



Universidade de São Paulo
B R A S I L



Arquitetura Híbrida para Robôs Móveis Baseada em Funções de Navegação com Interação Humana

Prof. Dr. Valdir Grassi Junior
Depto. de Engenharia Elétrica
EESC/USP

Estrutura da Apresentação

- Introdução
 - Motivação
 - Arquiteturas para robôs móveis
 - Planejamento de Movimento
 - Funções de navegação
 - Interação homem-robô
- Arquitetura desenvolvida
- Implementação e Resultados
- Conclusão

2

Introdução

Motivação

- Robôs móveis autônomos
- Interação do homem com o robô
- Aplicações:
 - Carro autônomo
 - Cadeira de rodas



© Valdir Grassi Jr

4

Arquitetura para robôs móveis

- Descreve uma maneira de se construir o software de controle do robô a partir de componentes básicos
 - Componentes presentes no sistema
 - Interação dos componentes entre si
- Têm um papel de guia na implementação do sistema
 - Restrições na forma como o sistema deve ser implementado
- Componentes básicos:
 - Percepção, planejamento e atuação

5

Classificação das arquiteturas

- Deliberação:
 - Tomada de decisão ou planejamento baseado em um modelo interno do mundo;
- Reação:
 - Execução de ações pré-definidas em resposta a informações sensoriais obtidas localmente;
- Classificação:
 - Arquiteturas deliberativas
 - Arquiteturas reativas
 - Arquiteturas híbridas (deliberativas/reativas)

6

Características das arquiteturas

- Arquiteturas deliberativas
 - Modelos internos do mundo (ambiente)
 - Informações globais
 - Representação simbólica e algoritmos complexos de planejamento
 - Resposta mais lenta a mudanças no ambiente
- Arquiteturas reativas
 - Nenhum modelo interno do mundo
 - Informações locais
 - Ações pré-definidas a determinados estímulos (simplicidade computacional)
 - Resposta mais rápida a mudanças no ambiente



7

Interação homem-robô

- Sistemas autônomos, semi-autônomos, teleoperados;
- Papel do homem na interação:
 - Supervisor;
 - Operador;
 - Parceiro de tarefa;
 - Mecânico ou Programador;
 - Espectador;

8

Supervisor

- Homem define objetivos de navegação, tarefas e missões para que o robô execute
- Supervisiona execução das tarefas

Operador

- Interação de forma mais intensa,
- Interfere de forma mais específica e contínua nas ações do robô

9

Parceiro de tarefa

- O homem ajuda o robô a desempenhar sua tarefa como um colega de trabalho
 - Realizando parte da tarefa que o robô é incapaz de fazer

Mecânico ou Programador

- O homem interage fazendo modificações no hardware ou software do sistema
 - Exemplo: robôs enviados à Marte

10

Espectador

- Homem precisa ter certo entendimento das atividades do robô para compartilhar o ambiente com ele
 - Exemplo: aspirador de pó autônomo

11

Planejamento de movimento

- Determinar os movimentos que o robô deve realizar para alcançar uma posição ou configuração desejada sem que ocorram colisões
- Métodos de planejamento de movimento:
 - Roadmaps
 - Decomposição em células
 - Campos potenciais
 - Planejamento baseado em amostragem

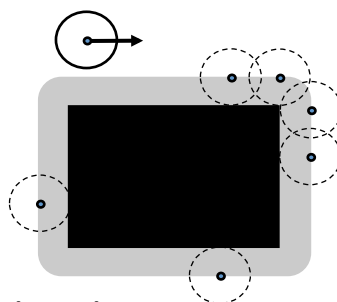
12

Espaço de Configuração

- Variável de configuração de um robô permite a descrição completa do robô relativo a um sistema de coordenadas fixo no ambiente
- Número de parâmetros que descrevem a configuração de um robô é igual ao número de graus de liberdade
- Espaço de configuração é o conjunto de todas as configurações possíveis do robô
- Espaço de configuração X Espaço de trabalho (ou de tarefa, ou operacional)

Espaço de Configuração

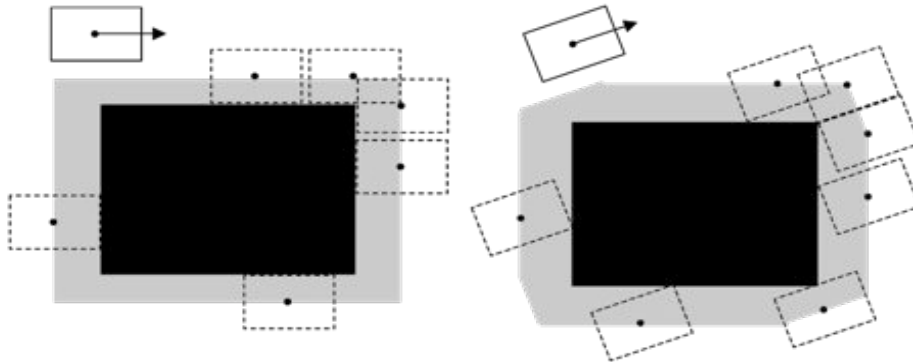
Robô Circular



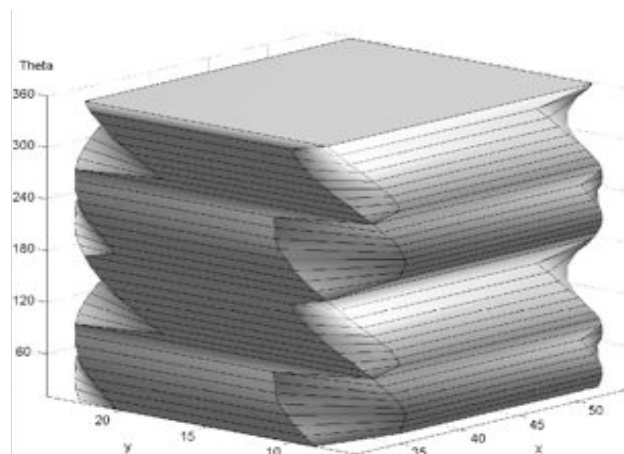
- Robô é considerado como um ponto no espaço de configurações

Espaço de Configuração

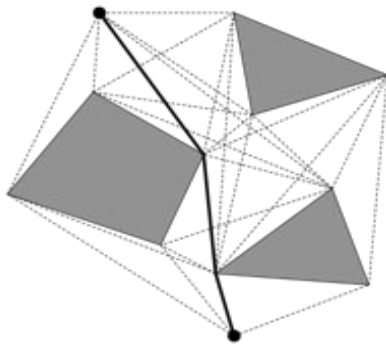
Robô Retangular



Espaço de Configuração



Roadmaps



Grafo de Visibilidade

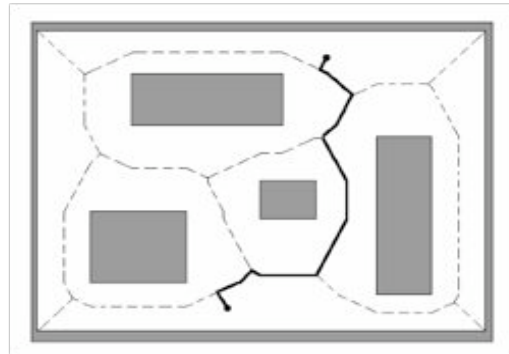
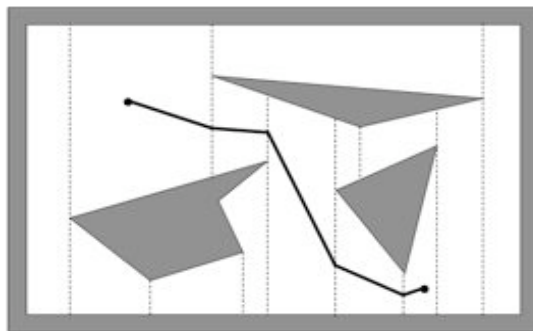
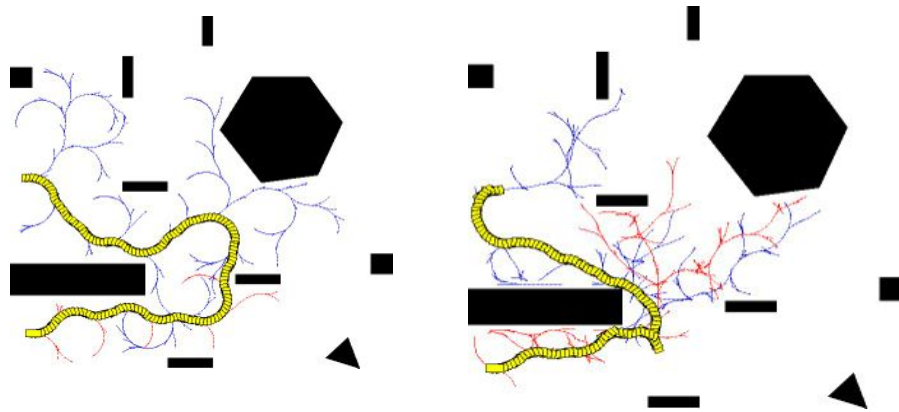


