

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Construção de um *framework* de planejamento e controle de trajetória em tempo real de múltiplos robôs terrestres

Johnathan Fercher da Rosa, Mestrando

Paulo Fernando Ferreira Rosa
(Orientador)

Instituto Militar de Engenharia - IME
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa
Mecatrônica e Sistemas de Armas

26/01/2017



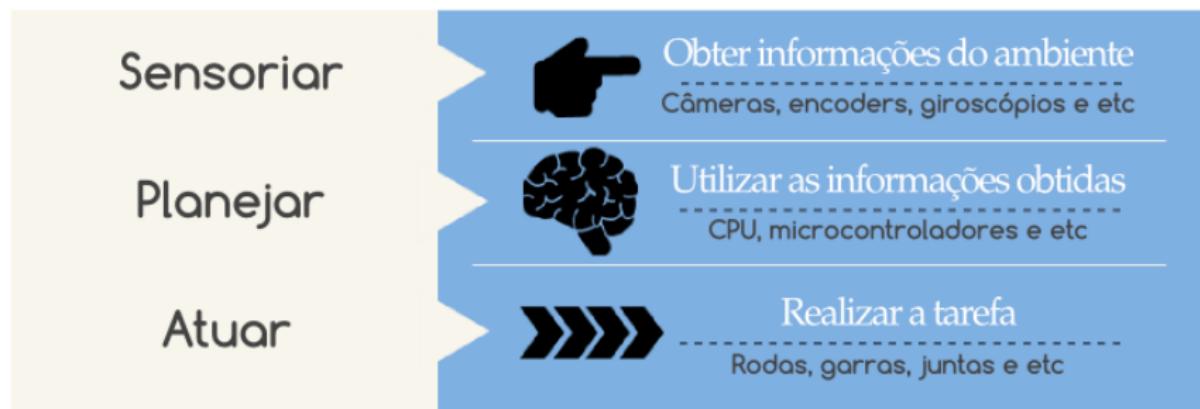
Sumário

- 1 Introdução
- 2 Tópicos Tutoriais
- 3 Trabalhos Correlatos
- 4 Formulação do Problema
- 5 Metodologia
- 6 Resultados
- 7 Conclusão
- 8 Referências



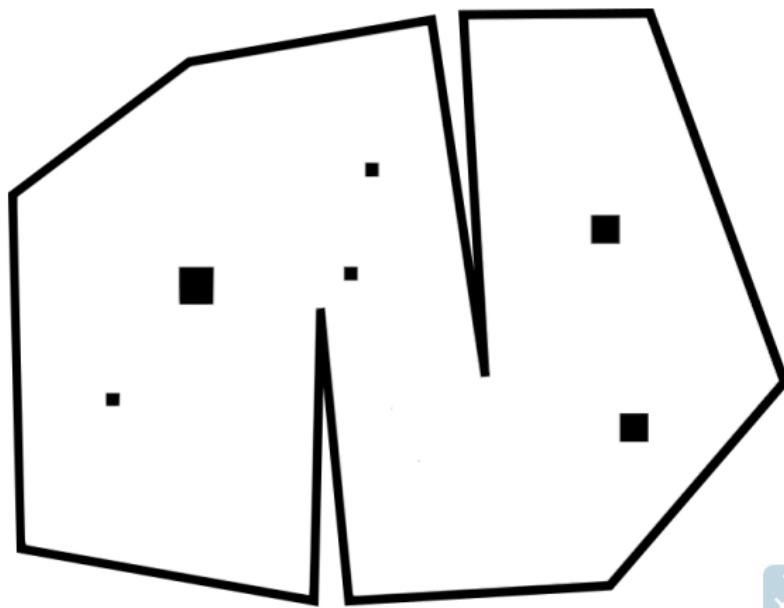
Introdução

- Como um robô pode ser capaz de executar uma tarefa autonomamente?

