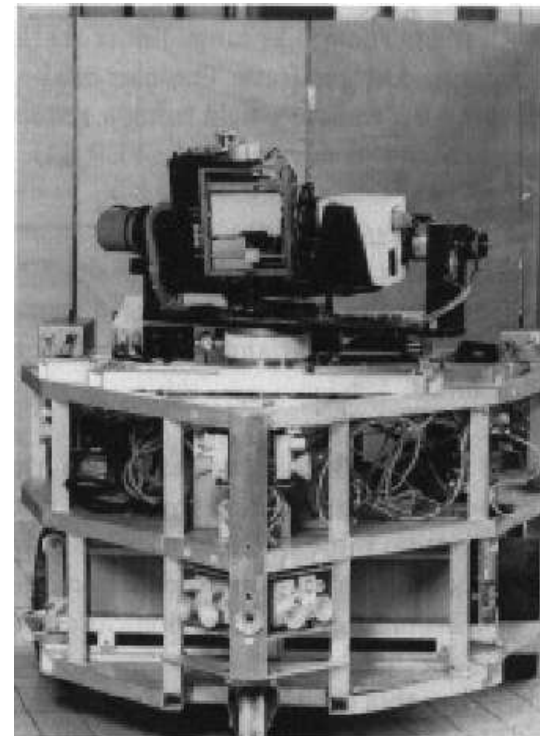
- Shakey: Stanford University (final dos anos 60)

- ◇ Sensores de visão e contato
- ◇ Planificador por segmentos
- ◇ Controle deliberativo



Os Primeiros Robôs Móveis (Terrestres)

- Hilare: LAAS (final dos anos 70)
 - ◇ Sensores de visão, ultra-som e ladar
 - ◇ Controle deliberativo

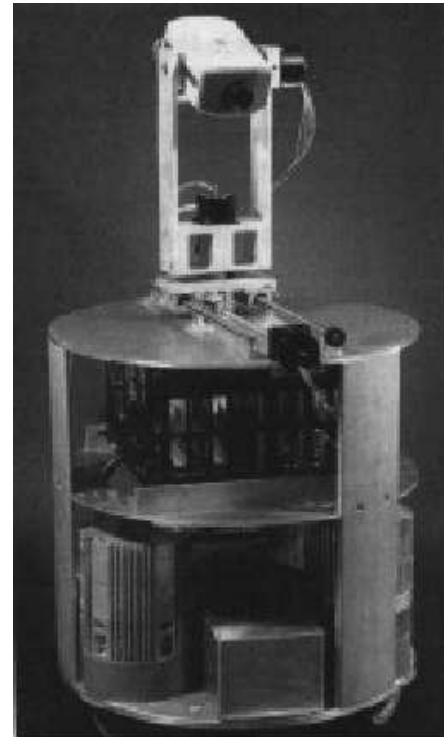


Os Primeiros Robôs Móveis (Terrestres)

- Stanford Cart / CMU Rover: Hans Moravec (1977/1983)



Stanford Cart



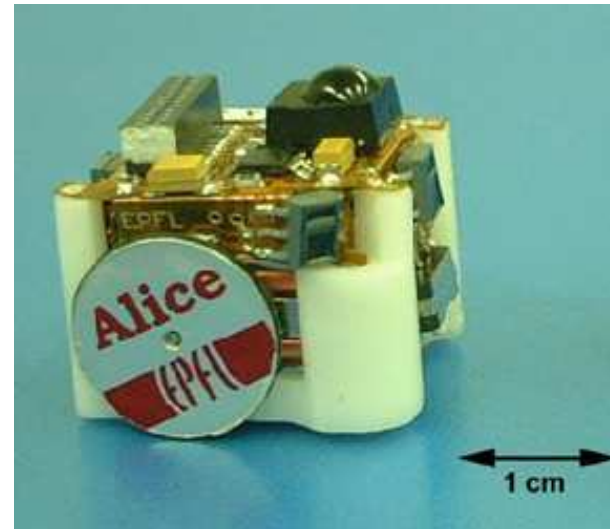
CMU Rover

Desenvolvimentos Recentes

- EPFL, Suíça.



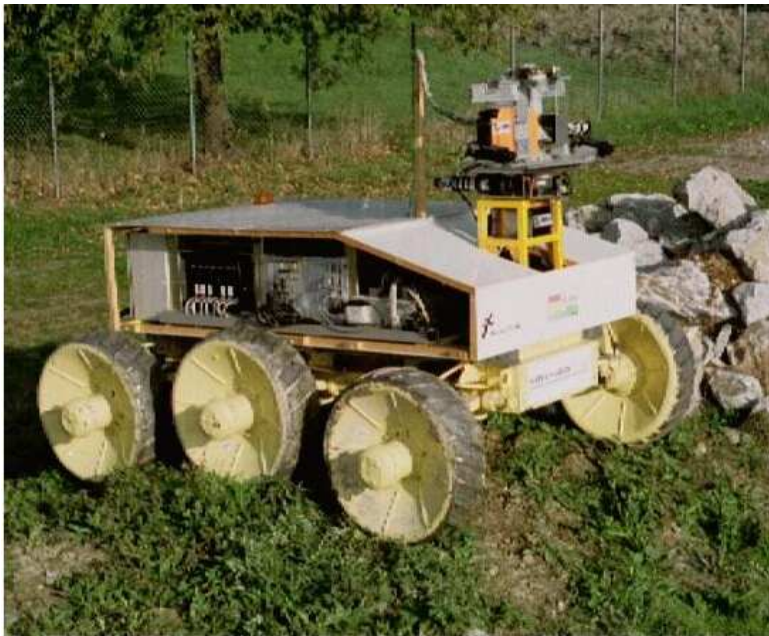
Pigmalion



Alice

Desenvolvimentos Recentes

- LAAS, França.



Adam

Desenvolvimentos Recentes

- LIRMM, França.



Omni



6x6

Desenvolvimentos Recentes

- LIRMM, França.



Type 1

Desenvolvimentos Recentes

- Universidad de Zaragoza, Espanha.



Familia Pioneer

Desenvolvimentos Recentes

- Universität Bonn, Alemanha.



Tourguide



Desenvolvimentos Recentes

- Carnegie Mellon University, Estados Unidos.



Minerva



Assistente



CTA

Desenvolvimentos Recentes

- Stanford University, Estados Unidos.



Segbot



Minemap

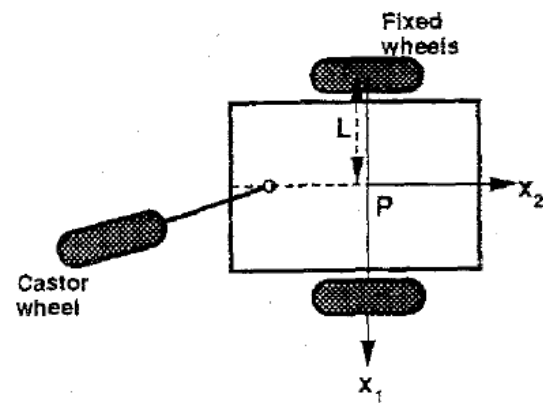
Parte II - Desenvolvimento de Robôs Móveis

- Estrutura Mecânica e Arquitetura Eletrônica
- Modelamento Matemático
- Controle de Movimento
- Percepção e Localização
- Cartografia
- Planejamento de Trajetórias

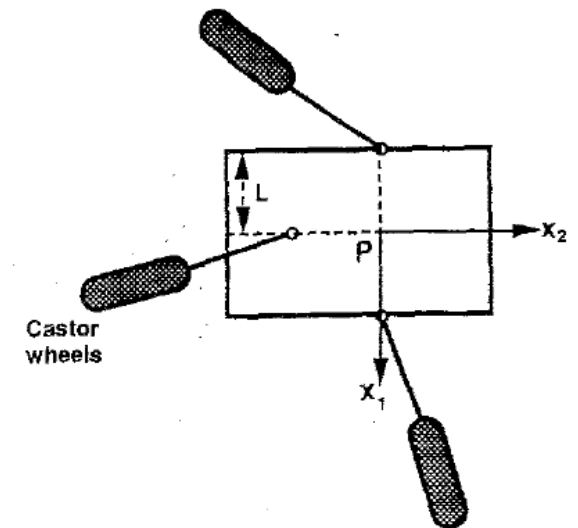
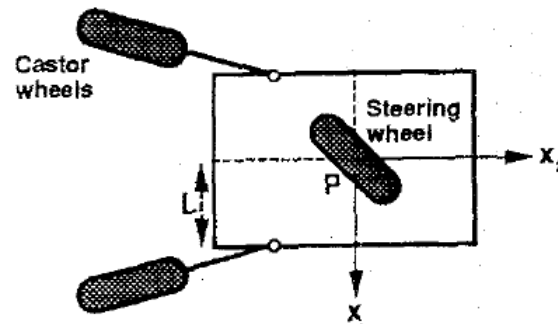


Estrutura Mecânica e Arquitetura Eletrônica

- Modelos de tração [Campion et al., 1996]

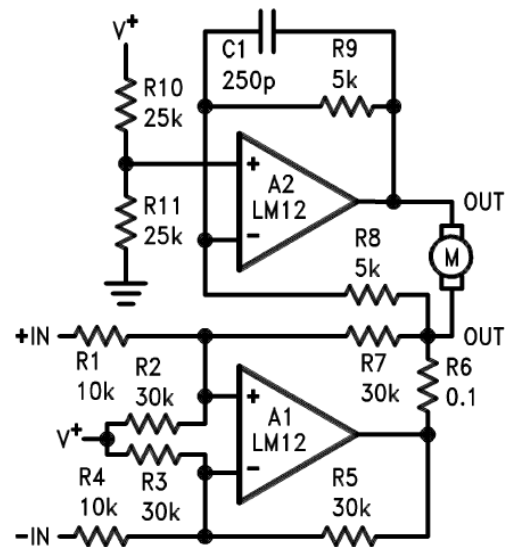


(Diferencial)

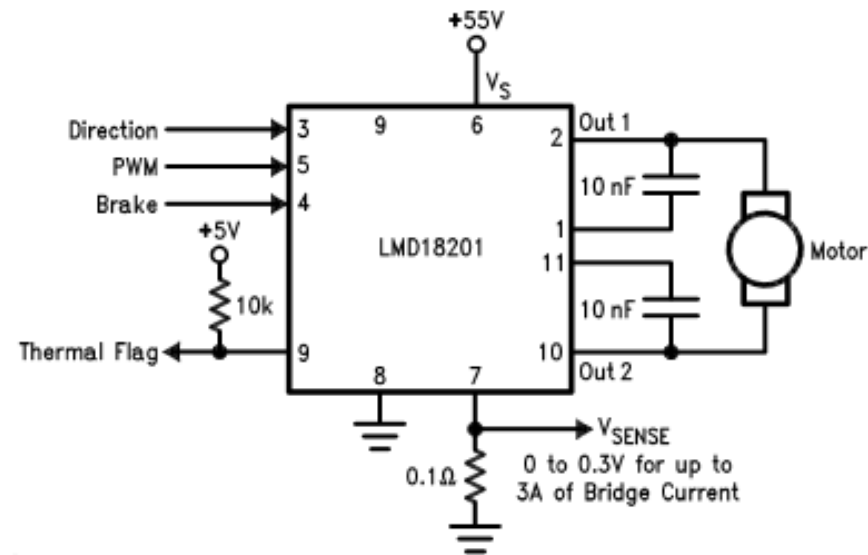


Estrutura Mecânica e Arquitetura Eletrônica

- Acionamentos:
 - Fontes de corrente controladas por tensão.
 - Fontes de tensão controladas por tensão.



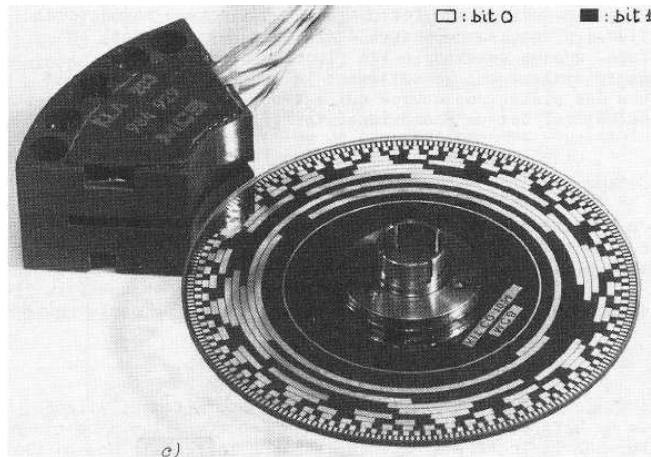
Linear



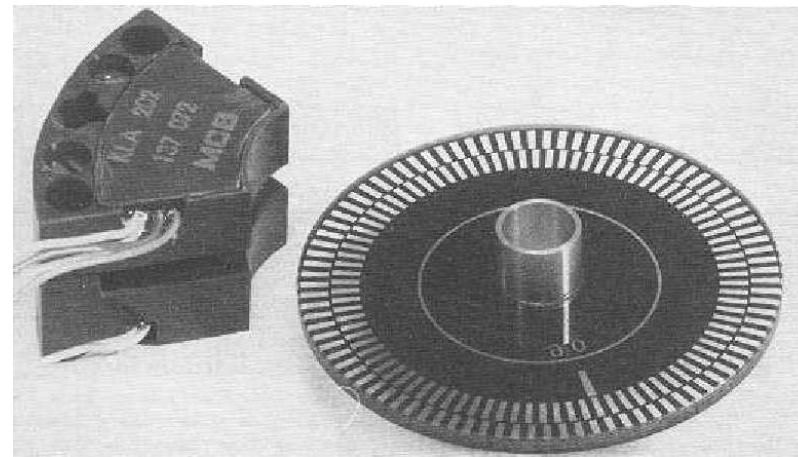
Chaveado

Estrutura Mecânica e Arquitetura Eletrônica

- Sensores para a tração:
 - Corrente: resistências calibradas, sensor a efeito Hall;
 - Velocidade: tacômetros, codificadores ópticos incrementais;
 - Posição: codificadores ópticos absolutos, potenciômetros;