Diagrama generalizado de Voronoi

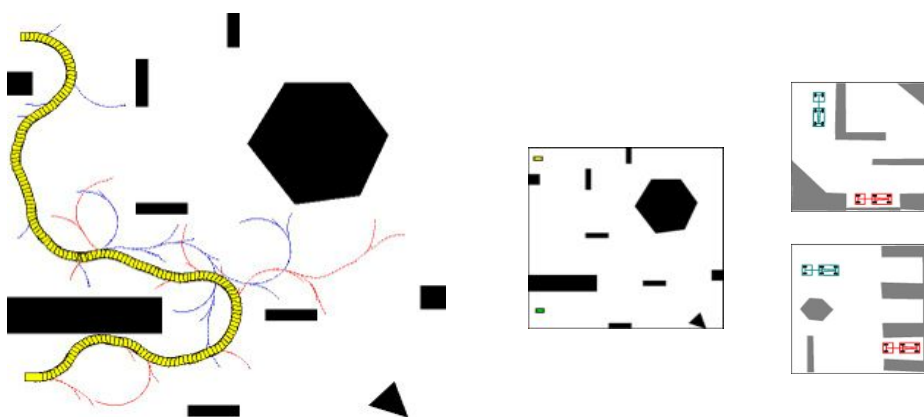
Decomposição em Células



Planejamento Baseado em Amostragem



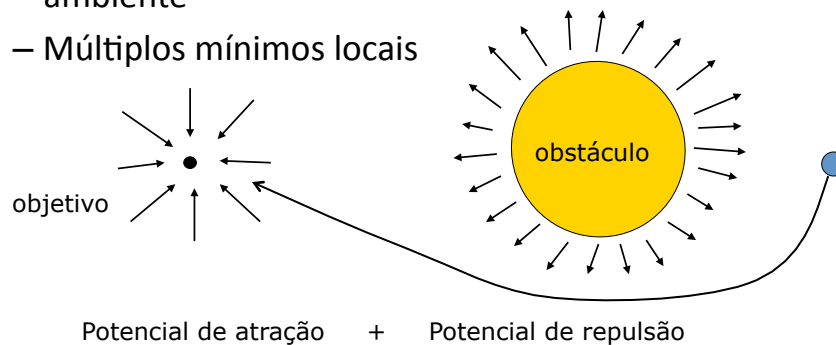
Exemplo de planejamento para veículos



Os planejadores de movimento probabilísticos, permitem, de maneira fácil, a inclusão das restrições cinemáticas-dinâmicas.

Campo Potencial

- Introduzido por Khatib (1986)
 - Abordagem local: sem completo conhecimento sobre o ambiente
 - Múltiplos mínimos locais



Funções de Navegação

- Rimon e Koditschek (1992)
- Função potencial sem mínimos locais
- Conhecimento global do ambiente necessário
 - Definida no espaço de configurações livres do robô
- Função calculada para uma posição de destino desejada (objetivo)
- A partir de qualquer posição no ambiente, o robô pode ser conduzido ao objetivo da função

Funções de Navegação

- Propriedades:
 - Suave no espaço livre de configuração (C_{free})
 - Único mínimo global no objetivo
 - Uniformemente máxima na fronteira de C_{free}
 - Função do tipo Morse
 - Hessiano da função nos pontos críticos (ex: pontos de sela) é não-singular, ou seja, os pontos críticos são pontos de equilíbrio instável.
- Convergência para praticamente todo q_{init} em C_{free}

25

Funções de Navegação

Função de navegação:

$$\phi_{\kappa}(q) = \frac{\|q - q_{goal}\|^2}{\left[\|q - q_{goal}\|^2 + \beta(q)\right]^{1/\kappa}}$$

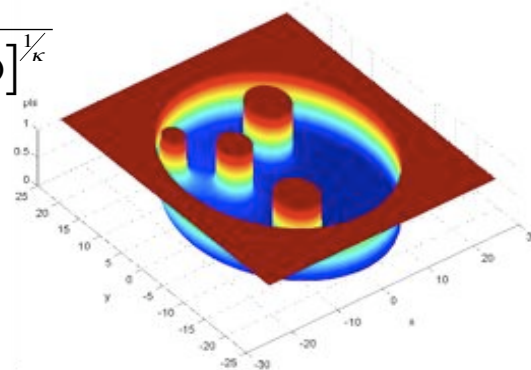
$$\beta = \prod_{i=0}^M \beta_i(q)$$

Ambiente circular:

$$\beta_0(q) = -\|q - q_0\|^2 + \rho_0^2$$

Obstáculos:

$$\beta_j(q) = \|q - q_j\|^2 - \rho_j^2$$



$k = 2.9$

26

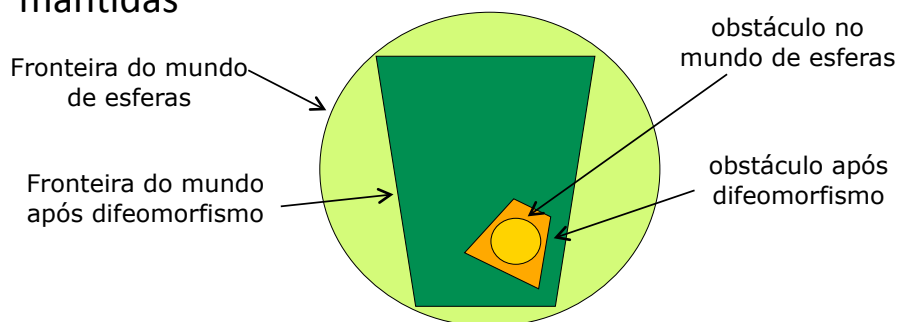
Funções de Navegação

- Dificuldades:
 - Definição de uma função analítica para ambientes de geometria complexa
 - Determinar um valor para o parâmetro k
- Alternativas:
 - Mapeamento difeomórfico entre um ambiente de esferas e um ambiente de geometria complexa
 - Decomposição do ambiente em regiões de geometria mais simples e sequenciamento de controladores
 - Cálculo numérico de funções de navegação

28

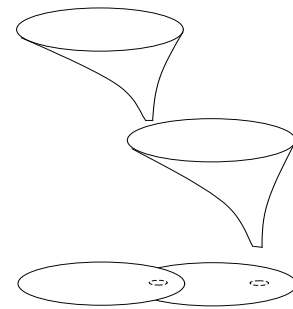
Difeomorfismo

- Mapeamento entre dois espaços
 - suave, bijetor, e com inversa suave
- Propriedades da função de navegação são mantidas



Sequenciamento de funções de navegação

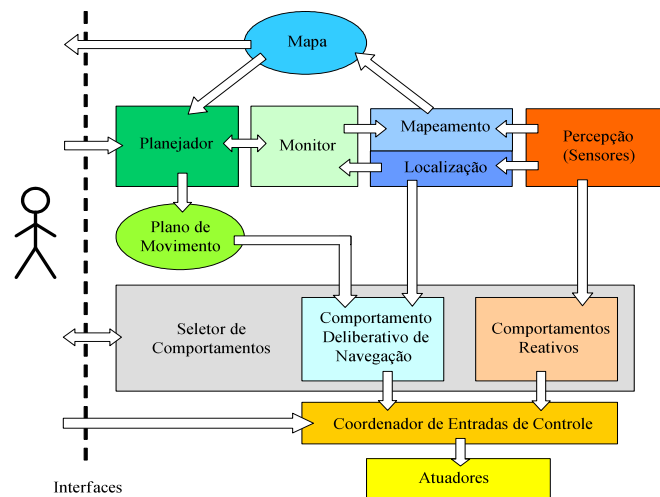
- Sequenciamento de controladores
 - Burridge; Rizzi; Koditschek (1999)
 - Cada função potencial definida no seu domínio de convergência
- *Sequência de funís*
- Decomposição do ambiente em células
 - Conner, Rizzi e Choset (2003)