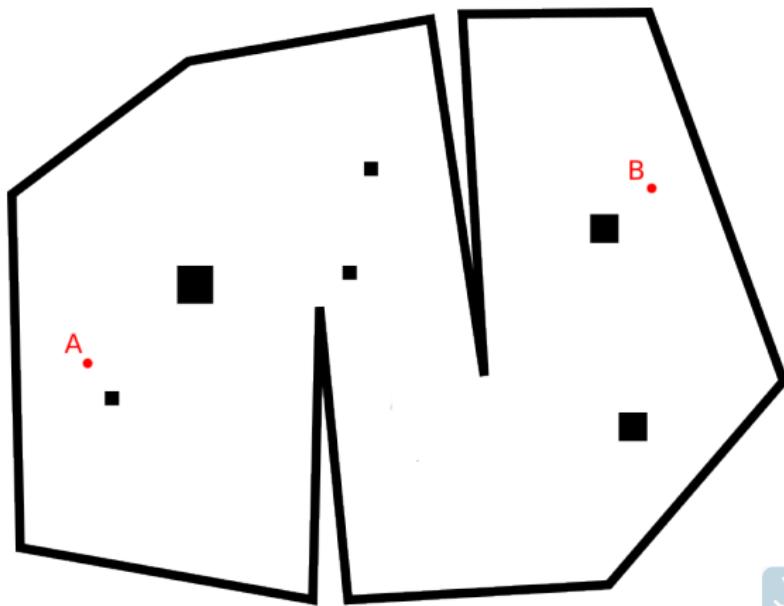


Introdução

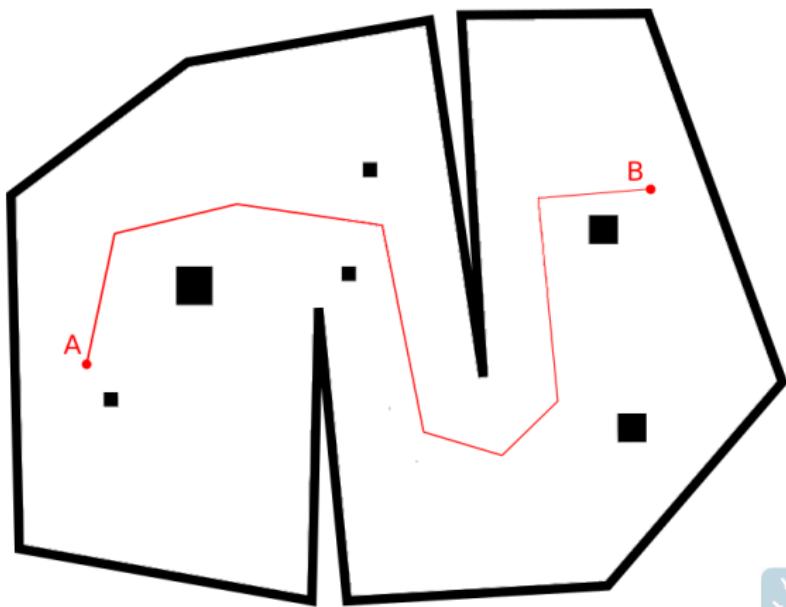
- Planejamento de trajetória é base para muitos problemas na robótica.



Introdução



Introdução

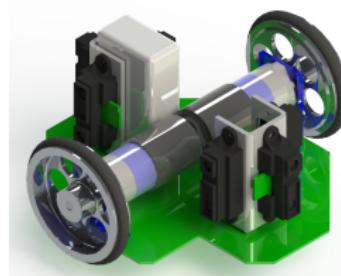


Introdução

- Existem diversos modelos de movimentação. Dois exemplos:



Plataforma omnidirecional



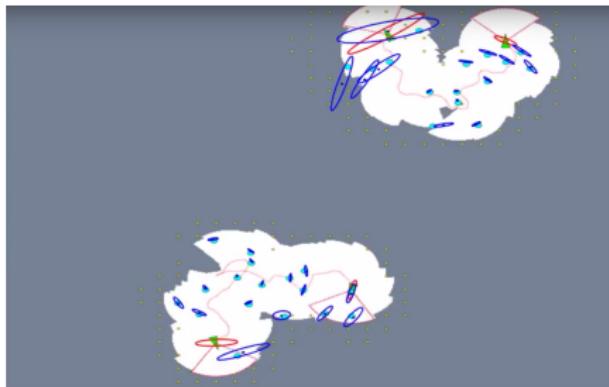
Plataforma diferencial



Motivação

Uso de múltiplos robôs

- Execução de tarefas que necessitam de vários robôs;
- Maior tolerância a erros;
- Divisão de trabalho;



SLAM



Futebol de Robôs



Motivação

Execução em tempo real

- Maior resiliência;
- Abertura para outras implementações;



Motivação

Robusto a ambientes dinâmicos

- Maior segurança;
- Ambientes *outdoor*;



Objetivo

- **Objetivo Principal:** Construir um *framework* de planejamento de trajetória em tempo real capaz de ser executado em ambientes dinâmicos. O *framework* é capaz de controlar um conjunto de robôs homogêneos, porém, também é capaz controlar diferentes tipos de robôs, encontrando e guiando cada robô do conjunto por uma trajetória.
- **Objetivo Secundário:** O *framework* é capaz reduzir o número de colisões entre os robôs, evitando-as sempre que possível.