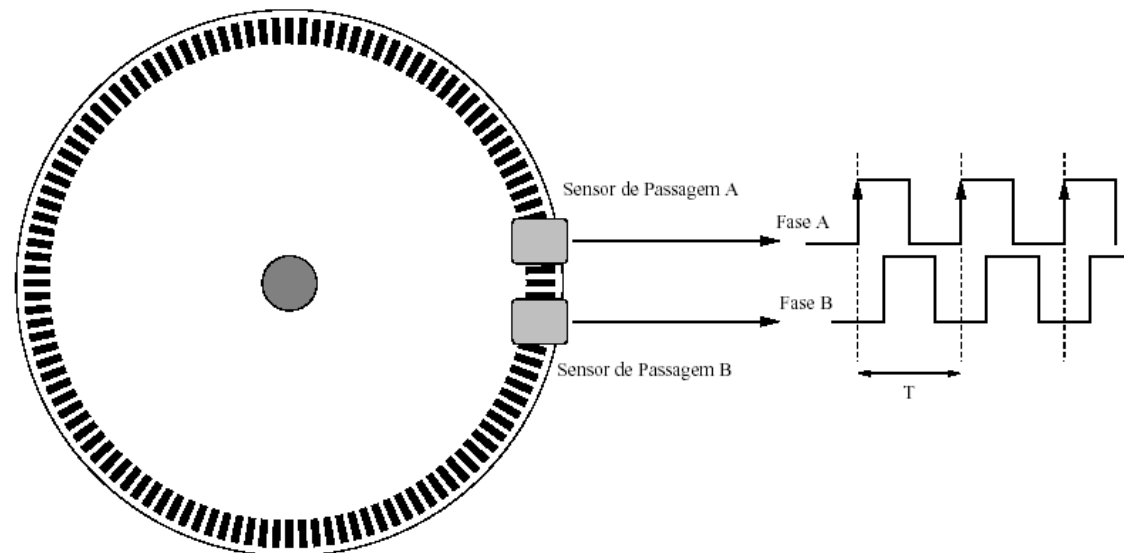
Codificador Absoluto



Codificador Incremental

Estrutura Mecânica e Arquitetura Eletrônica

- Sensores para a tração:
 - Corrente: resistências calibradas, sensor a efeito Hall;
 - Velocidade: tacômetros, codificadores ópticos incrementais;
 - Posição: codificadores ópticos absolutos, potenciômetros;

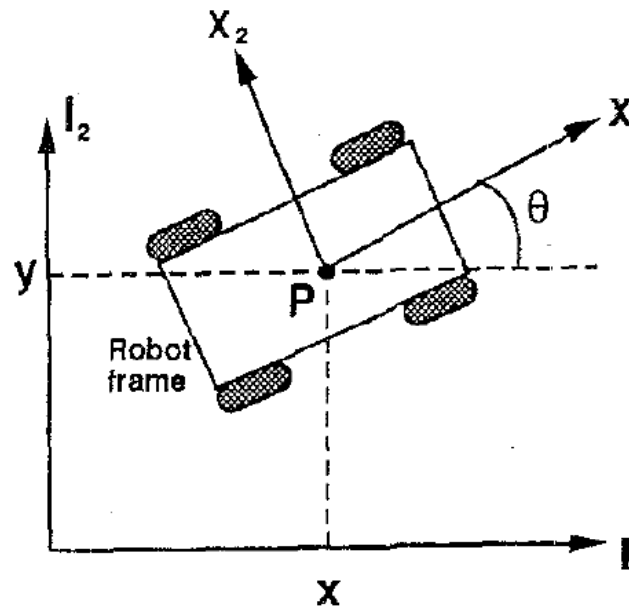


Modelamento Matemático

- Modelo cinemático [Campion et al., 1996]

- ◇ Sistemas de coordenadas.

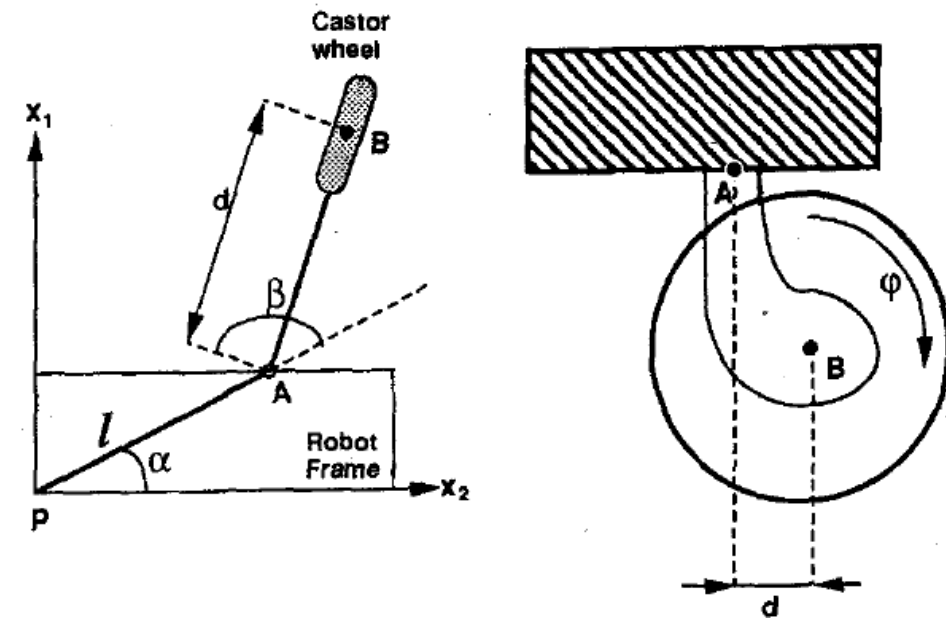
- ◇ Postura: $\xi = (x, y, \theta)$



Modelamento Matemático

- Modelo cinemático [Campion et al., 1996]

- ◇ Sistemas de coordenadas.
- ◇ Postura: $\xi = (x, y, \theta)$
- ◇ Variáveis articulares: $q = (\beta, \varphi)$
- ◇ Parâmetros Geométricos:
 $\lambda_i = (l_i, \alpha_i, d_i, r_i)$



Modelamento Matemático

- Modelo cinemático [Campion et al., 1996]

- ◇ Restrições da i-ésima roda:

$$\begin{bmatrix} -\sin(\alpha_i + \beta_i) & \cos(\alpha_i + \beta_i) & l_i \cos(\beta_i) \end{bmatrix} \mathbf{R}(\theta) \dot{\boldsymbol{\xi}} + r_i \dot{\varphi}_i = 0$$
$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha_i + \beta_i) & \sin(\alpha_i + \beta_i) & d_i + l_i \sin(\beta_i) \end{bmatrix} \mathbf{R}(\theta) \dot{\boldsymbol{\xi}} + d_i \dot{\beta}_i = 0$$

- ◇ Considerando as restrições, obtem-se o Modelo Cinemático Inverso (MCI)

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\theta, \boldsymbol{\lambda}) \dot{\boldsymbol{\xi}}$$

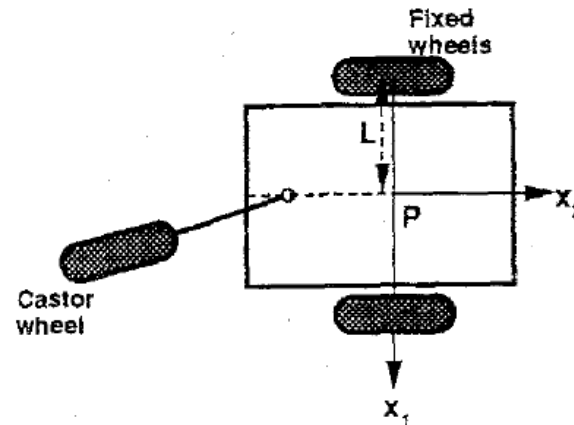
- ◇ Ou ainda, o Modelo Cinemático Direto (MCD)

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \mathbf{J}(\theta, \boldsymbol{\lambda})^{-1} \dot{\mathbf{q}}$$

Modelamento Matemático

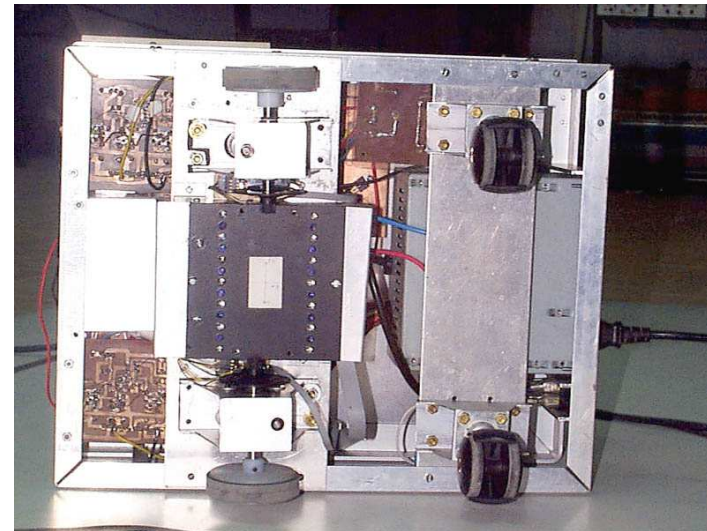
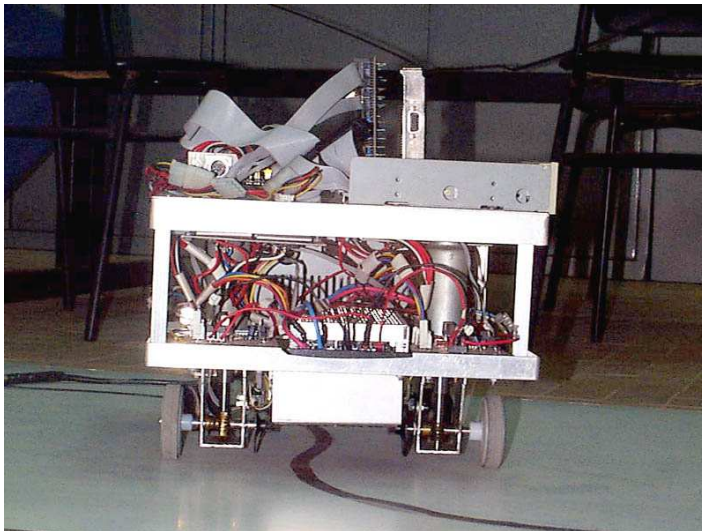
- Modelo cinemático
 - Exemplo: tração diferencial

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_d + v_e}{2} \cos(\theta) \\ \frac{v_d + v_e}{2} \sin(\theta) \\ \frac{v_d - v_e}{2l} \end{bmatrix}$$



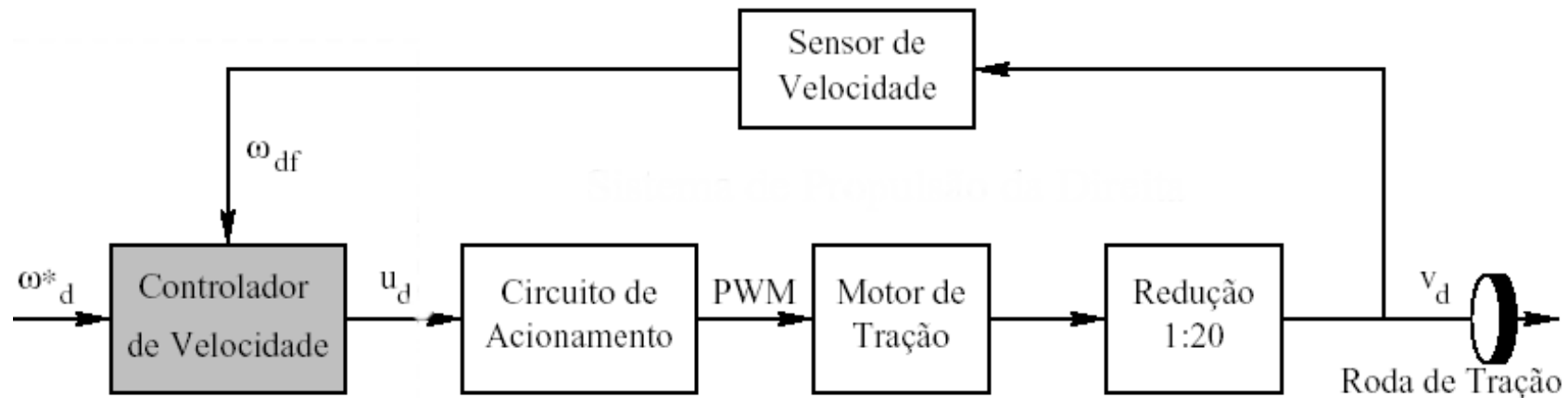
Controle de Movimento

- Controle de velocidade das rodas de tração [Borges, 1998]



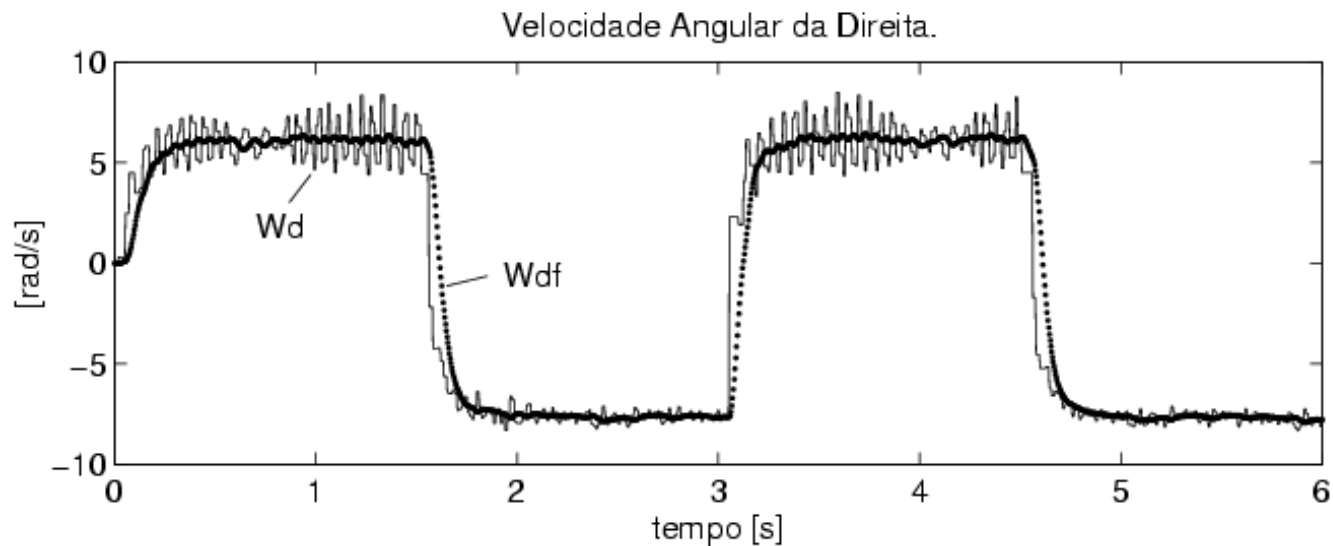
Controle de Movimento

- Controle de velocidade das rodas de tração [Borges, 1998]
 - Malha de controle:



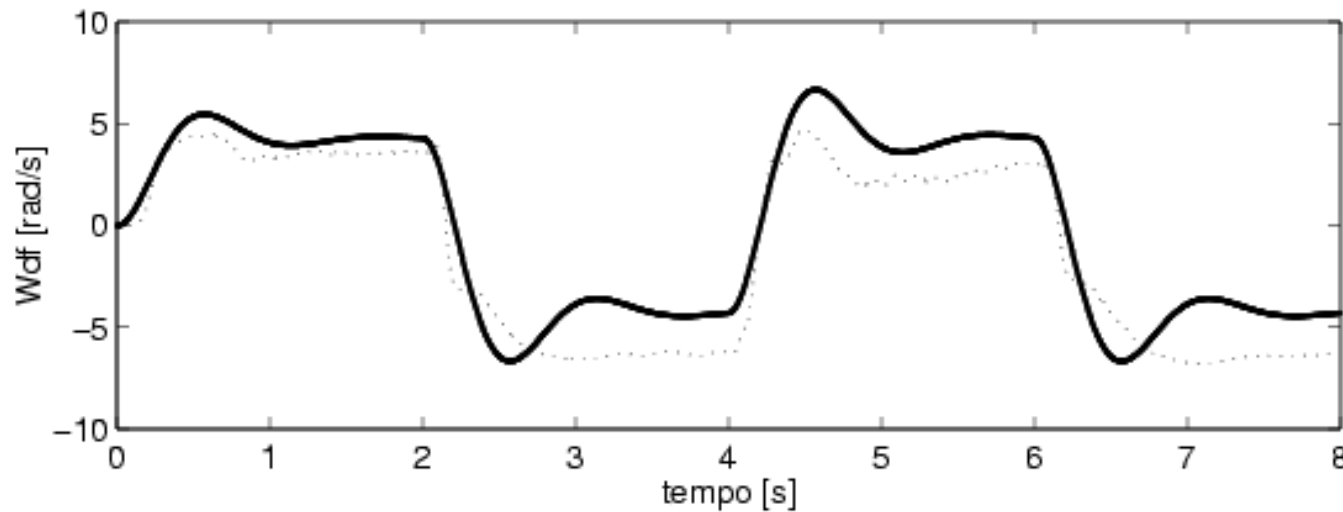
Controle de Movimento

- Controle de velocidade das rodas de tração [Borges, 1998]
 - Velocidade medida:



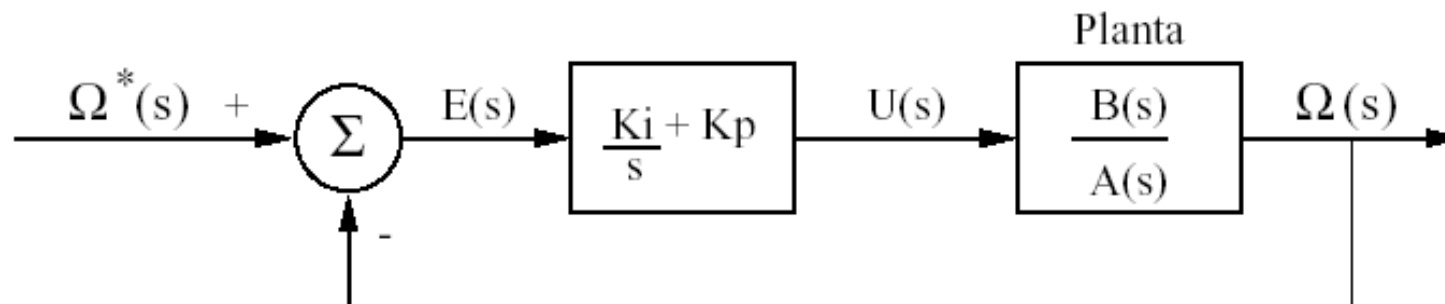
Controle de Movimento

- Controle de velocidade das rodas de tração [Borges, 1998]
 - Identificação de parâmetros do modelo de tração:



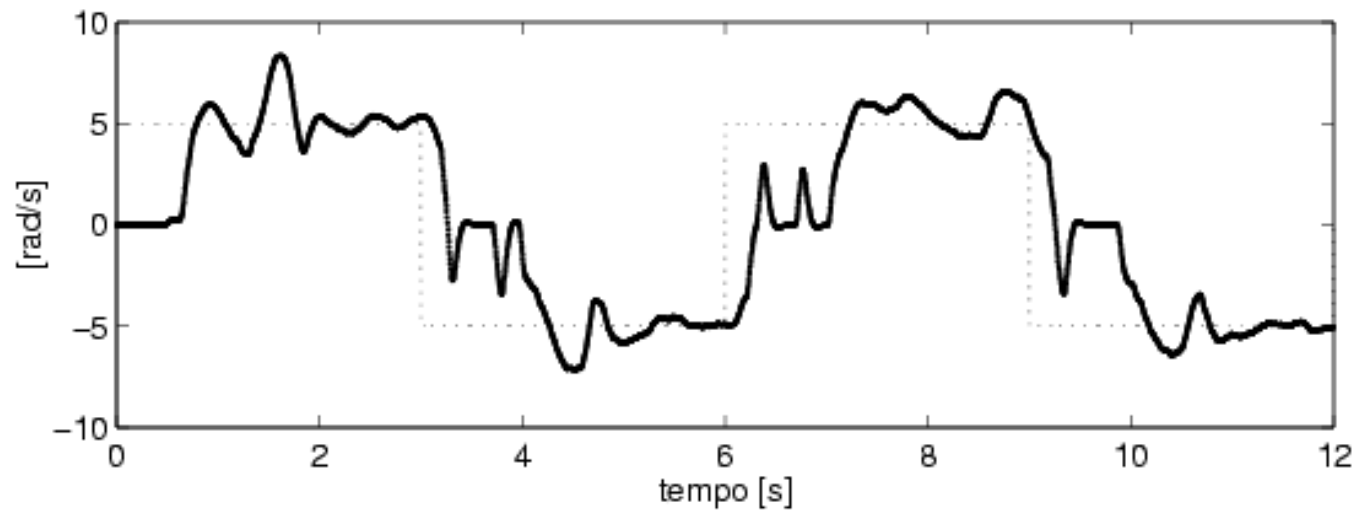
Controle de Movimento

- Controle de velocidade das rodas de tração [Borges, 1998]
 - Lei de controle proporcional-integral (PI):



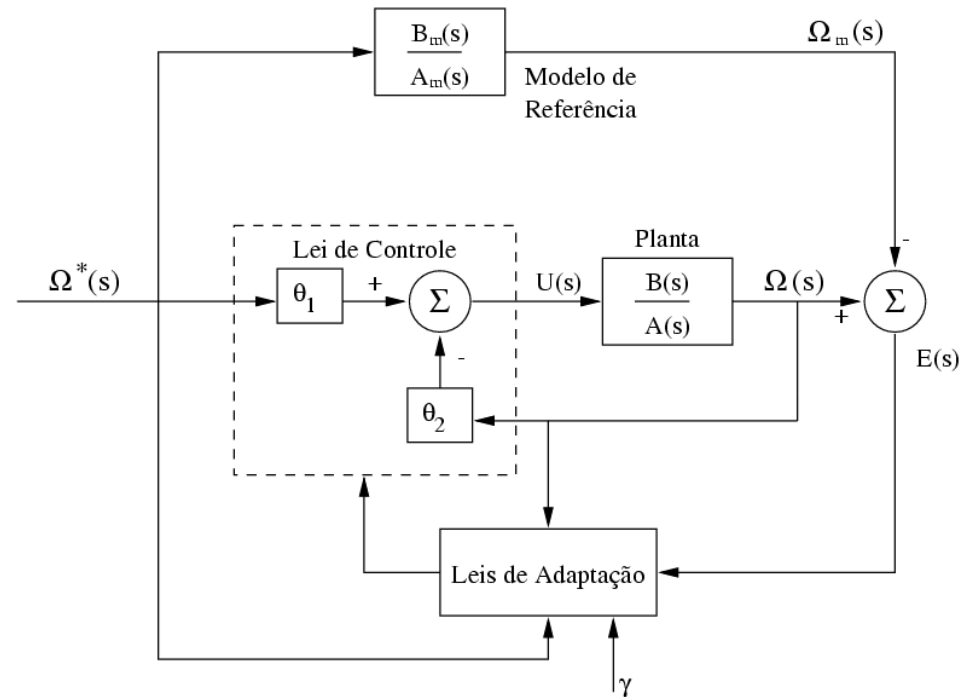
Controle de Movimento

- Controle de velocidade das rodas de tração [Borges, 1998]
 - Experimento com o controlador PI:



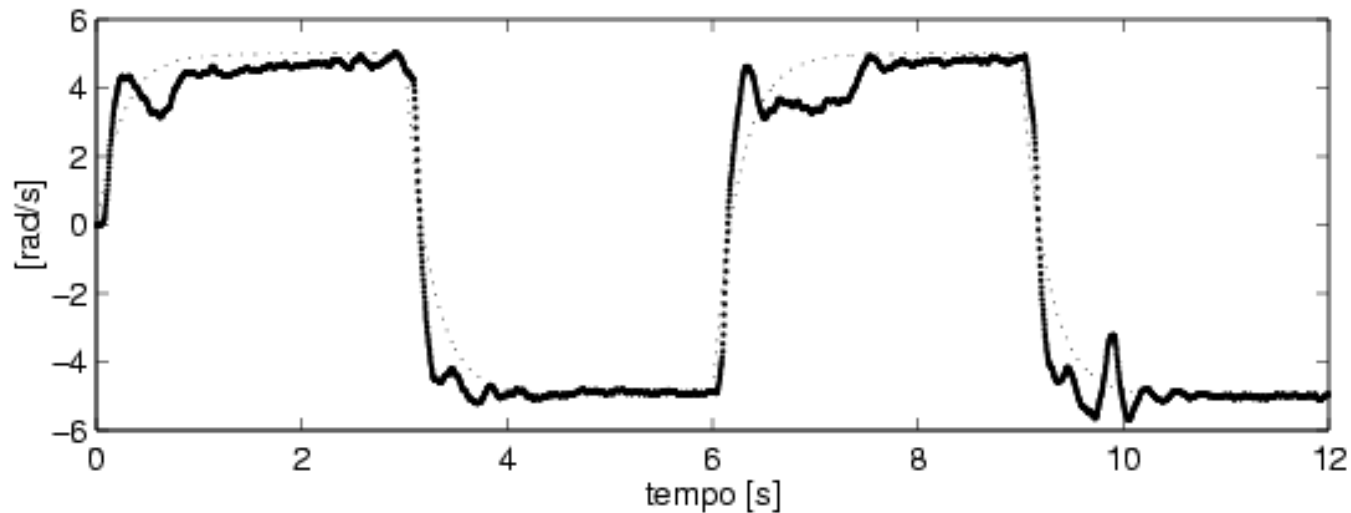
Controle de Movimento

- Controle de velocidade das rodas de tração [Borges, 1998]
 - Lei de controle adaptativo por modelo de referência (MRAC):



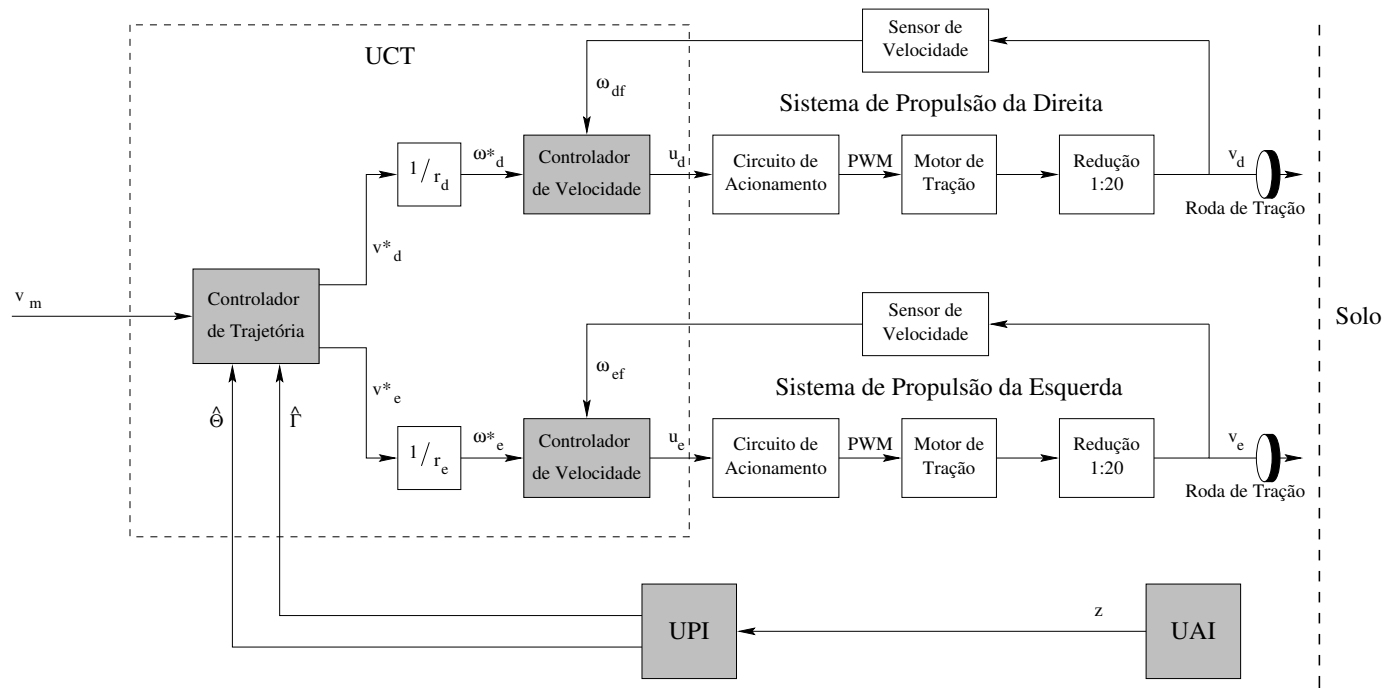
Controle de Movimento

- Controle de velocidade das rodas de tração [Borges, 1998]
 - Experimento com o controlador MRAC:



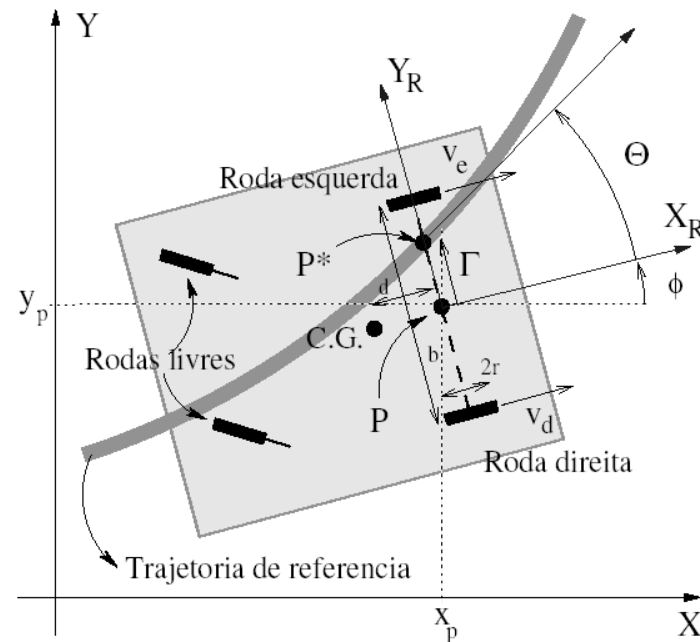
Controle de Movimento

- Controle de trajetória [Borges et al., 2003]
 - Estrutura geral:



Controle de Movimento

- Controle de trajetória [Borges et al., 2003]
 - Erro de trajetória:



Controle de Movimento

- Controle de trajetória [Borges et al., 2003]
 - Lei de controle não-linear:

$$\begin{aligned}v_d(t) &= v_p + r \cdot \Delta\omega(t) \\v_e(t) &= v_p - r \cdot \Delta\omega(t)\end{aligned}$$