30

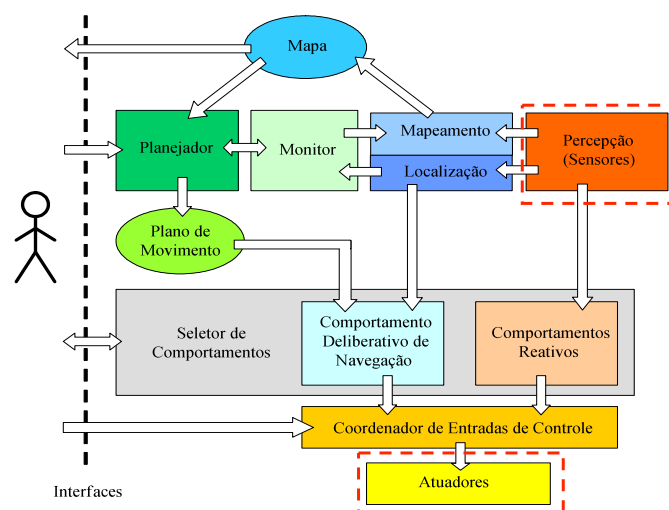
Arquitetura Desenvolvida

Arquitetura híbrida para robô móvel desenvolvida



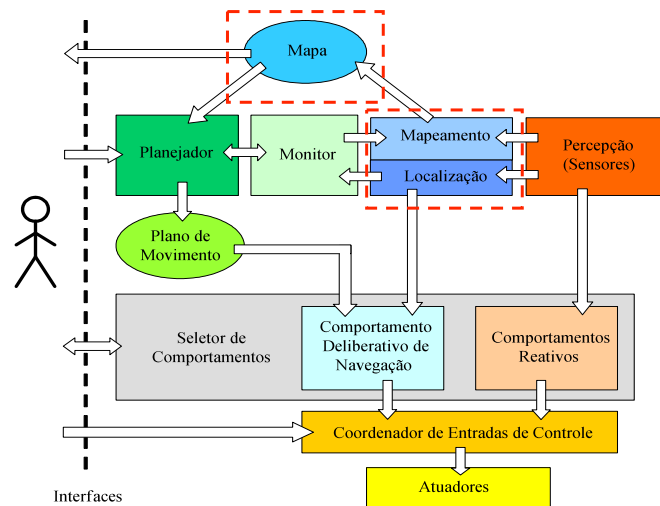
32

Arquitetura híbrida para robô móvel desenvolvida



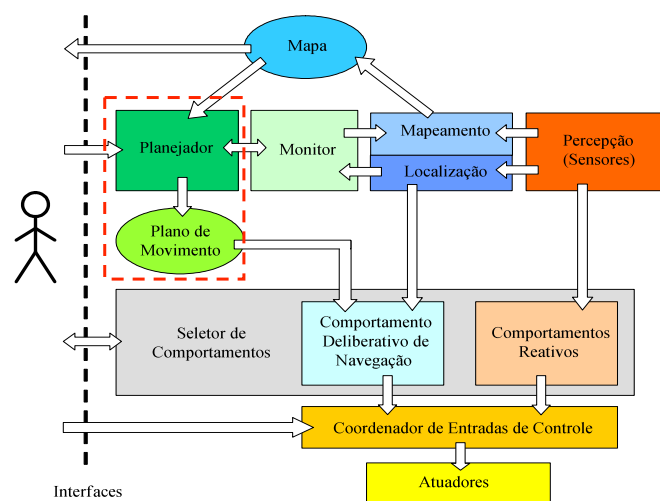
33

Arquitetura híbrida para robô móvel desenvolvida



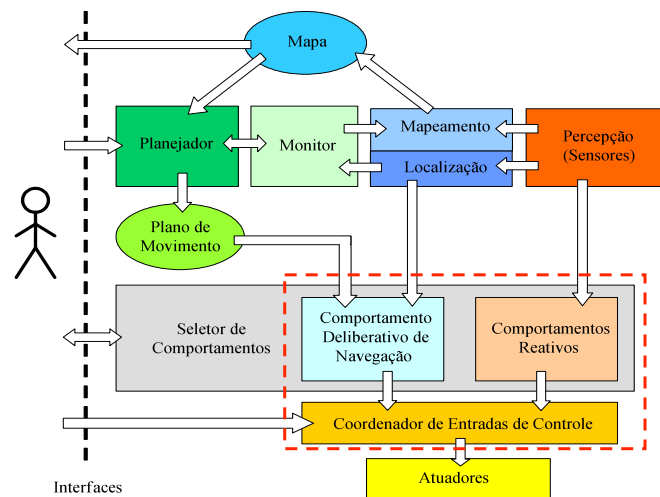
34

Arquitetura híbrida para robô móvel desenvolvida



36

Arquitetura híbrida para robô móvel desenvolvida



38

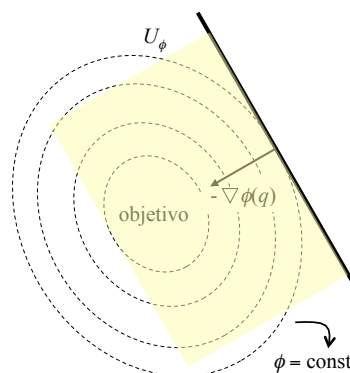
Comportamento deliberativo de navegação

Função de navegação: $\phi(q)$

Para atingir o objetivo: $\dot{\phi}(q) < 0$

Possível controlador (gradiente negativo):
 $\dot{q} = u_{\phi} = -\nabla \phi(q)$

Semi-espço admissível
 (Esposito; Kumar, 2002)



39

Comportamento reativo de desvio de obstáculos

Função de restrição imposta pelo obstáculo

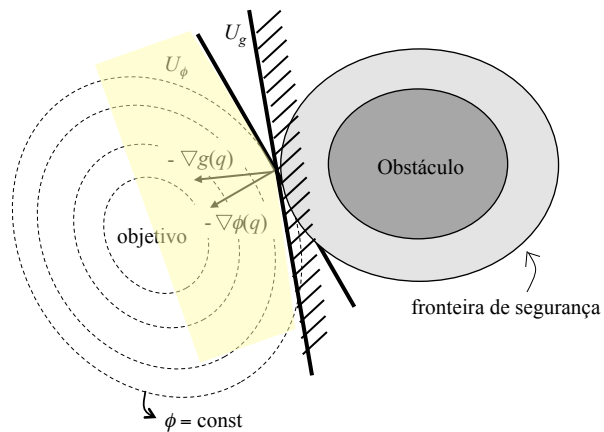
$$g_i = g_i(z_i, f_i, q)$$

Distância ao obstáculo deve aumentar

$$\dot{g}_i \leq 0$$

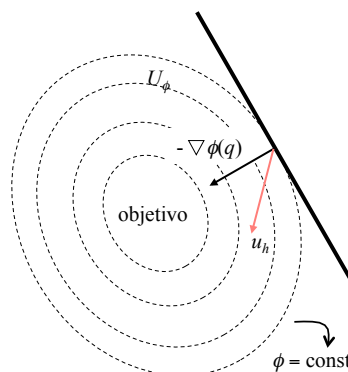
Espaço admissível

$$F = U_\phi \cap U_g$$



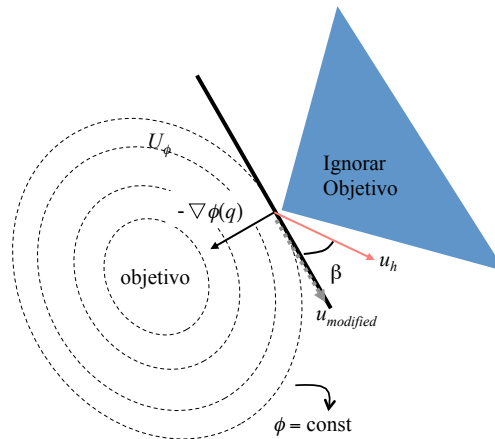
40

Combinando entrada do usuário com comportamento deliberativo



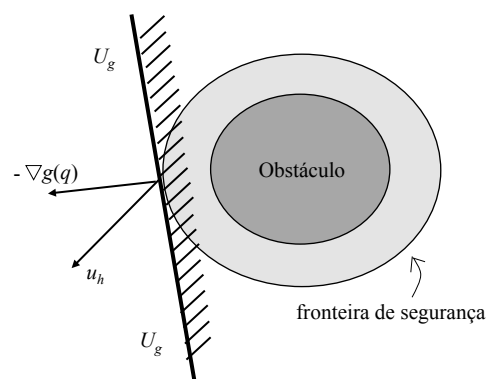
41

Combinando entrada do usuário com comportamento deliberativo



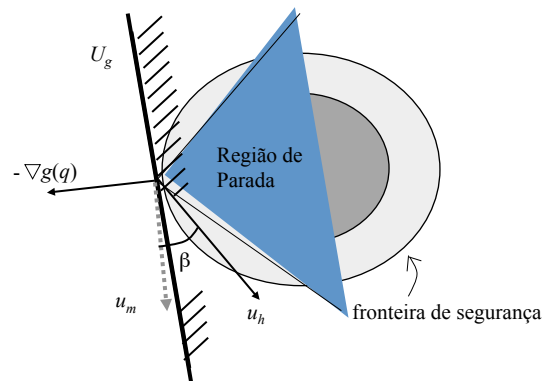
42

Combinando entrada do usuário com desvio de obstáculo



43

Combinando entrada do usuário com desvio de obstáculo



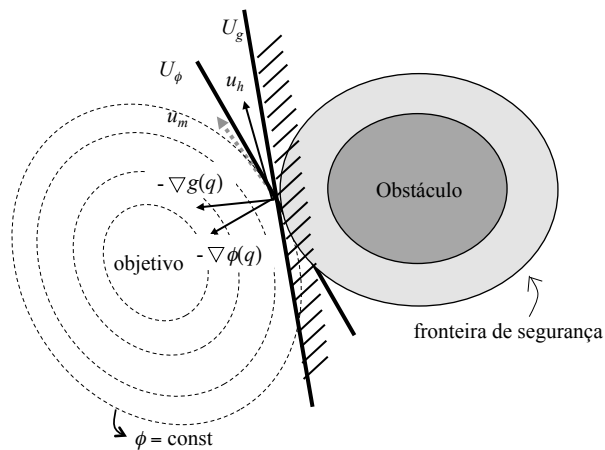
44

Algoritmo de coordenação de entradas de controle

- Se existe entrada de controle do usuário:
 - Coordena entrada do usuário com comportamento deliberativo de navegação (**alcançar objetivo**);
 - Coordena entrada resultante com comportamento reativo de desvio de obstáculos (**integridade física do robô**);
- Senão:
 - Coordena comportamento deliberativo de navegação (**alcançar objetivo**) com comportamento reativo de desvio de obstáculo (**integridade física do robô**);