Contribuições

Meio militar

- Patrulhamento;
- Distribuição de suprimentos;
- Extração em casualidades;
- Apagamento de incêndios;
- Suporte médico;
- Desativamento de explosivos;



Contribuições



R-Gator

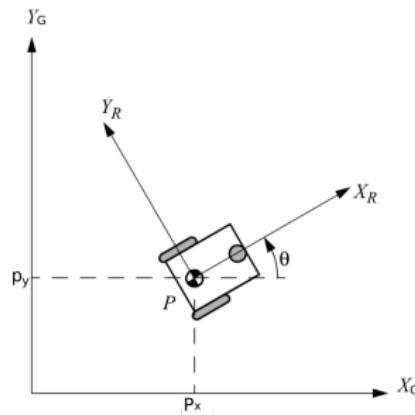


Warrior



Mecânica de um Corpo Rígido

- Pose de um corpo rígido no espaço.



$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ \theta \end{bmatrix}$$



Algoritmos *Online* x *Offline*

Como apresentado em (Karp, 1992)[2].

Offline

- Utilizado quando há conhecimento do futuro;
- Consegue encontrar uma solução ótima;
- Custoso em grandes instâncias;

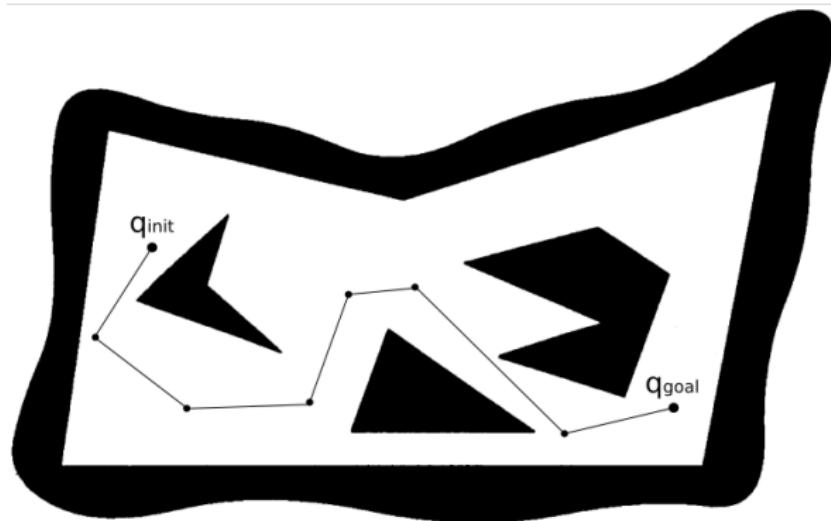
Online

- Utilizado quando não há conhecimento do futuro;
- Dificilmente encontra uma solução ótima;
- Responde imediatamente a uma requisição;



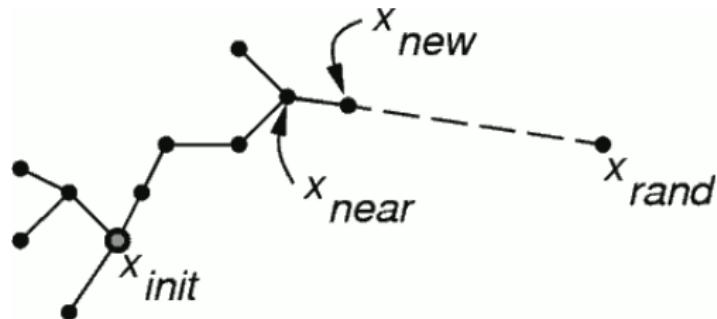
Planejamento de Trajetória (*Offline*)

Como apresentado em (Latombe, 2012)[3].



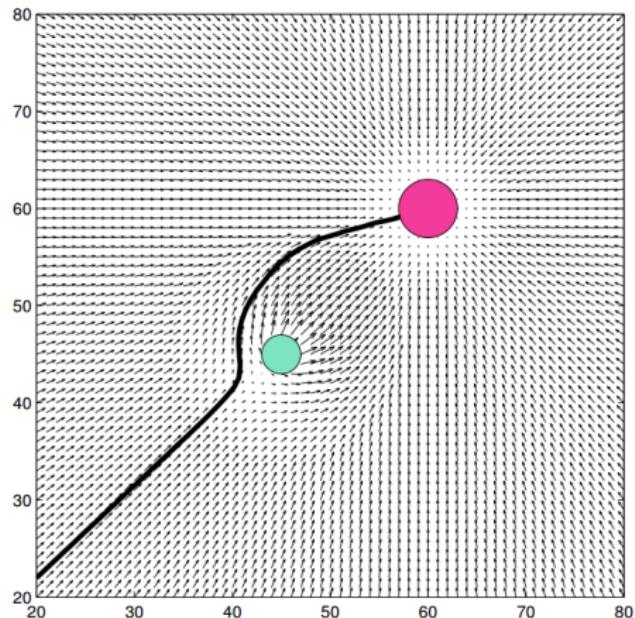
Rapidly-exploring Random Trees (RRT)

Como apresentado em (Kuffner e LaValle, 2000)[4].