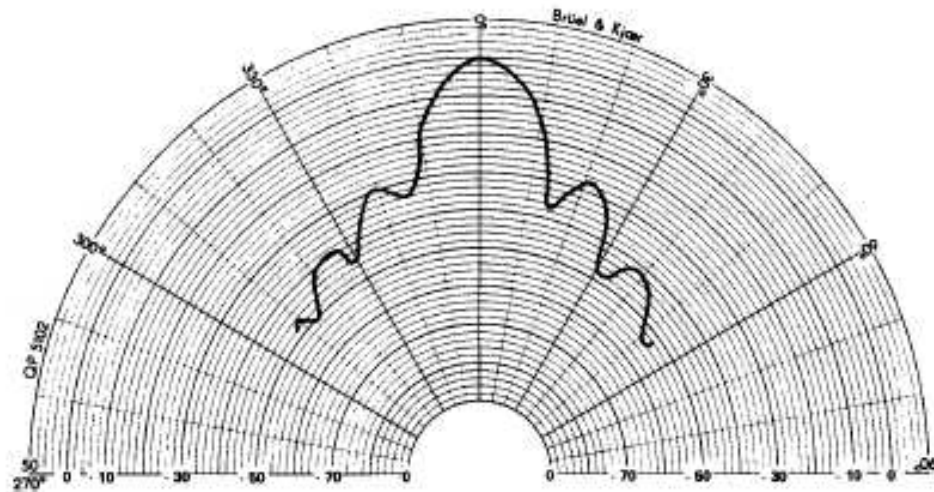
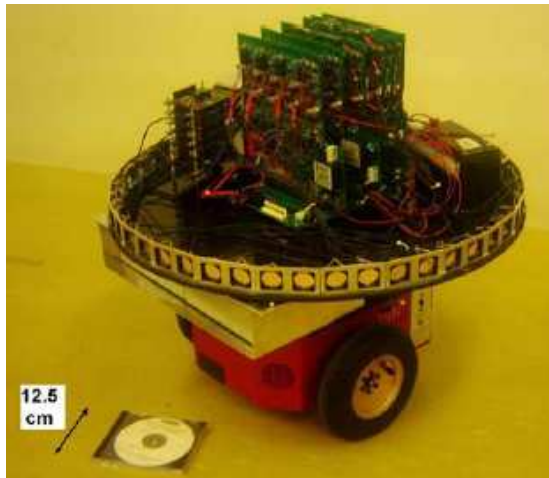
com

$$\Delta\omega(t) = \frac{b}{2r} \left\{ \frac{\alpha v_p \sin(\Theta) \cos(\Theta)}{\Theta(t)} \Gamma(t) + \beta \Theta(t) \right\}.$$

- Simulador **simctraj**

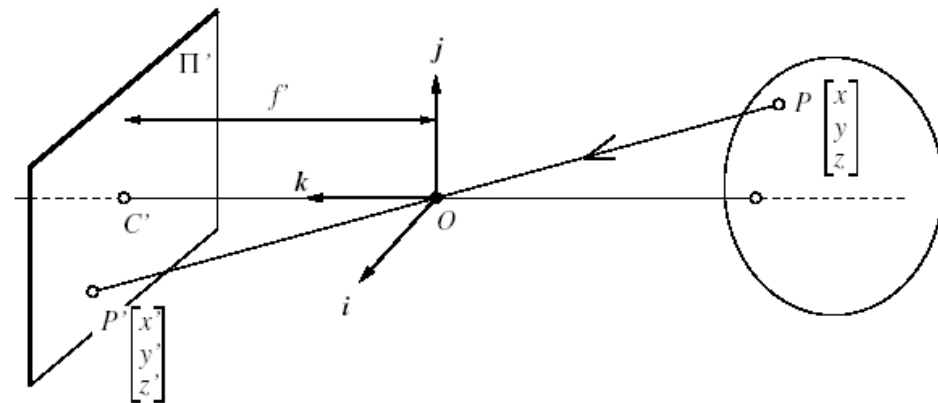
Percepção do Ambiente

- Sensores exteroceptivos
 - Anéis de ultra-som:



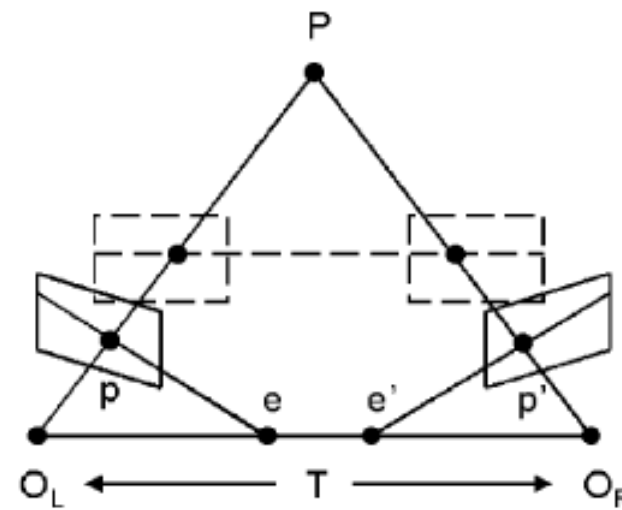
Percepção do Ambiente

- Sensores exteroceptivos
 - Câmeras de vídeo: montagem mono.



Percepção do Ambiente

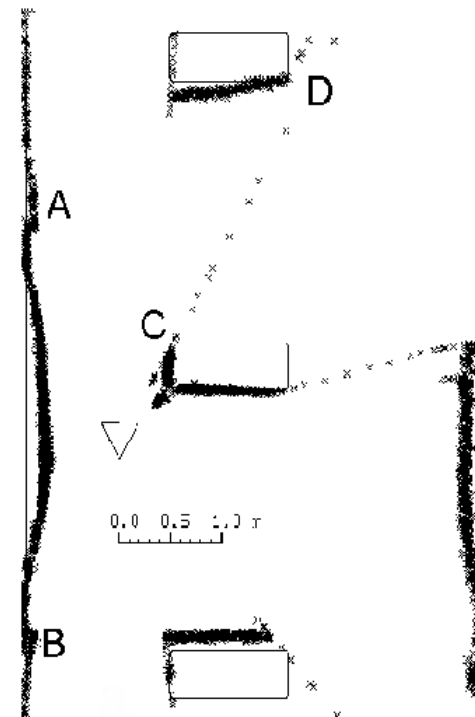
- Sensores exteroceptivos
 - Câmeras de vídeo: montagem estéreo.



[Brown et al., 2003]

Percepção do Ambiente

- Sensores exteroceptivos
 - Radar a laser (ladar):



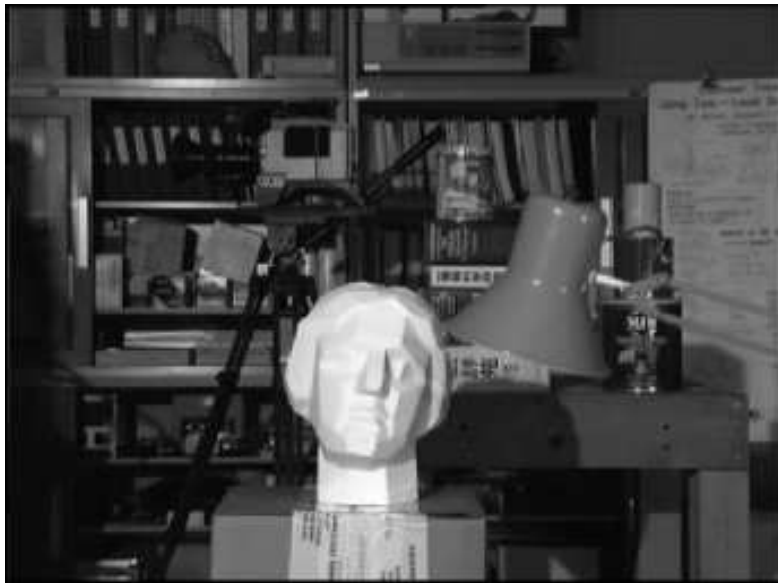
Percepção do Ambiente

- Processamento de dados sensoriais
 - Câmeras de vídeo: retas verticais de uma imagem



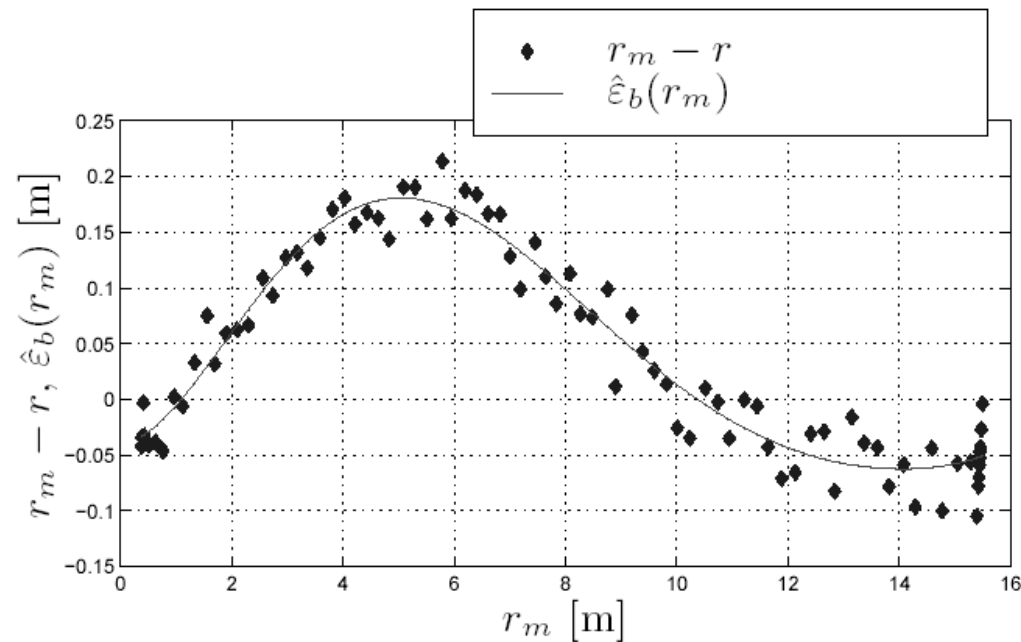
Percepção do Ambiente

- Processamento de dados sensoriais
 - Câmeras de vídeo: disparidade estéreo [Brown et al., 2003]



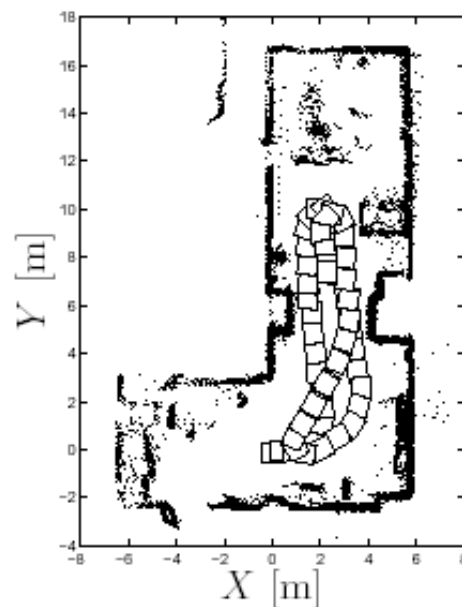
Percepção do Ambiente

- Processamento de dados sensoriais
 - Radar a laser: estimação do viés de medição [Borges and Aldon, 2004]

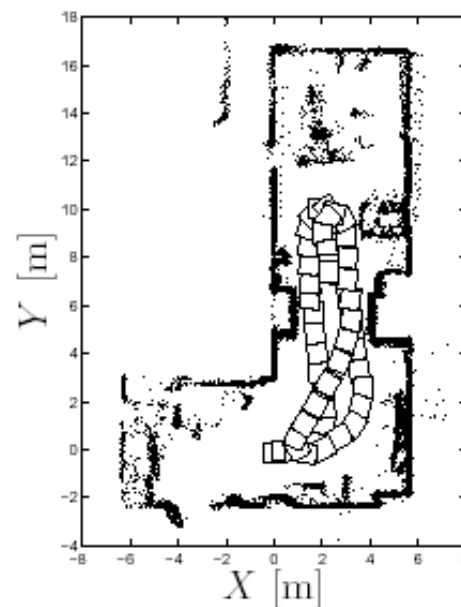


Percepção do Ambiente

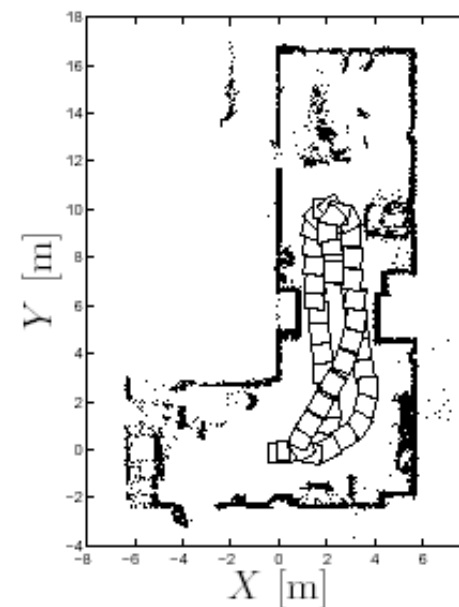
- Processamento de dados sensoriais
 - Radar a laser: compensação de movimento e do viés [Borges and Aldon, 2004]