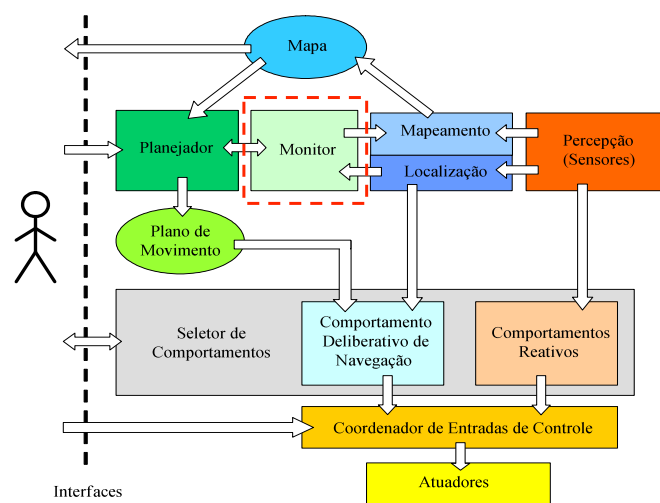
45

Plano deliberativo, comportamentos reativos, e entradas de usuário



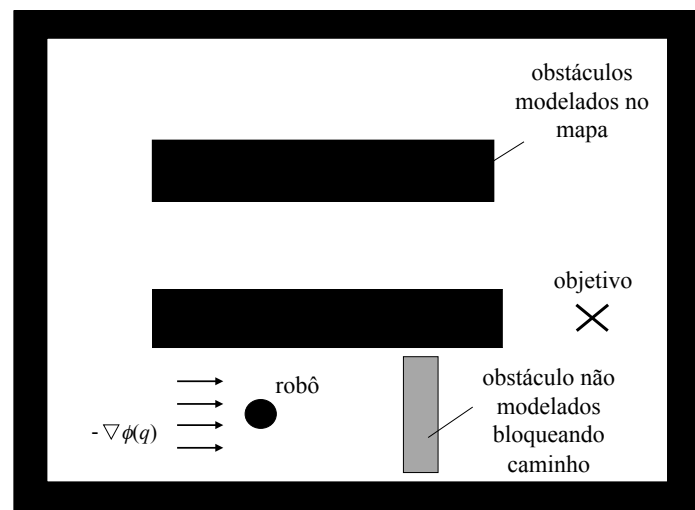
46

Arquitetura híbrida para robô móvel desenvolvida



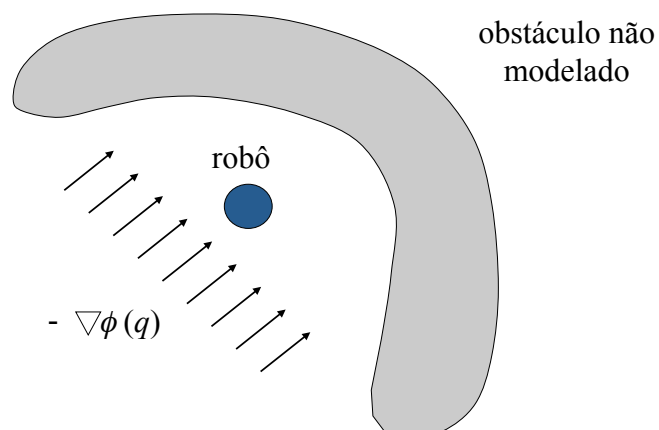
47

Monitor de progresso e replanejamento



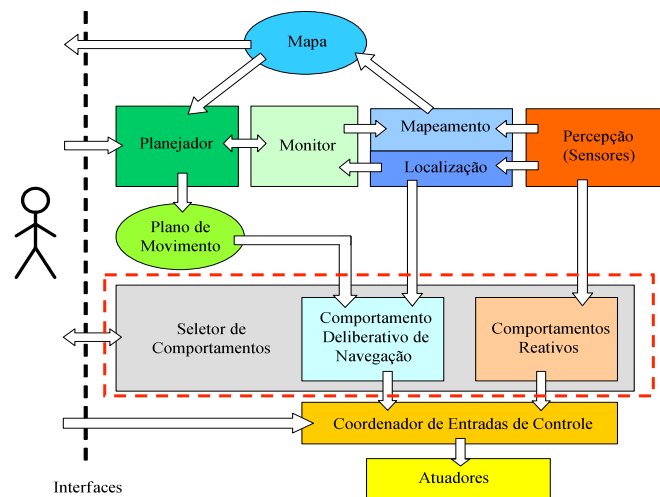
48

Monitor de progresso e replanejamento



49

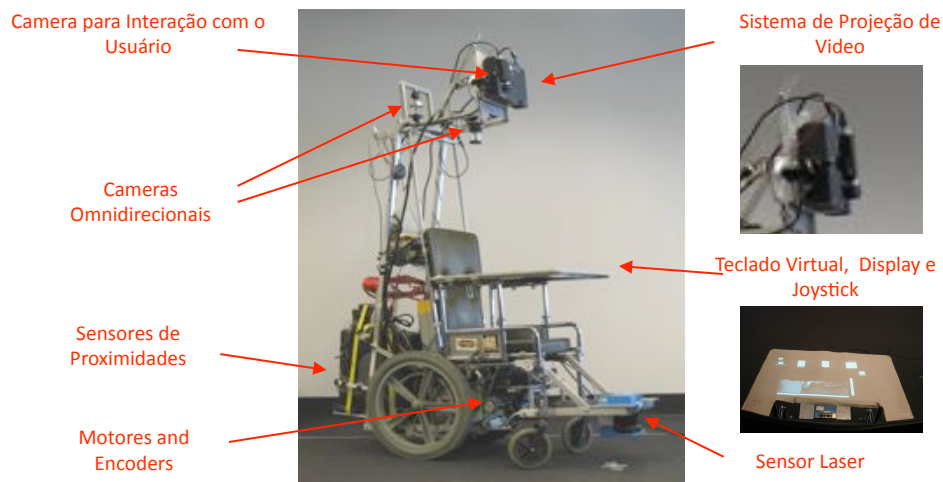
Arquitetura híbrida para robô móvel desenvolvida



50

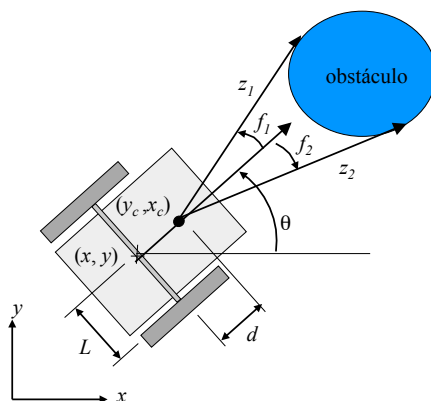
Implementação e Resultados

Implementação: cadeira de rodas *SmartChair*



53

Modelo do sistema



Equações de movimento:

$$\dot{x} = v \cos(\theta)$$

$$\dot{y} = v \sin(\theta)$$

$$\dot{\theta} = \omega$$

Variáveis de controle:

$$\dot{q} = \begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix}$$

54

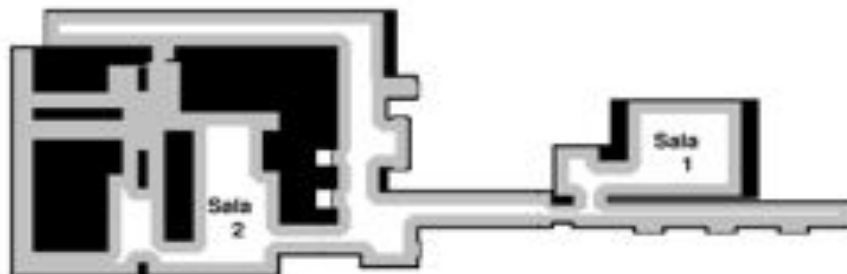
Mapeamento e Localização

- Localização:
 - Odometria
- Mapeamento
 - Mapa fornecido *a priori*
 - Não é atualizado durante navegação

55

Espaço de configurações

- Mapa do laboratório expandido: robô é considerado como um ponto no espaço de configurações



56

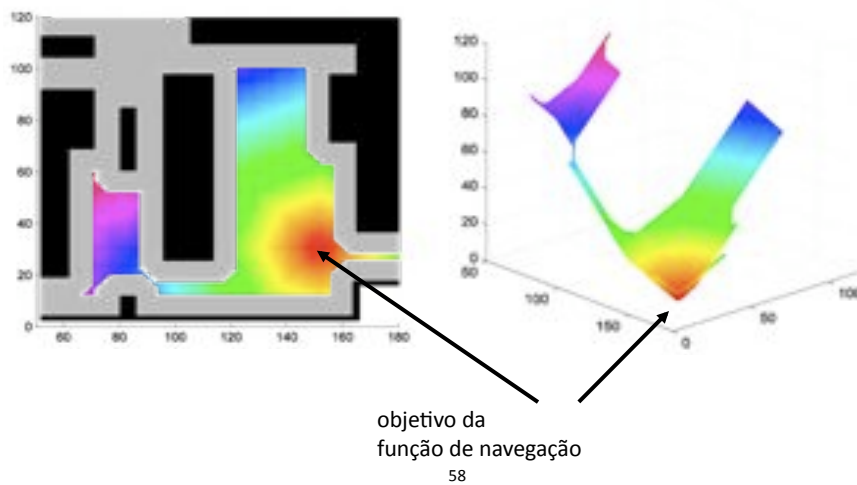
Planejador de movimento

- Algoritmo *wave-front* (programação dinâmica)
- Aproximação de uma função de navegação

3.5	2.5	1.5	1	1.5
3	2	1	0	1
		1.5	1	1.5
		2.5	2	2.5
5.5	4.5	3.5	3	3.5

57

Função potencial de navegação



Outros aspectos de implementação

- Seletor de comportamentos manual
- Monitor de progresso e replanejamento não foram implementados nesta versão
- Coordenador de entradas de controle implementado conforme método desenvolvido
 - Comportamento deliberativo de navegação
 - Comportamento reativo de desvio de obstáculos
 - Entrada do usuário através de um joystick

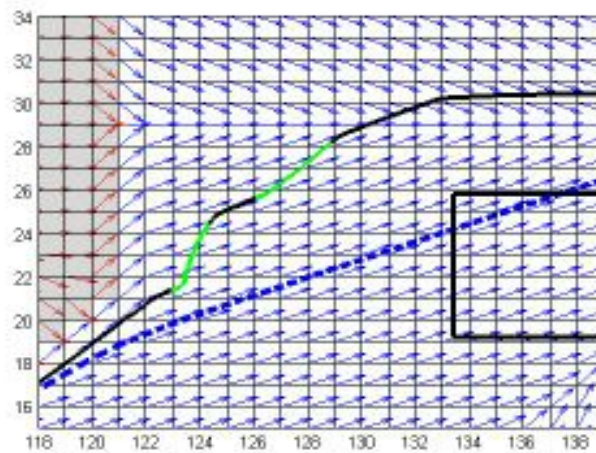
59

Experimentos

- Três modos de operação:
 - Autônomo
 - Manual
 - Semi-autônomo
- Dois ambientes diferentes
- Presença de obstáculo não modelado no mapa
 - Este obstáculo não foi levado em consideração no planejamento da trajetória