(a) Raw images



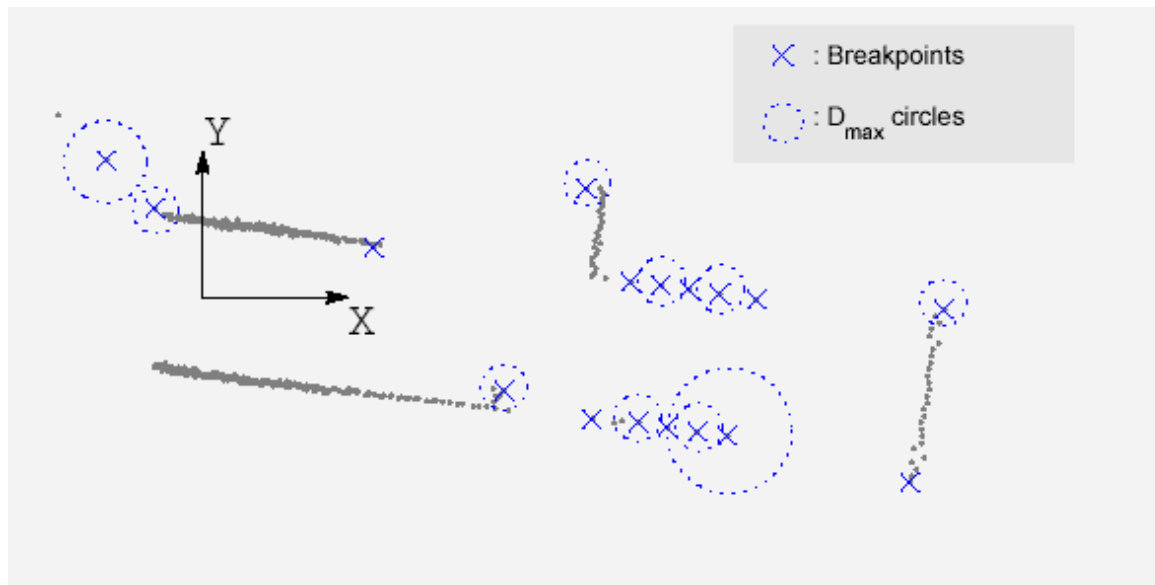
(b) Bias compensation



(c) Motion correction

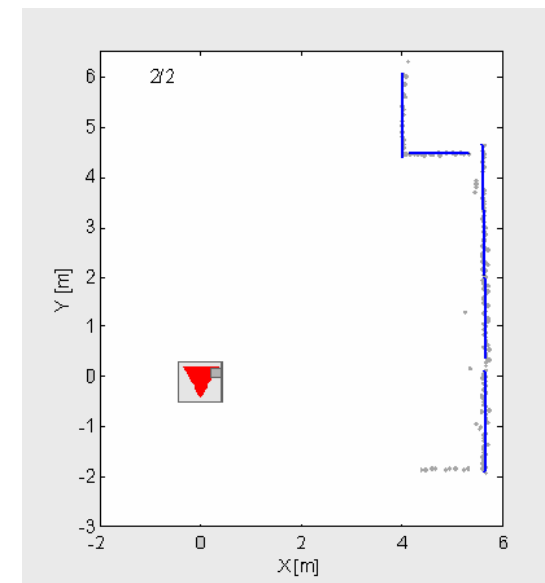
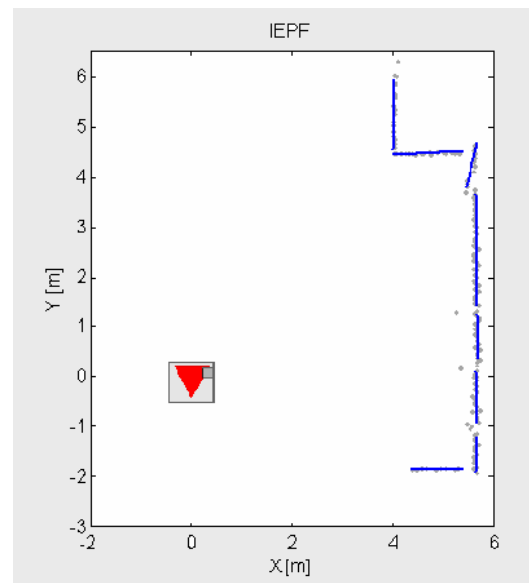
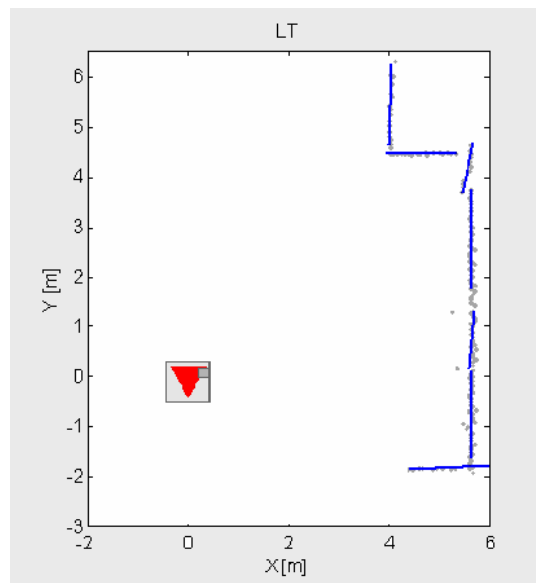
Percepção do Ambiente

- Processamento de dados sensoriais
 - Radar a laser: extração de pontos de ruptura [Borges and Aldon, 2004]



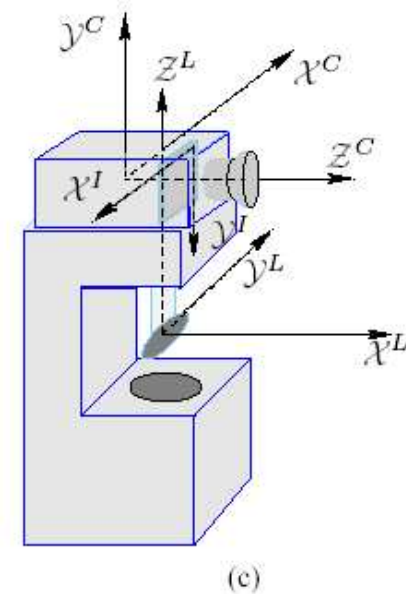
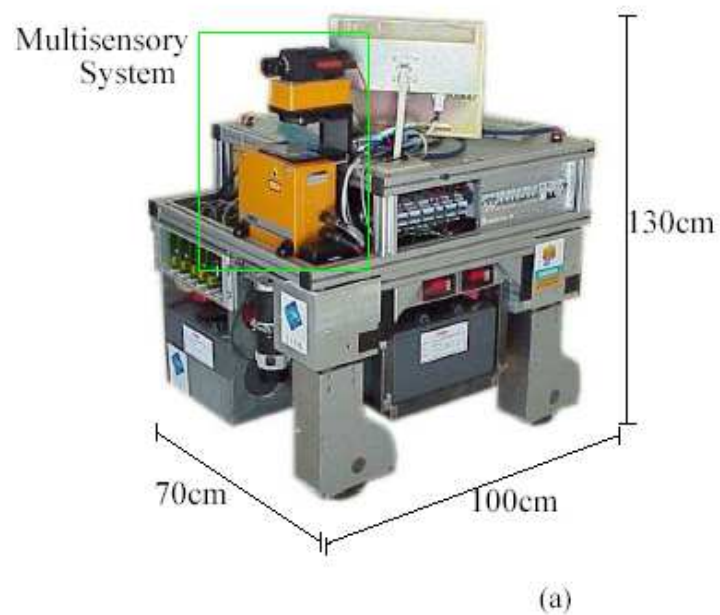
Percepção do Ambiente

- Processamento de dados sensoriais
 - Radar a laser: extração de segmentos de retas [Borges and Aldon, 2004]



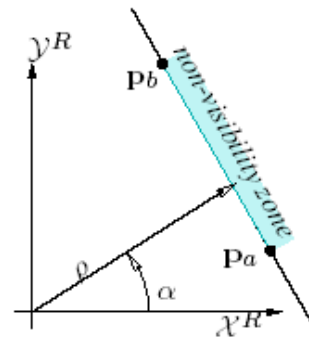
Percepção do Ambiente

- Construção de mapas locais
 - Sistema multisensorial [Borges, 2002]

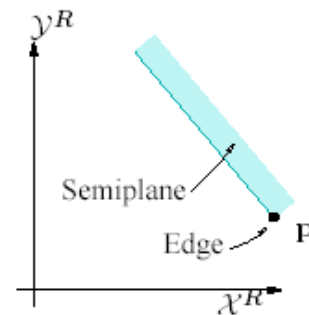


Percepção do Ambiente

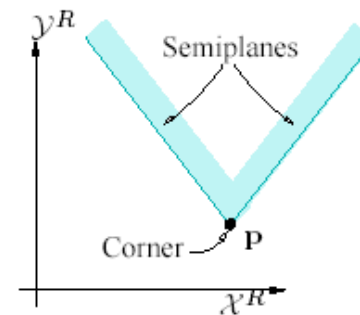
- Construção de mapas locais
 - Estruturas de ambiente [Borges, 2002]



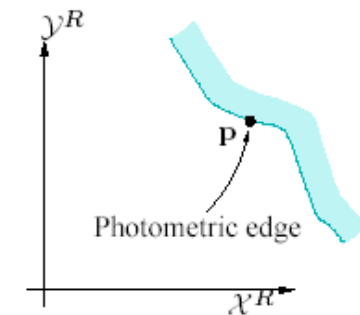
(a) Semiplane



(b) Edge



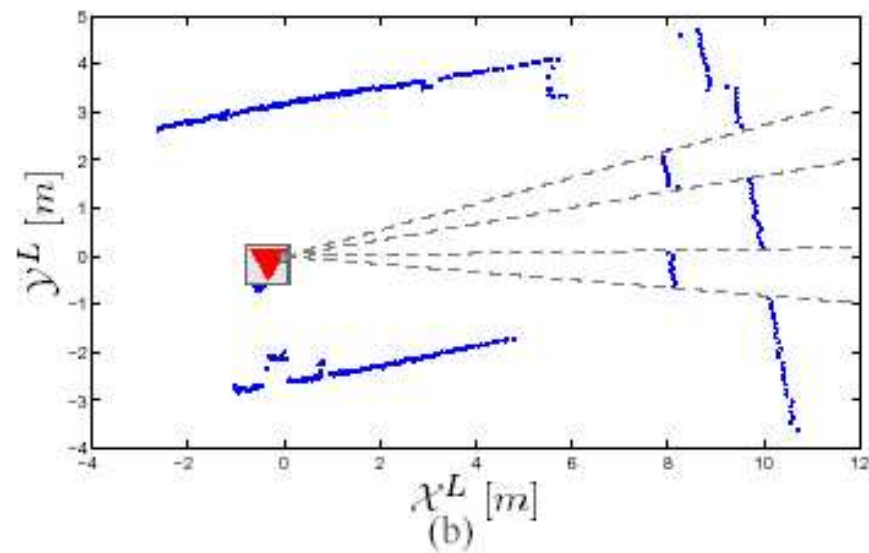
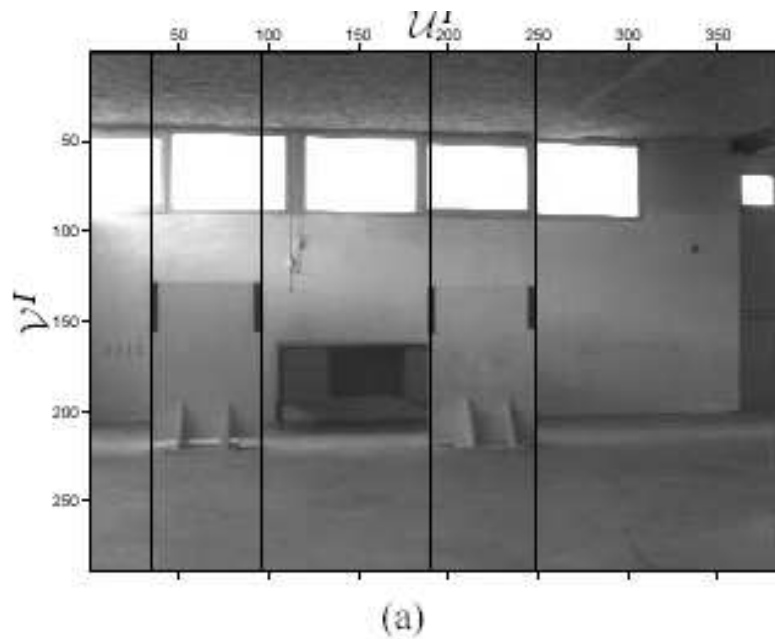
(c) Corner



(d) Photometric edge

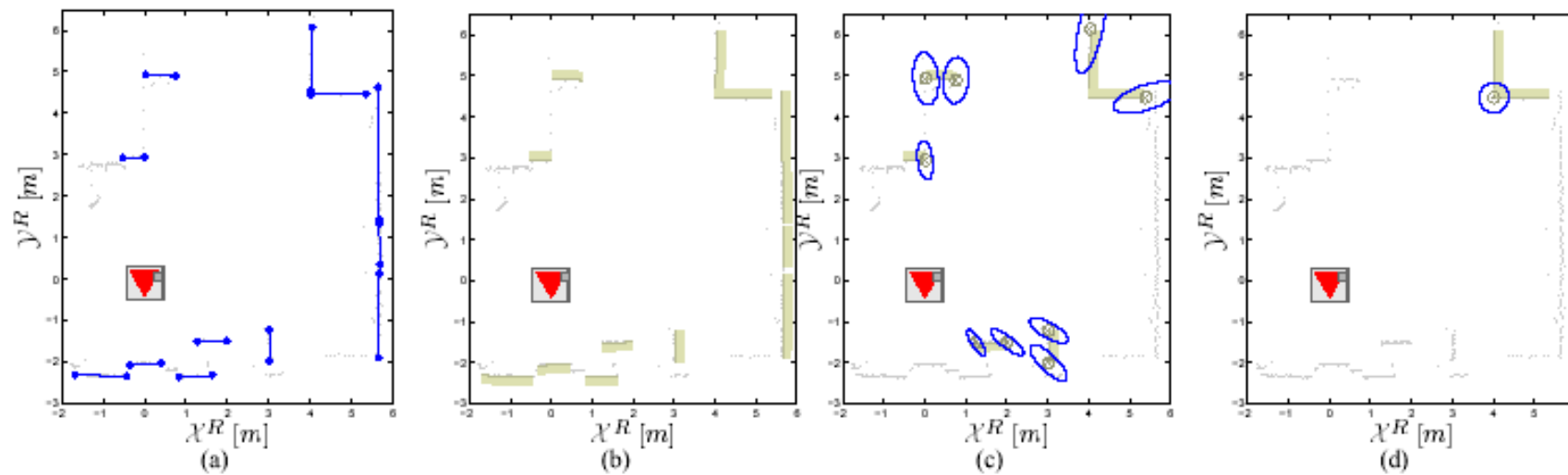
Percepção do Ambiente

- Contrução de mapas locais
 - Complementaridade ladar e câmera [Borges, 2002]



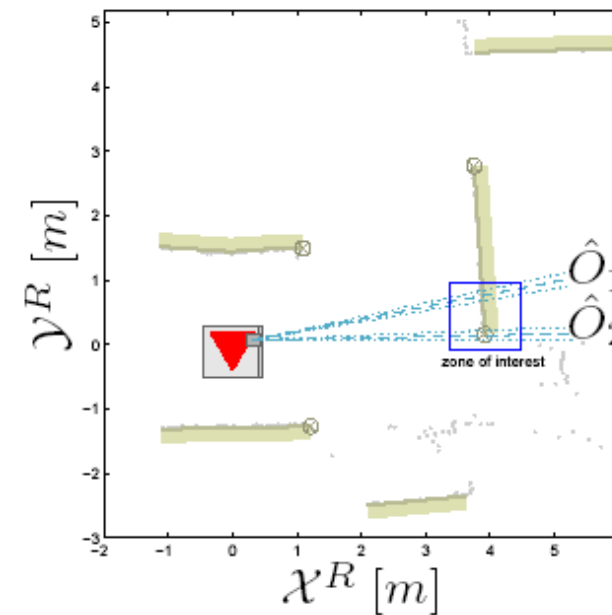
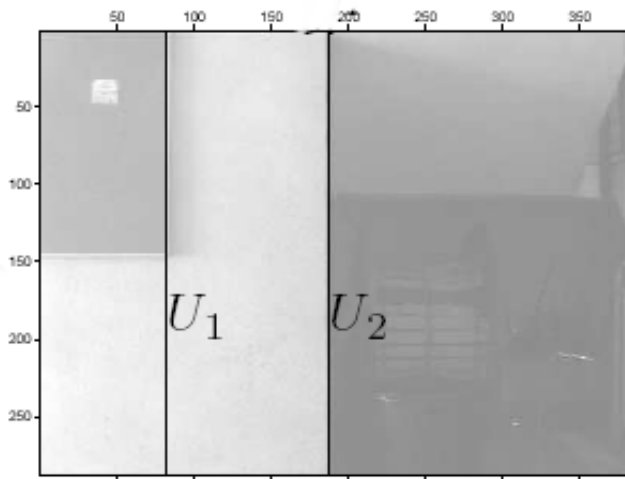
Percepção do Ambiente

- Construção de mapas locais
 - Primeiro passo: primeira instância do mapa usando imagem ladar [Borges, 2002]



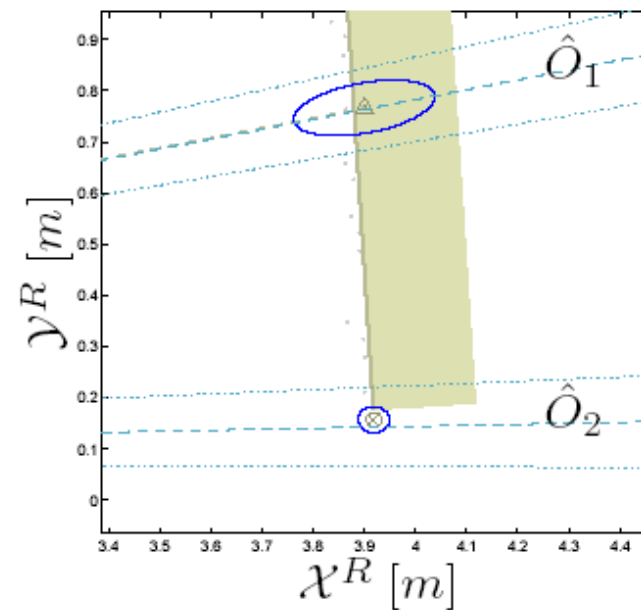
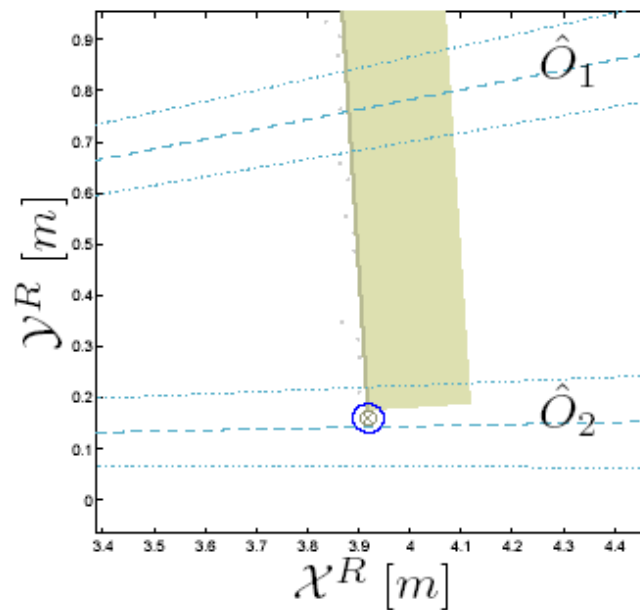
Percepção do Ambiente

- Contrução de mapas locais
 - Segundo passo: fusão usando imagem a câmera[Borges, 2002]



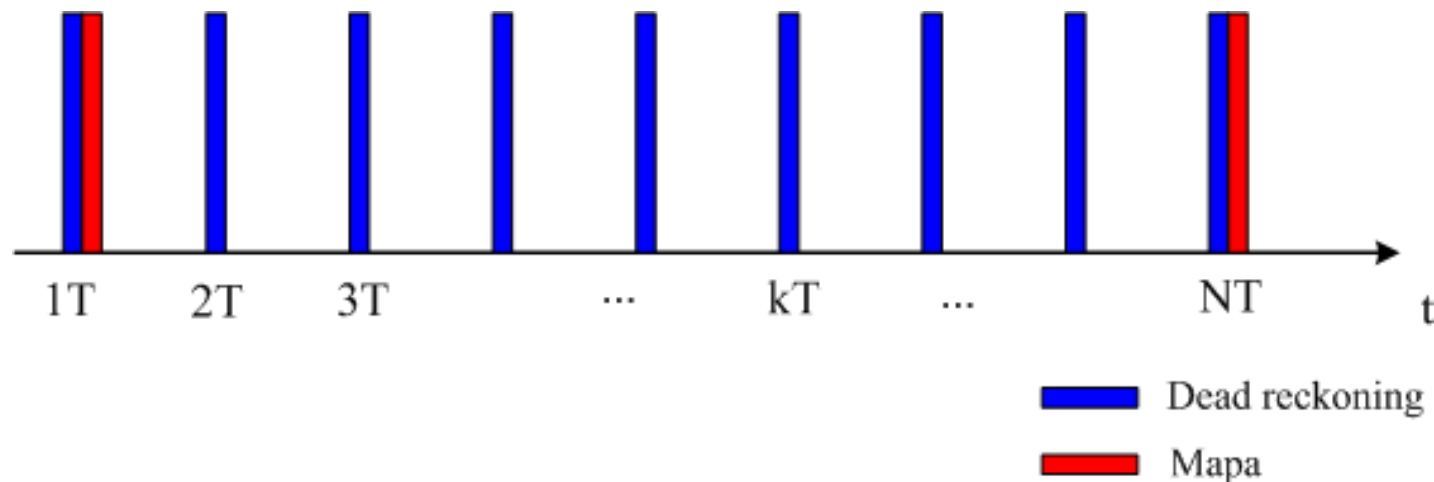
Percepção do Ambiente

- Construção de mapas locais
 - Segundo passo: fusão usando imagem a câmera[Borges, 2002]



Localização

- Categorias de localização:
 - Localização relativa (dead reckoning)
 - Localização absoluta por landmarks
 - Localização absoluta por mapas de ambiente



Localização

- Localização relativa:
 - Sensores proprioceptivos:
 - * Codificadores ópticos incrementais
 - * Acelerômetros
 - * Gyroscópios
 - * Sensor de campo magnético



Localização

- Localização relativa:
 - Formulação matemática:
 - * Discretização do MCD (robô a tração diferencial):

$$\text{MCD contínuo} : \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_d + v_e}{2} \cos(\theta) \\ \frac{v_d + v_e}{2} \sin(\theta) \\ \frac{v_d - v_e}{2l} \end{bmatrix}$$

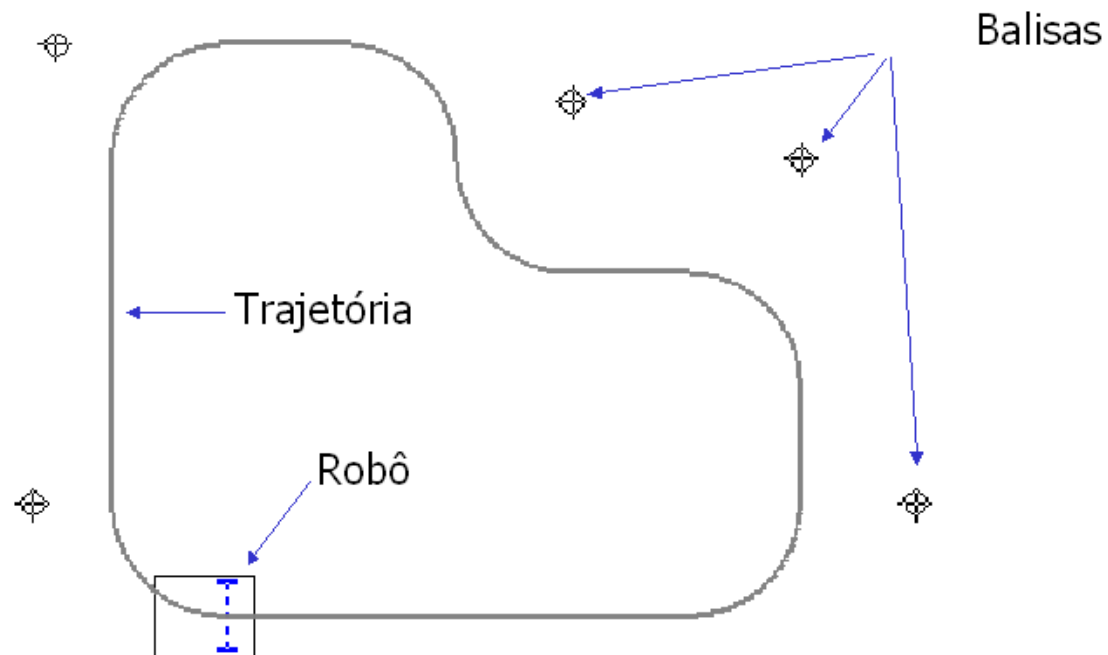
$$\text{MCD discreto} : \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ \theta_{k-1} \end{bmatrix} + T \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(v_{d,k} + v_{e,k}) \cos(\theta_{k-1}) \\ \frac{1}{2}(v_{d,k} + v_{e,k}) \sin(\theta_{k-1}) \\ \frac{1}{2l}(v_{d,k} - v_{e,k}) \end{bmatrix}$$

- * Integração usando leituras dos codificadores ópticos (odometria):
 $v_{d,k}$ e $v_{e,k}$ são as leituras de velocidade obtidas por estes sensores.

- * Fusão com acelerômetro, giroscópio ou sensor magnético: filtro de Kalman estendido (FKE).
- * Propagação de incertezas.
- * Simulador **simloc**

Localização

- Localização absoluta por landmarks
 - Descrição do problema



Localização

- Localização absoluta por landmarks
 - Formulação matemática
 - * Predição da posição por odometria:

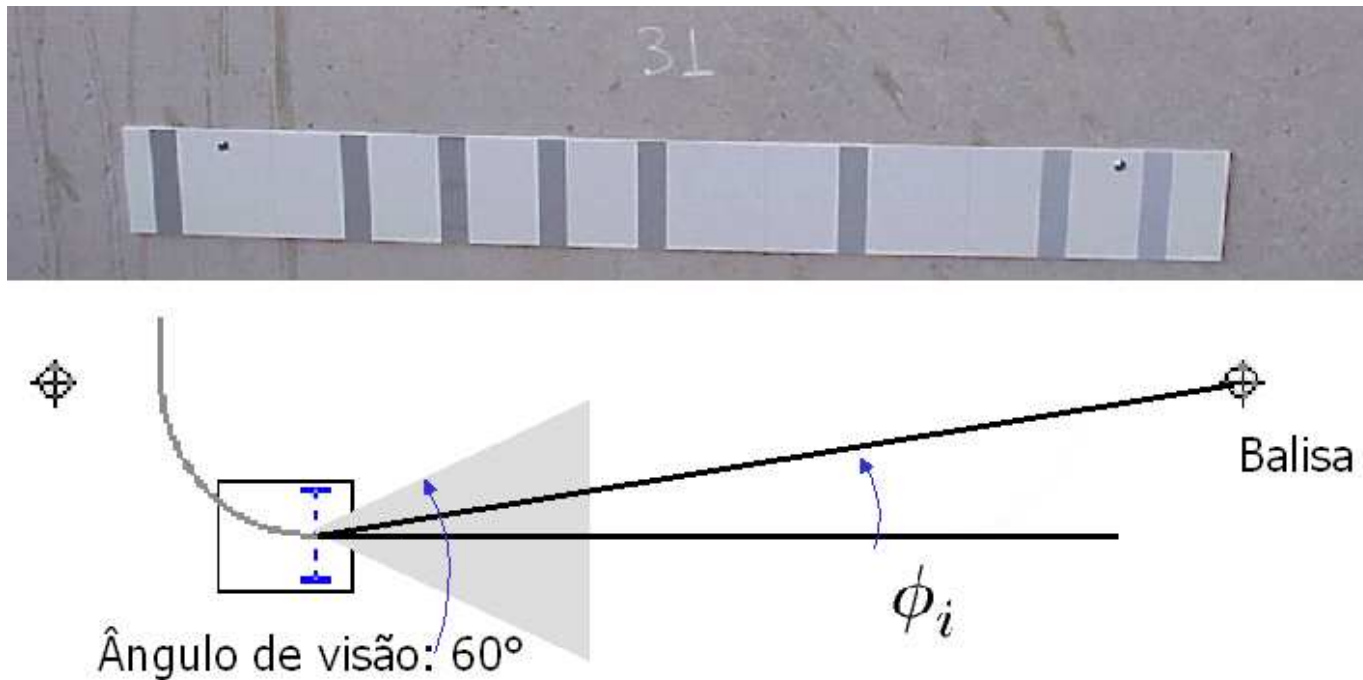
$$\begin{aligned}\xi_{k|k-1} &= \mathbf{f}(\xi_{k-1}, v_{d,k}, v_{e,k}) \\ &= \xi_{k-1} + T \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(v_{d,k} + v_{e,k}) \cos(\theta_{k-1}) \\ \frac{1}{2}(v_{d,k} + v_{e,k}) \sin(\theta_{k-1}) \\ \frac{1}{2l}(v_{d,k} - v_{e,k}) \end{bmatrix}\end{aligned}$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi_{k-1}} \right) \mathbf{P}_{k-1} \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi_{k-1}} \right)^T$$

com $\xi = (x_k, y_k, \theta_k)^T$.