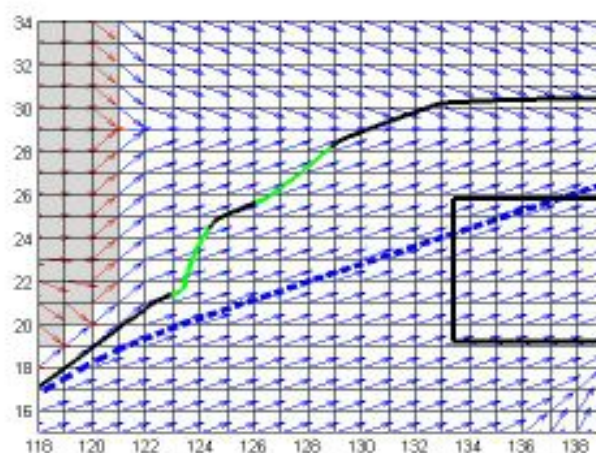
60

Modo de operação autônomo



61

Modo de operação autônomo



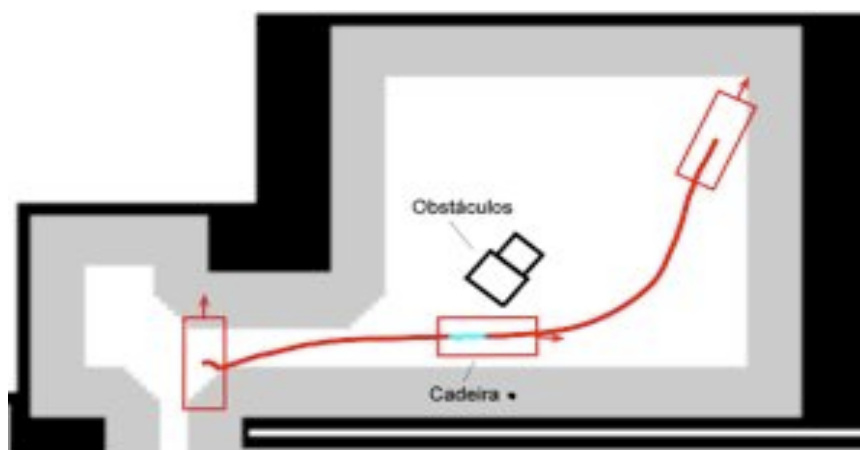
62

Múltiplas trajetórias



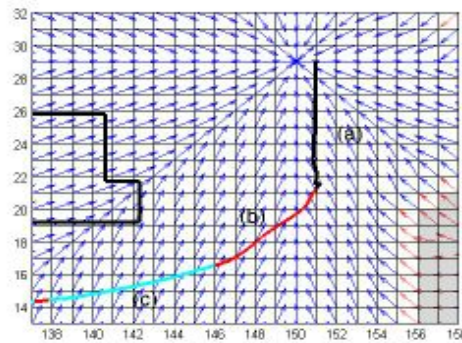
63

Modo de operação manual



64

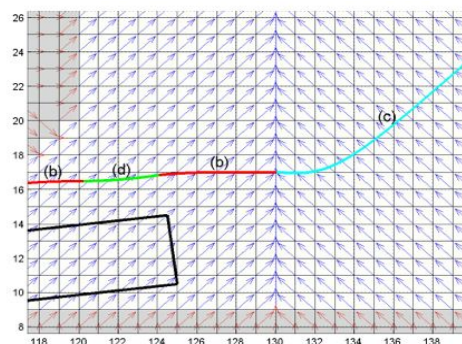
Modo de operação semi-autônomo



- (a)** plano deliberativo **(b)** entrada do usuário
(c) comportamento reativo

65

Modo de operação semi-autônomo

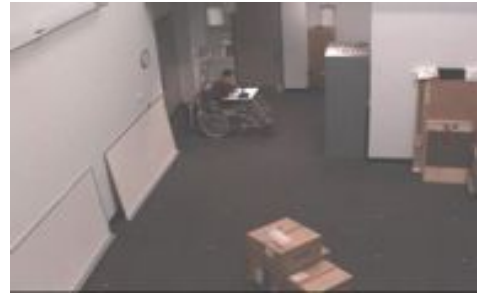


- (a)** Plano deliberativo **(b)** entrada do usuário
(c) Entrada do usuário **(d)** comportamento reativo
modificada

Modo de operação autônomo



Sem obstáculos

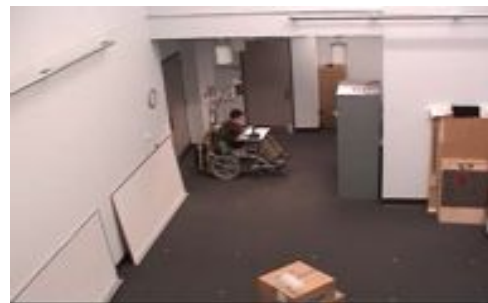


Com obstáculo não modelado

Modo manual e modo semi-autônomo



Modo manual





Modo semi-autonomo

Desempenho do sistema

- Remote Objects Control Interface – ROCI
 - Plataforma de programação
 - Modular, distribuida
 - Integração dos módulos em tarefas descritas em um arquivo XML
- Pentium 4, 2.4GHz, Windows 2000
- Sensor laser a 5Hz
- Odometria a 9Hz
- Velocidade da cadeira de rodas 0.13m/s

69

RRT: Rapidly-exploring Random Trees




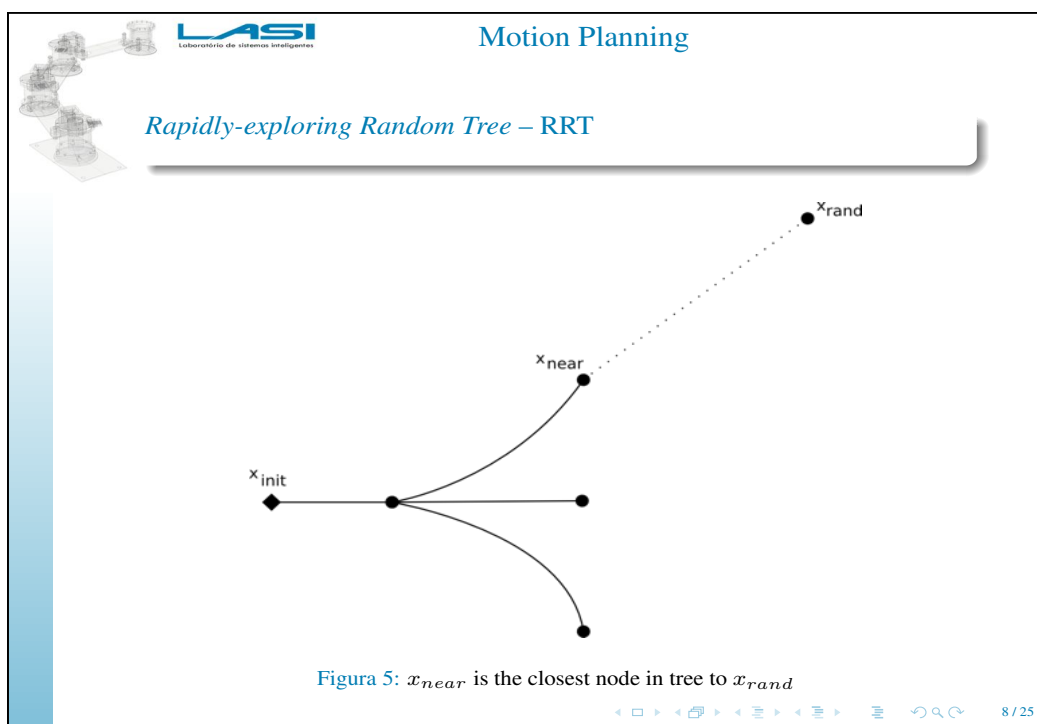
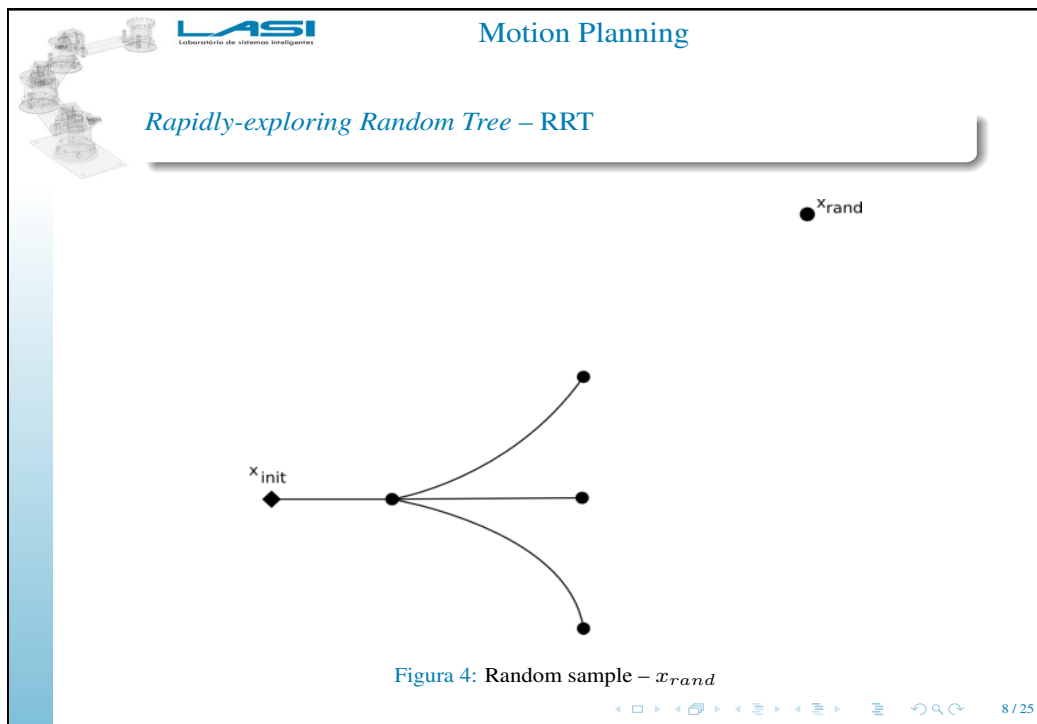
Laboratório de sistemas inteligentes