Localização

- Localização absoluta por landmarks
 - Formulação matemática
 - * Correção da predição utilizando os landmarks visíveis:



Localização

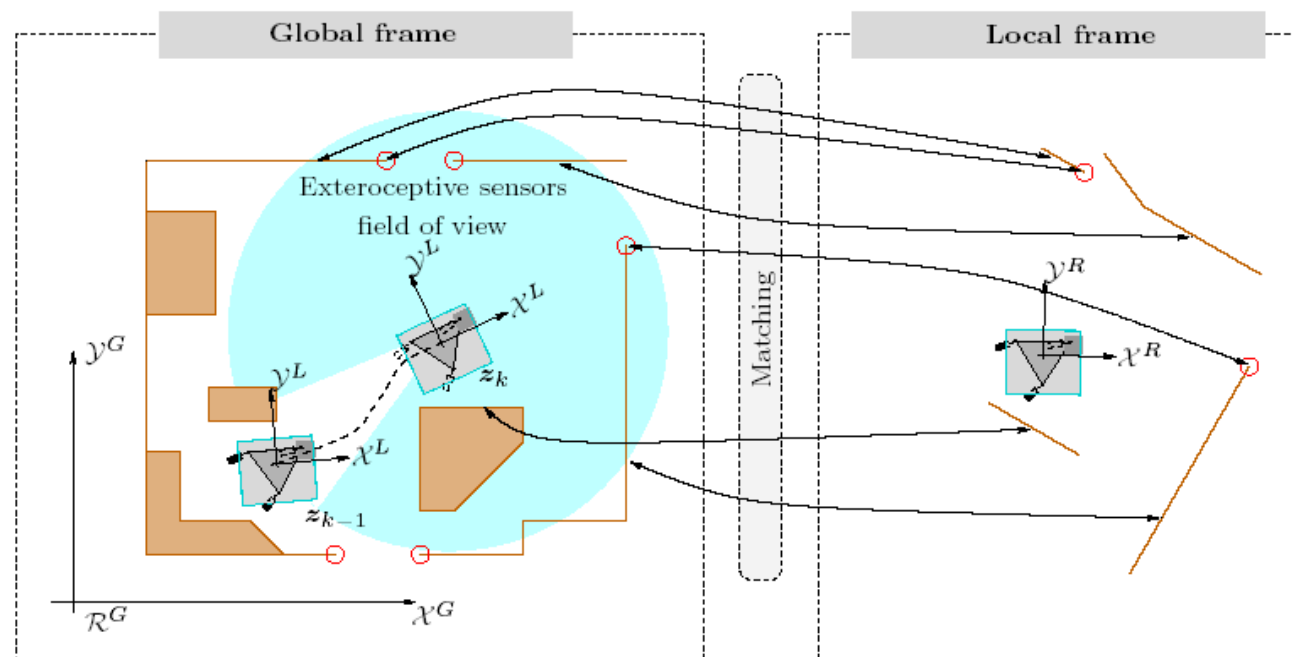
- Localização absoluta por landmarks
 - Formulação matemática
 - * Medição associada ao i -ésimo landmark:

$$\phi_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_k) & \sin(\theta_k) \\ -\sin(\theta_k) & \cos(\theta_k) \end{pmatrix} \cdot \left\{ \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \right\}$$
$$\varepsilon_{\phi_i} \sim \mathcal{N}(0; 0, 25)$$

- * Correção de $\xi_{k|k-1}$ usando Filtro de Kalman Estendido (FKE).
- * Simulador **simloc**

Localização

- Localização absoluta por mapas de ambiente: mapas geométricos
 - Solução similar ao caso de landmarks.



[Borges and Aldon, 2003]

Localização

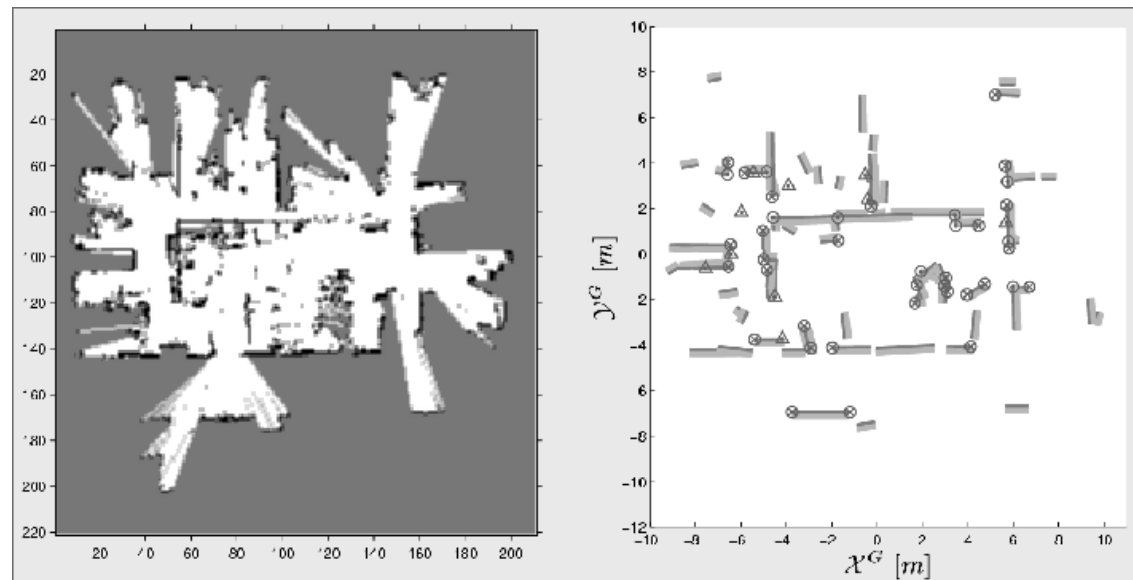
- Localização absoluta por mapas de ambiente: mapas probabilísticos [Moravec and Elfes, 1985]
 - Mapa probabilístico (ou grade de ocupação):



[Thrun, 2000]

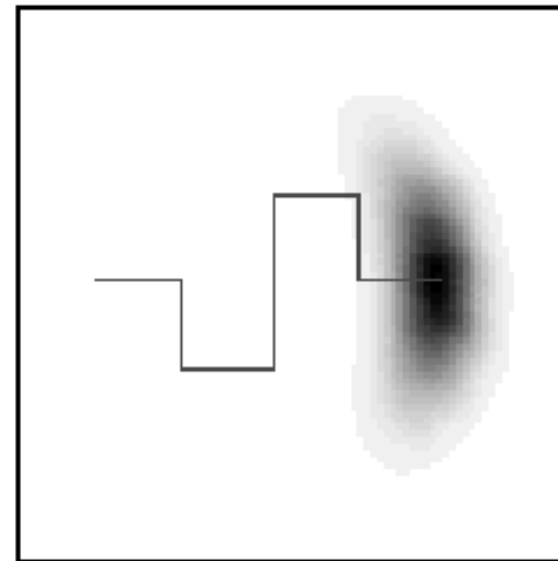
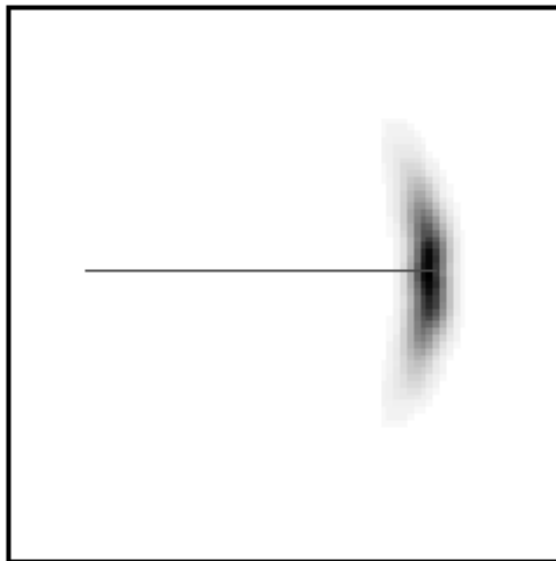
Localização

- Localização absoluta por mapas de ambiente: mapas probabilísticos [Moravec and Elfes, 1985]
 - Mapa probabilístico vs. mapa geométrico:



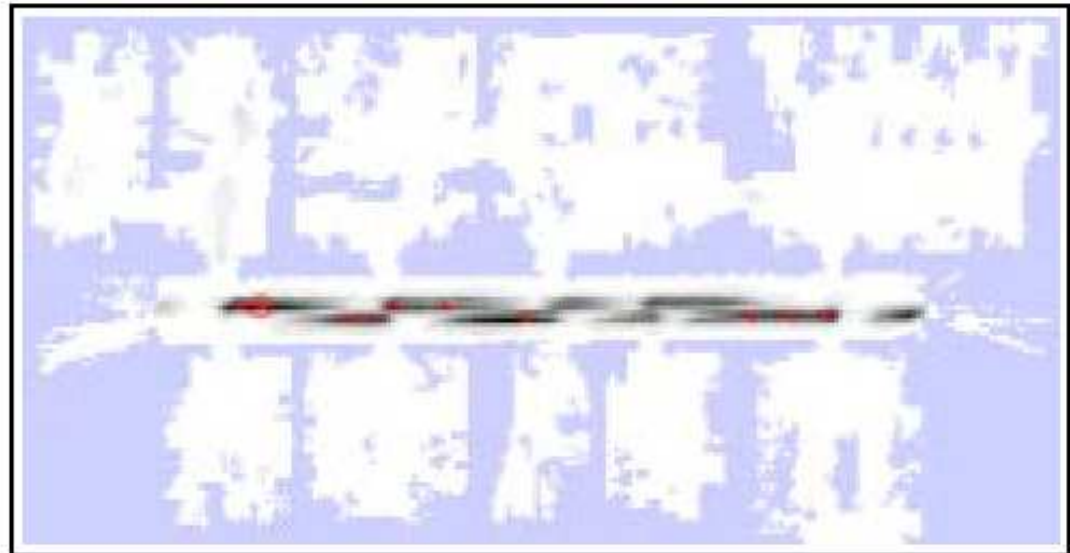
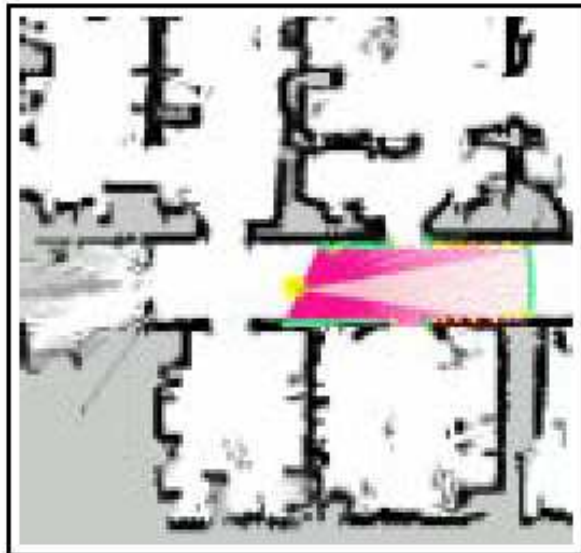
Localização

- Localização absoluta por mapas de ambiente: mapas probabilísticos [Moravec and Elfes, 1985]
 - Dead reckoning [Thrun, 2000]:



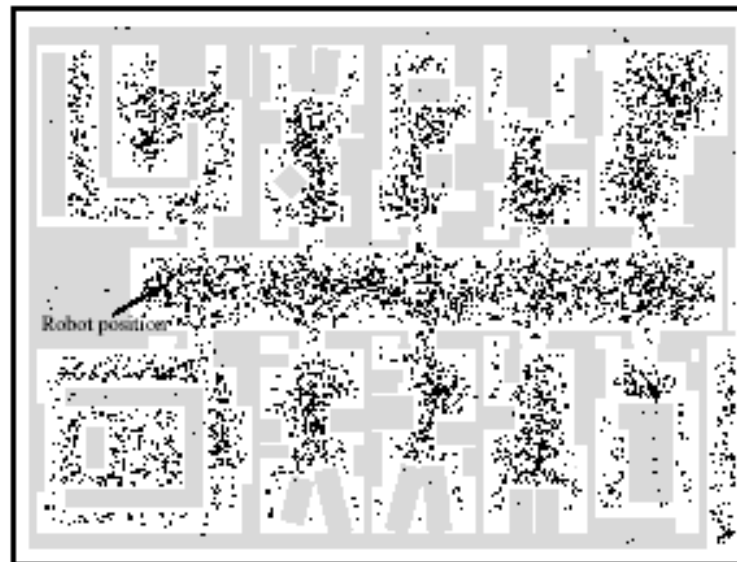
Localização

- Localização absoluta por mapas de ambiente: mapas probabilísticos [Moravec and Elfes, 1985]
 - Integração sensorial (ladar) [Thrun, 2000]:



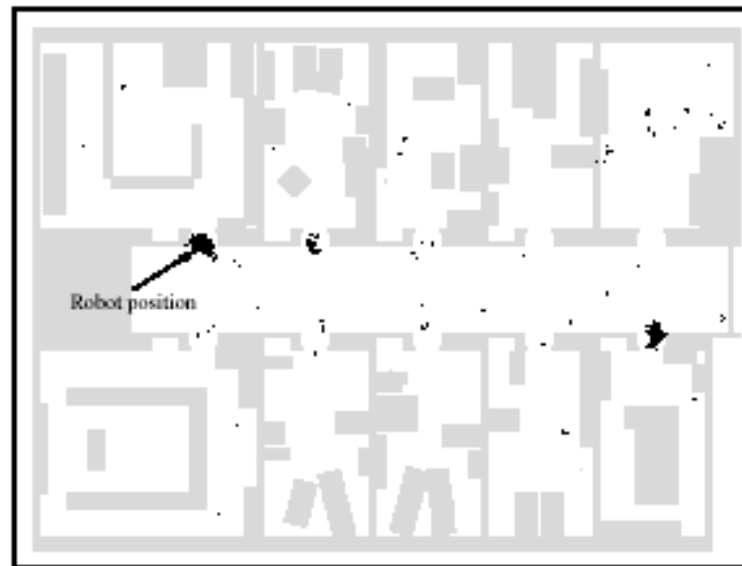
Localização

- Localização absoluta por mapas de ambiente: mapas probabilísticos [Moravec and Elfes, 1985]
 - Localização por Monte Carlo [Thrun, 2000]:



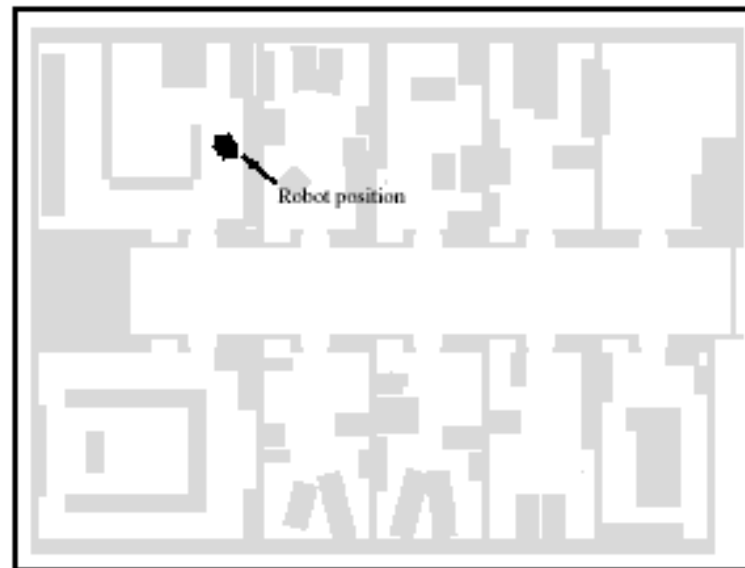
Localização

- Localização absoluta por mapas de ambiente: mapas probabilísticos [Moravec and Elfes, 1985]
 - Localização por Monte Carlo [Thrun, 2000]:



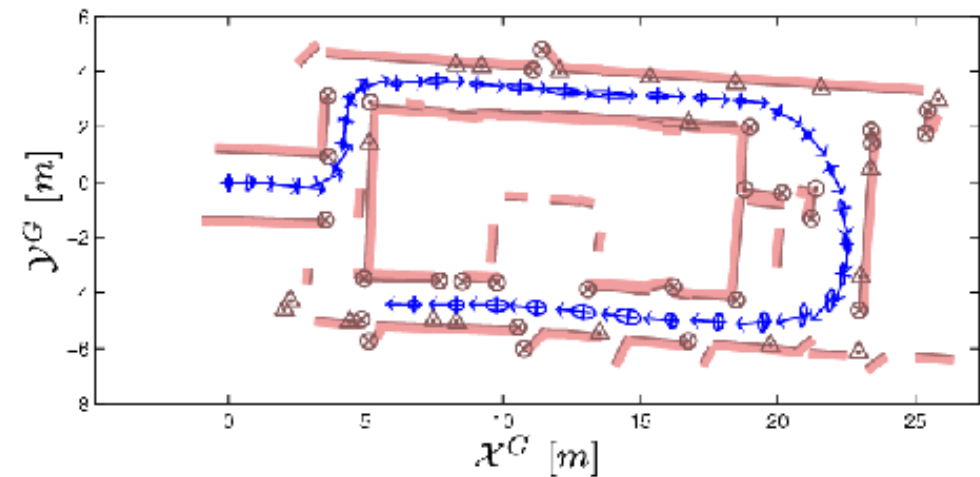
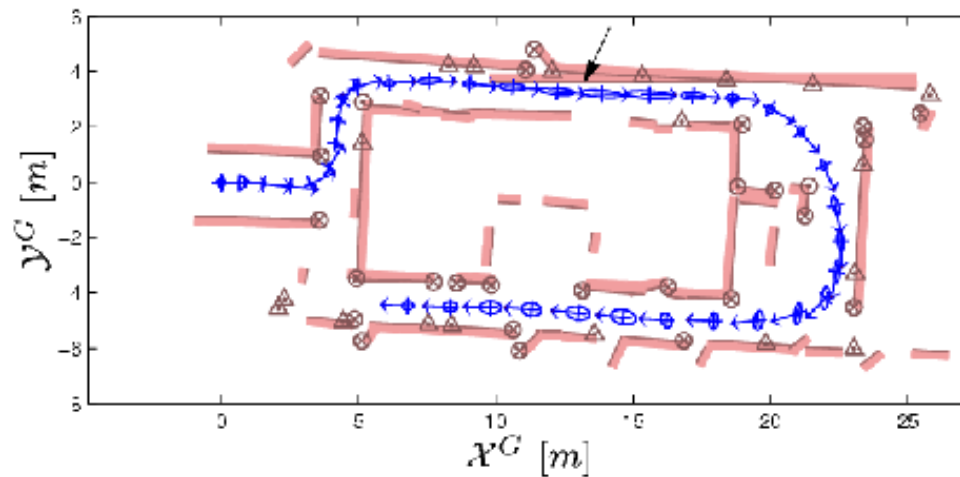
Localização

- Localização absoluta por mapas de ambiente: mapas probabilísticos [Moravec and Elfes, 1985]
 - Localização por Monte Carlo [Thrun, 2000]:



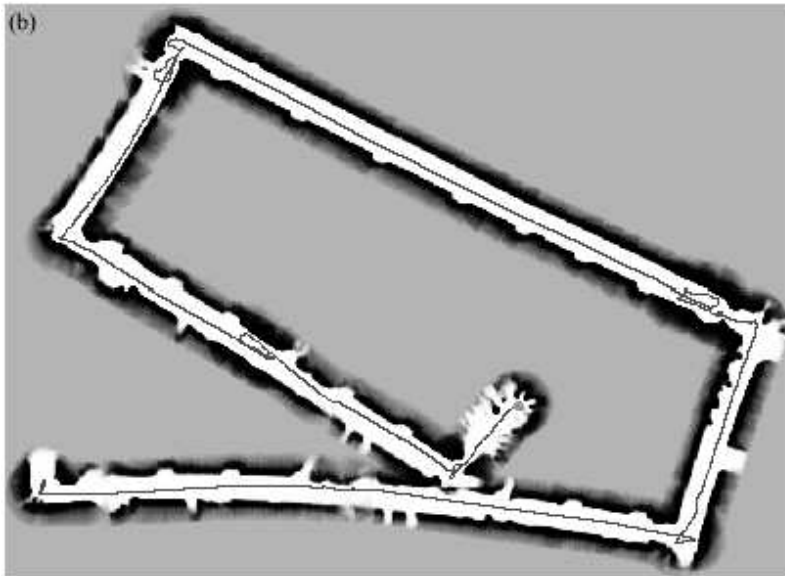
Cartografia

- Problema bastante difícil, sem garantia de convergência:



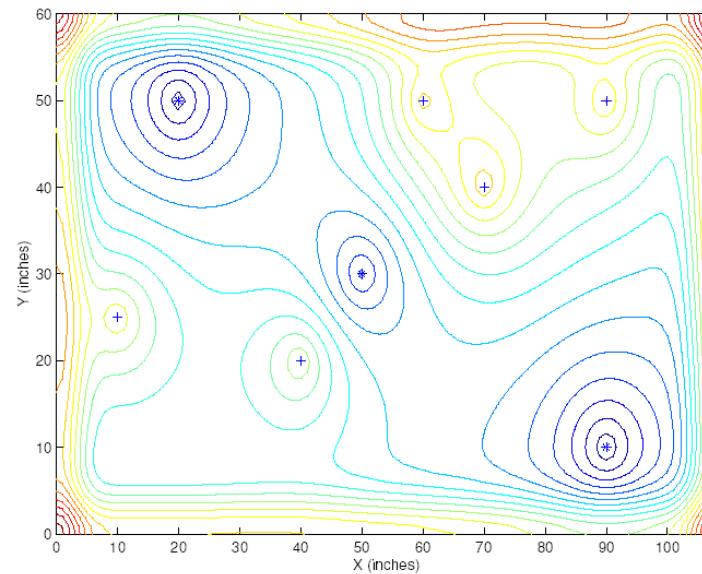
Cartografia

- Problema bastante difícil, sem garantia de convergência:



Planejamento de Trajetórias

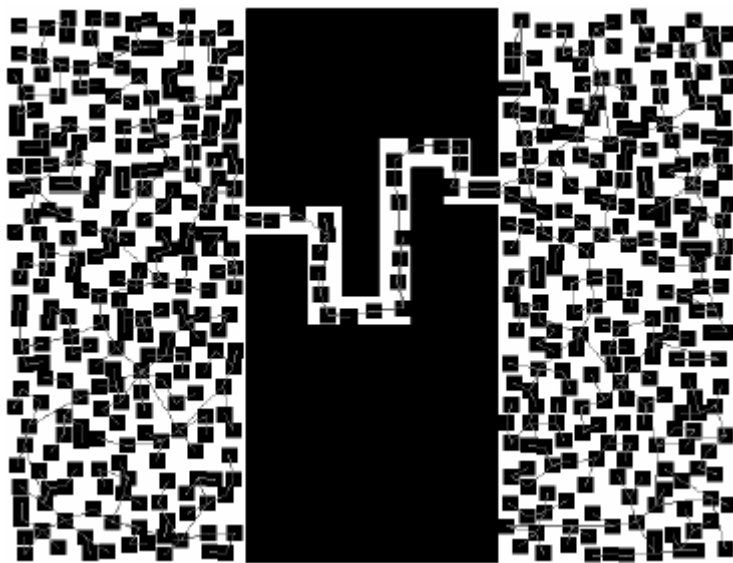
- Campos de potencial



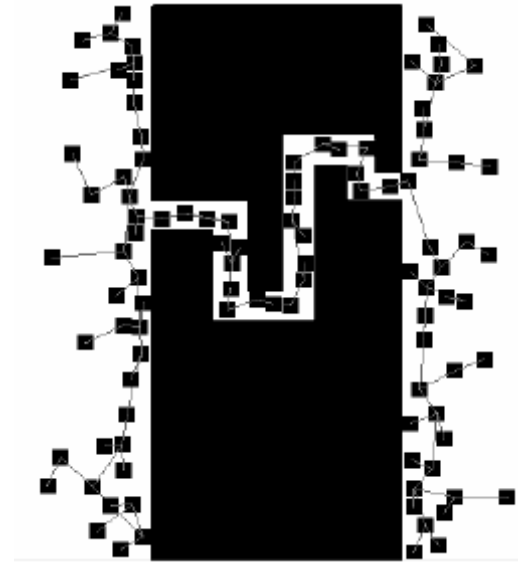
$$E(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{a} \in A} \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{a})^T(\mathbf{x} - \mathbf{a}) + \sum_{\mathbf{r} \in R} \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{r})^T(\mathbf{x} - \mathbf{r})$$

Planejamento de Trajetórias

- Mapas de rotas probabilísticas



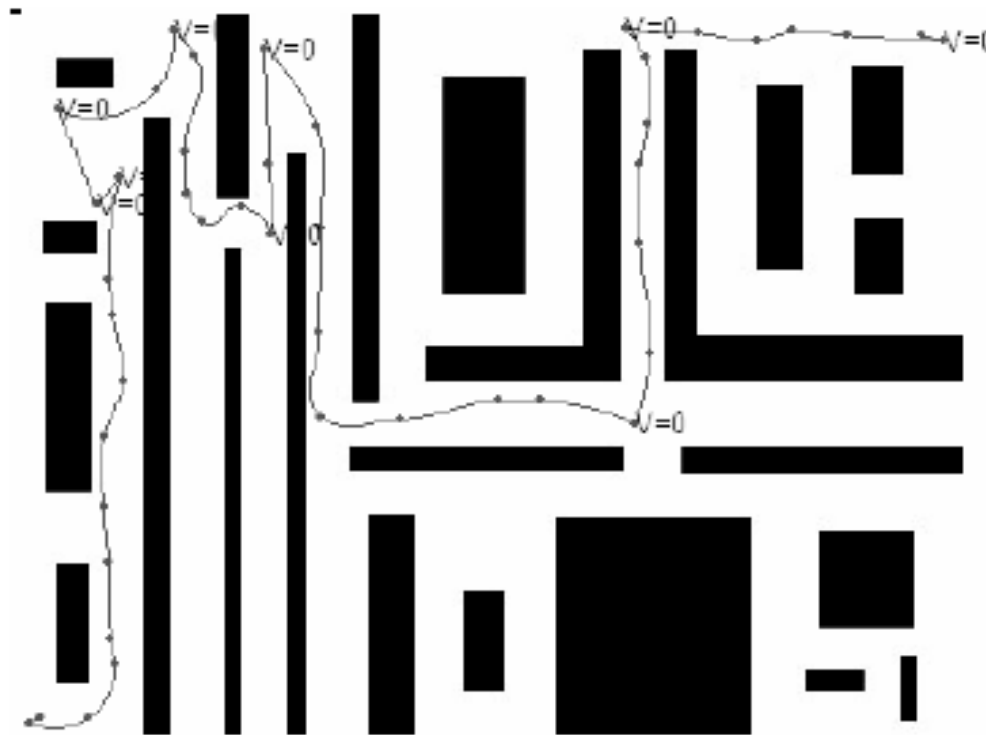
Amostragem uniforme



Amostragem gaussiana

Planejamento de Trajetórias

- Mapas de rotas probabilísticas: aplicação para o robô Omni.



Parte III - Mercado da Robótica Móvel

- Activemedia (<http://www.activrobots.com>)- robôs



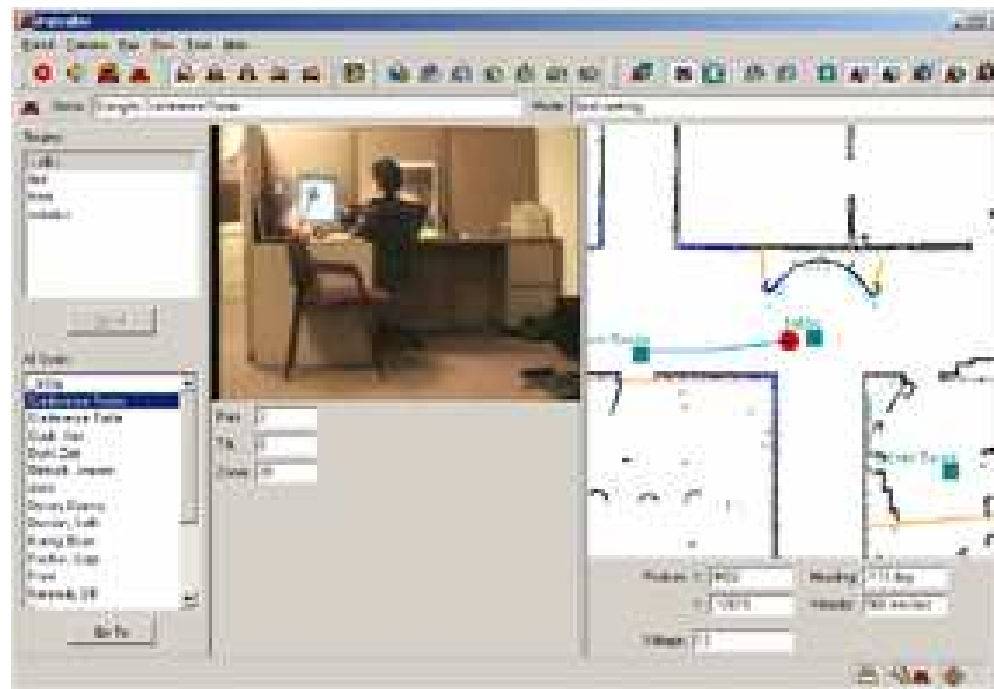
PeopleBot



Pioneer

Parte III - Mercado da Robótica Móvel

- Activemedia (<http://www.activrobots.com>)- software



MobileEyes

Parte III - Mercado da Robótica Móvel

- K-team (<http://www.k-team.com>)- khepera



Base



Radio



Câmera



Garra

Sites Internet

- <http://www.thocp.net/reference/robotics/robotics.html>
- Timeline of robotics
- <http://www.thetech.org/exhibits/online/robotics/universal/index.html>
- Universal robots: the history and working of robotics.

Referências

- [Borges, 1998] Borges, G. A. (1998). Um sistema óptico de reconhecimento de trajetórias para veículos automáticos. Master's thesis, Copele-UFPB, Campina Grande, PB, Brasil.
- [Borges, 2002] Borges, G. A. (2002). *Cartographie de l'environnement et localisation robuste pour la navigation de robots mobiles*. PhD thesis, Université Montpellier II, LIRMM, 161 rue ADA, 34392, Montpellier, Cedex 5, France. *One of the recipients of the 2001/2002 Club EEA prize for the best french thesis in Automatic Control*.
- [Borges and Aldon, 2003] Borges, G. A. and Aldon, M.-J. (2003). Robustified estimation algorithms for mobile robot localization based on geometrical environment maps. *Robotics and Autonomous Systems*, 45(3-4):131–159.
- [Borges and Aldon, 2004] Borges, G. A. and Aldon, M.-J. (2004). Line extraction in 2d range images for mobile robotics. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 45:267–297.
- [Borges et al., 2003] Borges, G. A., Lima, A. M. N., and Deep, G. S. (2003). Controladores cinemáticos de trajetória para robôs móveis com tração diferencial. In *VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*.
- [Brown et al., 2003] Brown, M. Z., Burschka, D., and Hager, G. D. (2003). Advances in computational stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(8):993–1008.
- [Campion et al., 1996] Campion, G., Bastin, G., and D'Andréa-Novel, B. (1996). Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(1):47–62.

- [Moravec and Elfes, 1985] Moravec, H. P. and Elfes, A. (1985). High resolution maps from wide angle sonar. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 116–121.
- [Thrun, 2000] Thrun, S. (2000). Probabilistic algorithms in robotics. *AI Magazine*, 21(4):93–109.