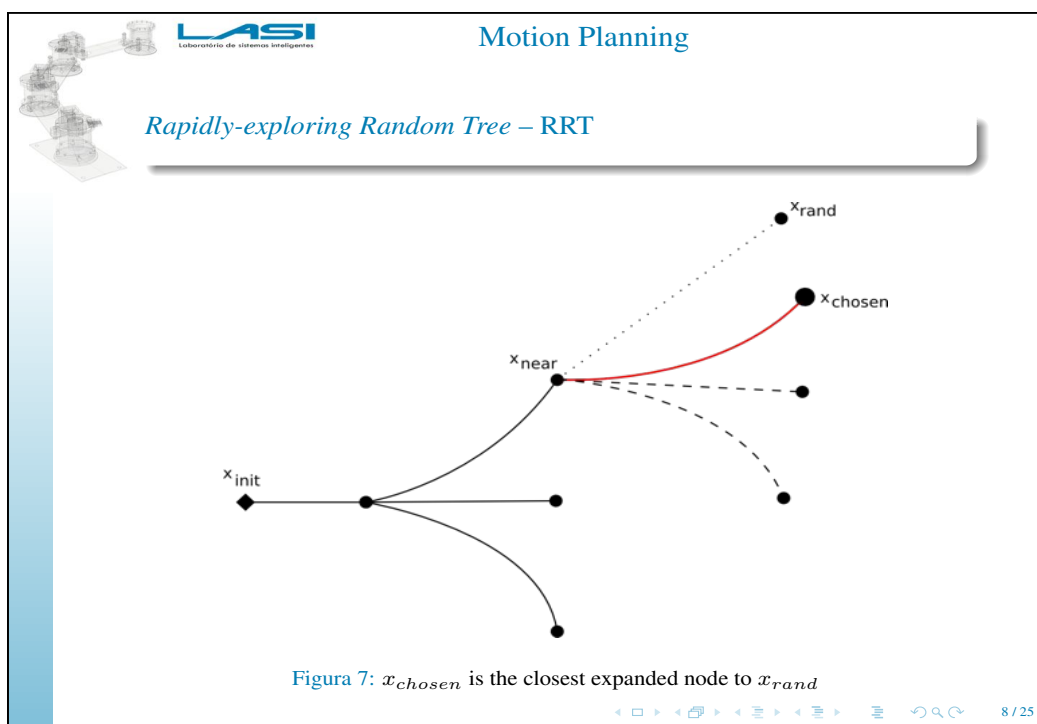
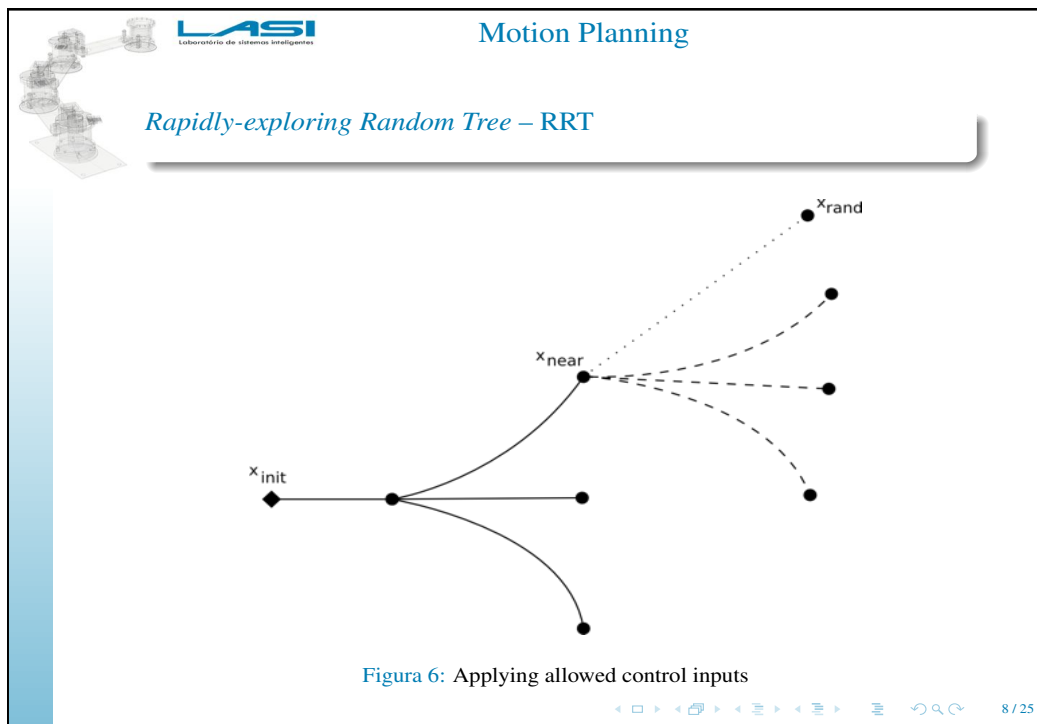
Motion Planning

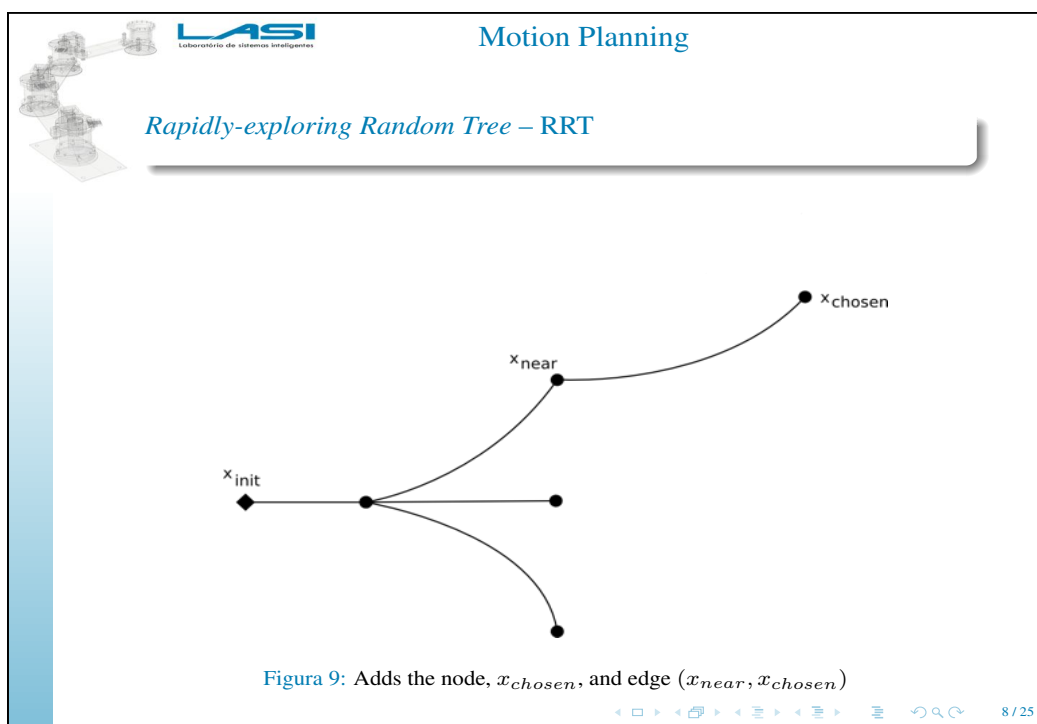
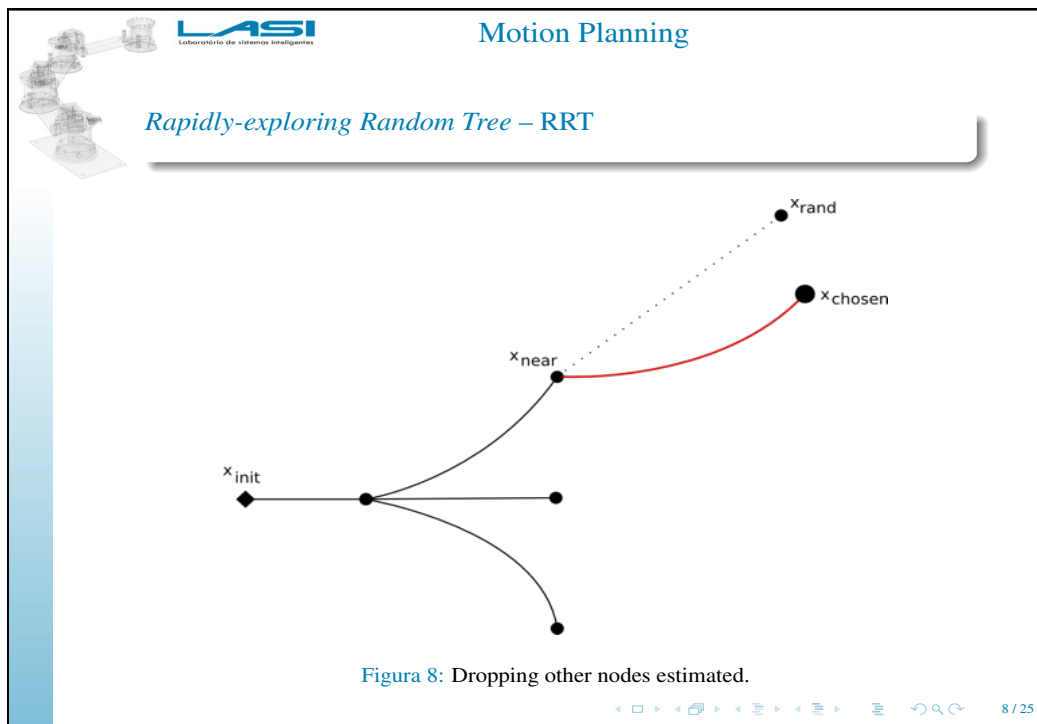
Rapidly-exploring Random Tree – RRT

Figura 3: Tree with 4 expanded nodes

8 / 25







LABORATÓRIO DE SISTEMAS INTELIGENTES

Motion Planning

Rapidly-exploring Random Tree – RRT

x_{init}

x_{goal}

Figura 10: Guiding the sampling

Navigation icons: back, forward, search, etc.

8 / 25

LASI
Laboratório de Sistemas Inteligentes

Mobile robot model

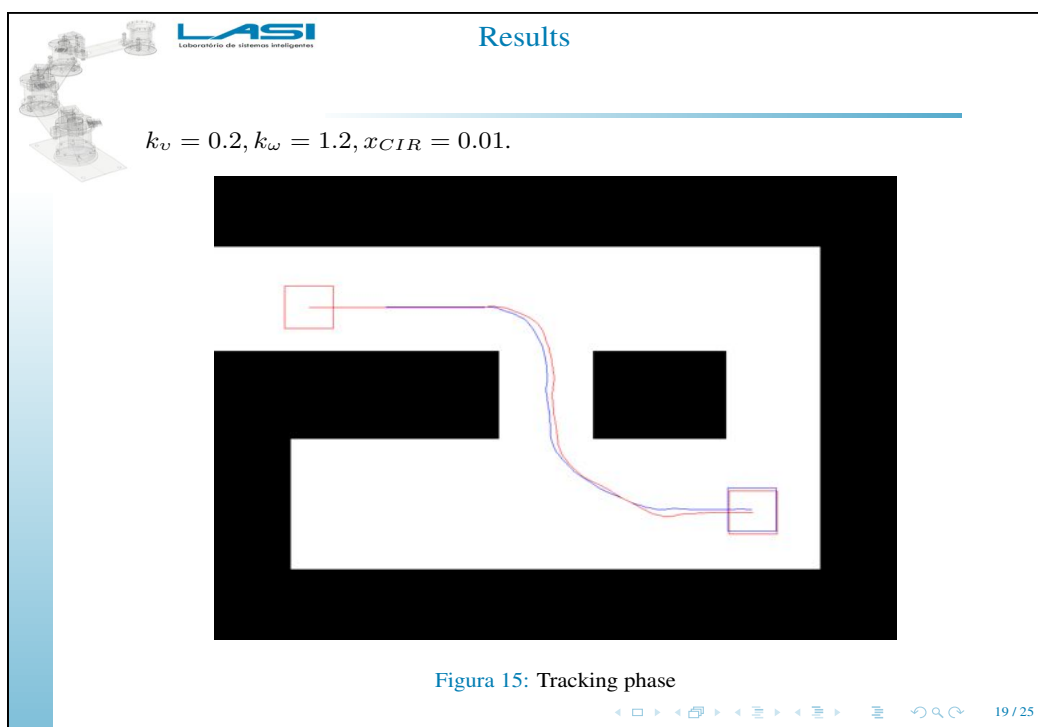
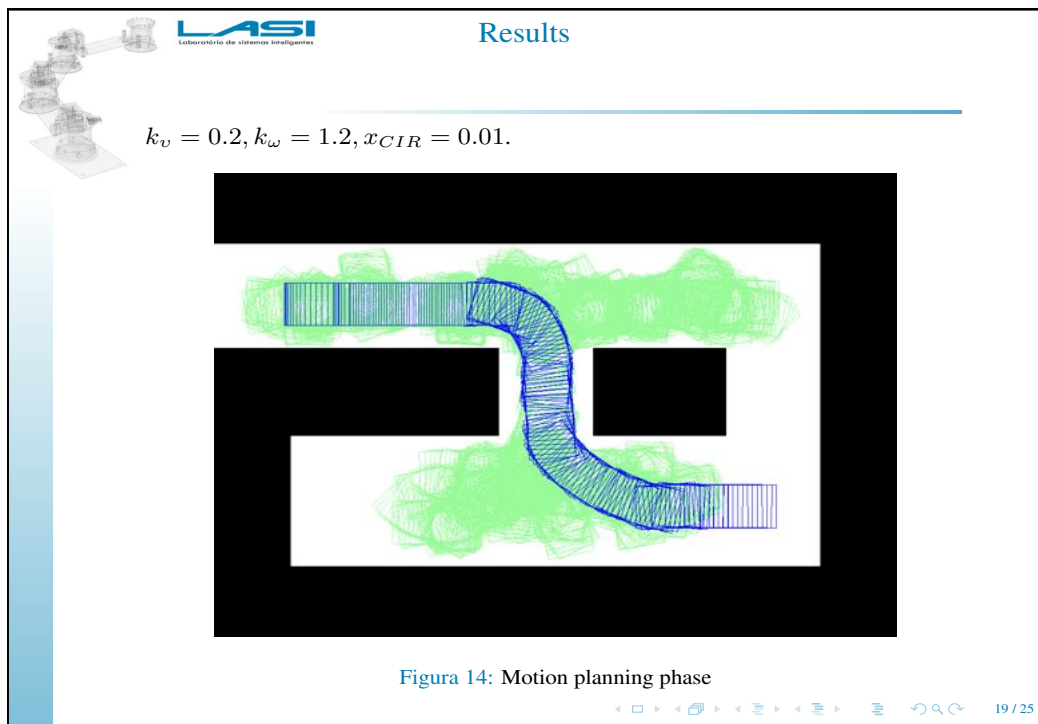
- Kinematic Model
- Dynamic Model
- Tracking

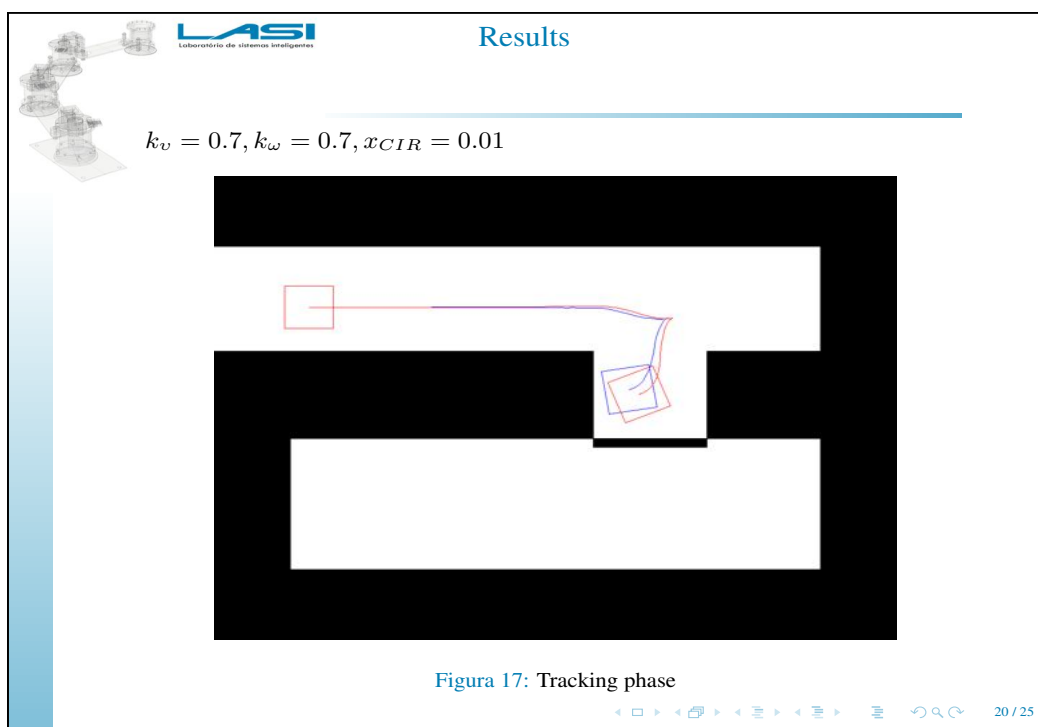
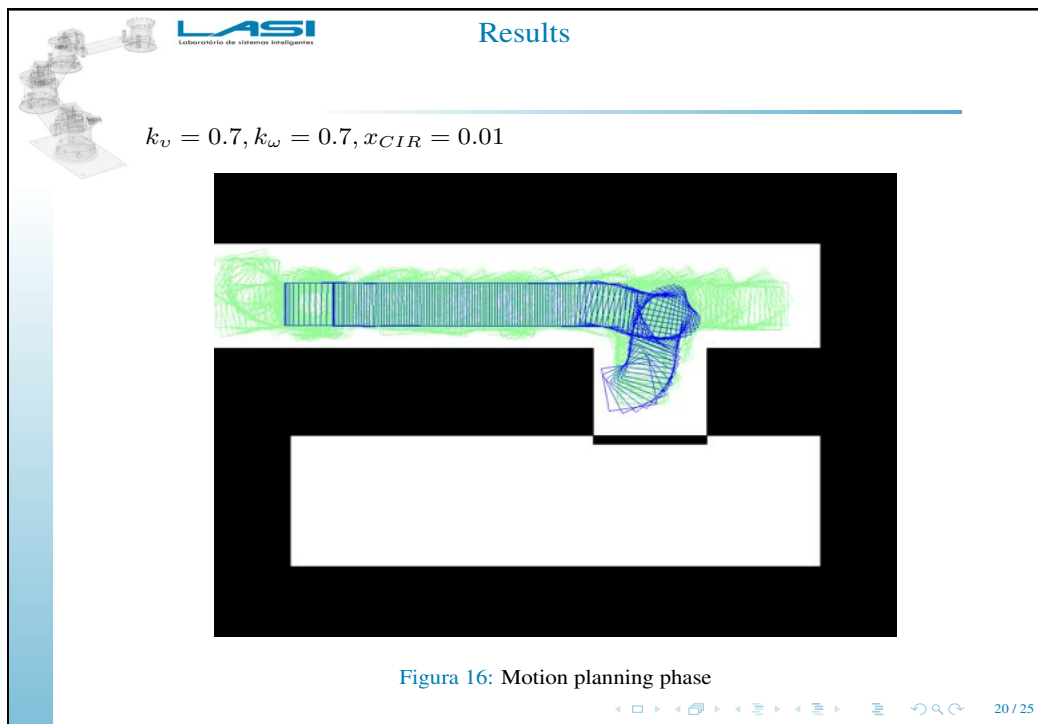
Robot Pioneer 3-AT - Specifications

Figura 11: Robot P3-AT

Navigation icons: back, forward, search, etc.

10 / 25





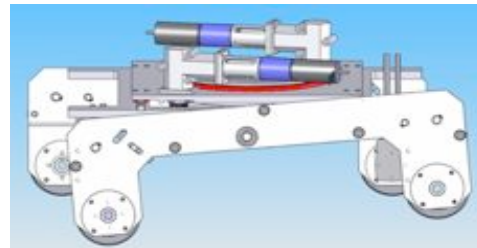
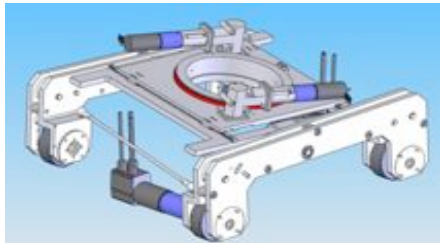
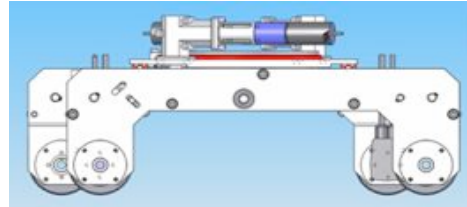
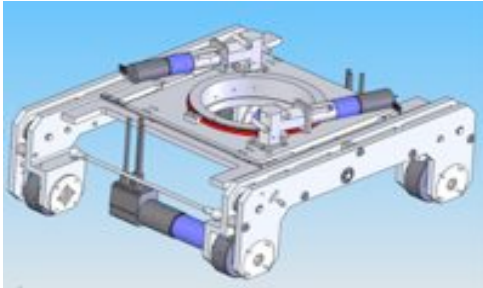
Robô Autônomo para Inspeção de Cordões de Solda

Okamoto, Jun ; Grassi, Valdir ; Amaral, Paulo Faria Santos ;
Pinto, Benedito Geraldo Miglio ; Pipa, Daniel ; Pires,
Gustavo Pinto ; Martins, Marcus Vinicius Maciel .
Development of an Autonomous Robot for Gas Storage
Spheres Inspection. Journal of Intelligent & Robotic
Systems, v. 1, p. 1-1-13, 2011.

Problema Proposto



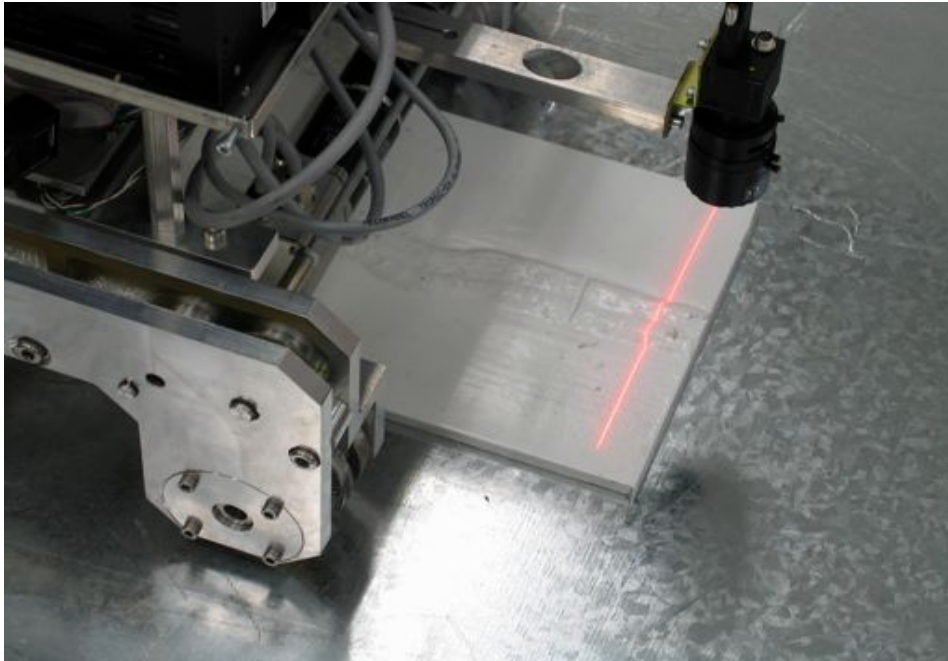
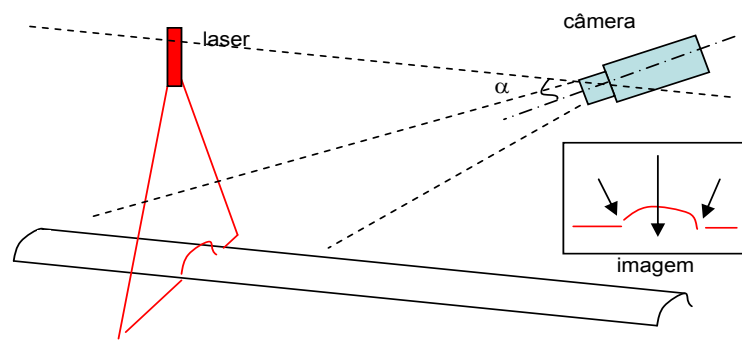
Projeto Mecânico



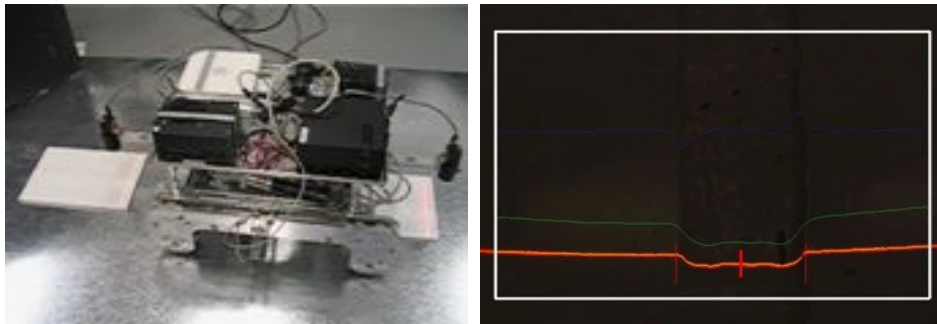
Protótipo do Robô



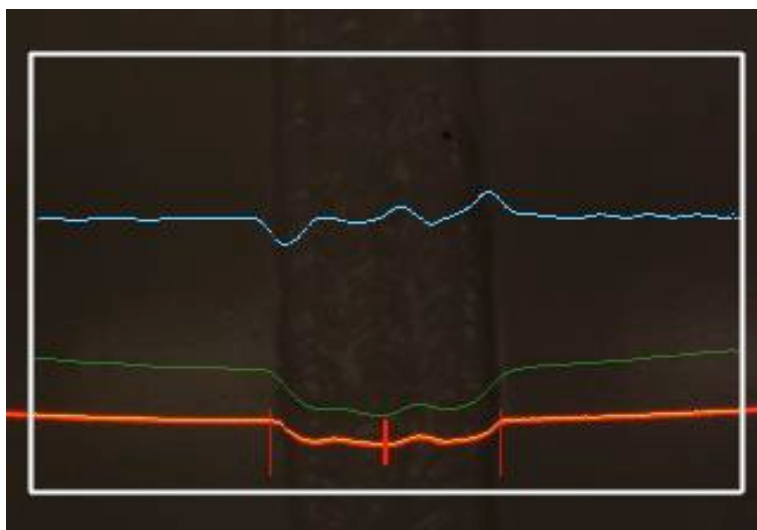
Detecção Visual do Cordão



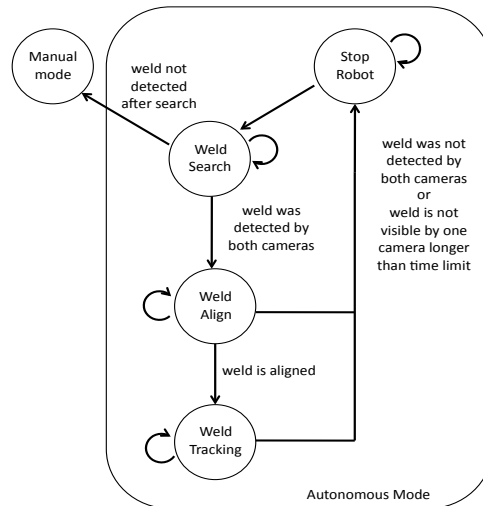
Detecção Visual do Cordão



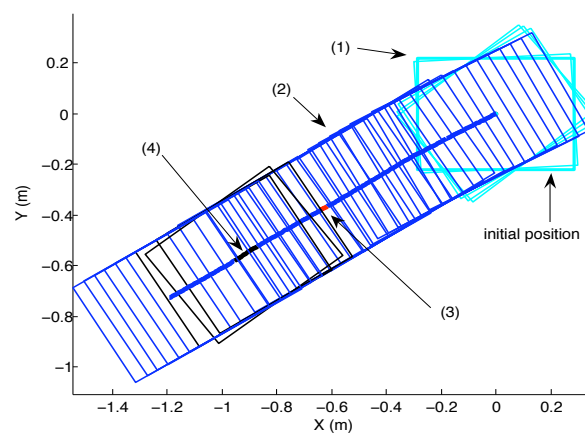
Detecção Visual do Cordão



Software de Controle



Exemplo de Trajetória



Erros em Relação ao Cordão de Solda