Campos Potenciais Artificiais (Online)

Como proposto em (Goodrich, 2002)[5].



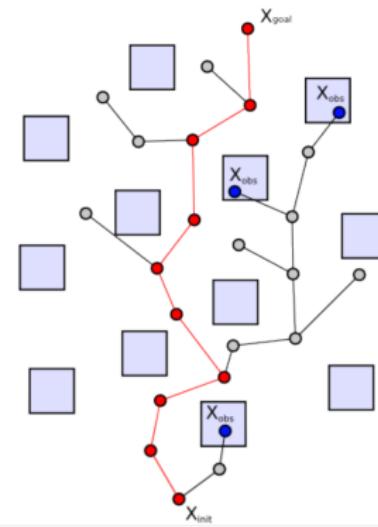
Trabalhos Correlatos

- Sistemas Autônomos e Inteligentes Para Robôs Cooperativos no Ambiente Small Size League (**Rodrigues, 2013**)[6]
- Path-Guided Artificial Potential Fields with Stochastic Reachable Sets for Motion Planning in Highly Dynamic Environments (**Chiang et al, 2015**)[7]
- Path Planning for Multiple Robots: An Alternative Duality Approach (**Mottee et al, 2010**)[8]
- Centralized Decoupled Path Planning Algorithm for Multiple Robots Using the Temporary Goal Configurations (**Oh et al, 2011**)[9]
- Dynamic Path Planning for Coordinated Motion of Multiple Mobile Robots (**Langerwisch et al, 2011**)[10]



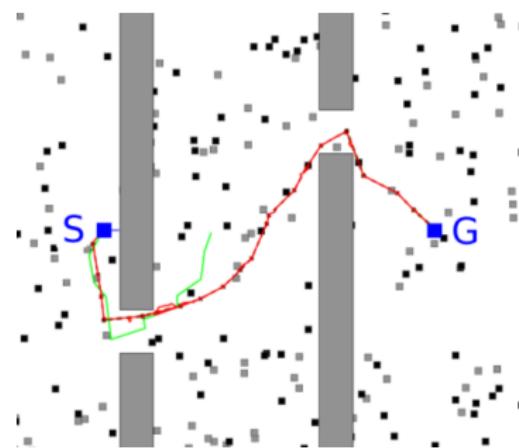
Sistemas Autônomos e Inteligentes Para Robôs Cooperativos no Ambiente Small Size League (Rodrigues, 2013)[6]

- Futebol de robôs;
- Múltiplos robôs;
- Obstáculos móveis;
- Ambiente real;
- $RRT \rightarrow BK-BGT$;



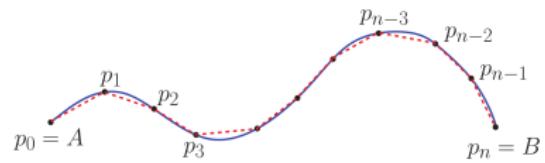
Path-Guided Artificial Potential Fields with Stochastic Reachable Sets for Motion Planning in Highly Dynamic Environments (Chiang et al, 2015)[7]

- Um único robô;
- Obstáculos móveis;
- Simulação;
- Etapa *Online* x *Offline*;
- PRM, RRT e EST;



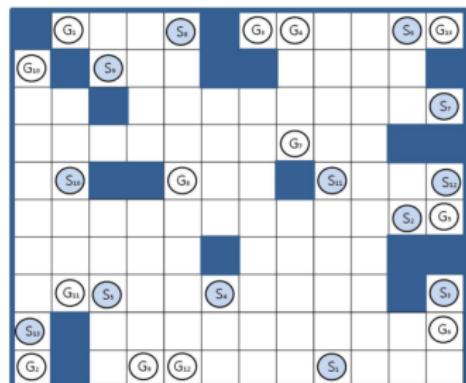
Path Planning for Multiple Robots: An Alternative Duality Approach (Motee et al, 2010)[8]

- Otimização;
- Múltiplos robôs;
- Obstáculos móveis;
- Suavização das trajetórias;
- Simulação;



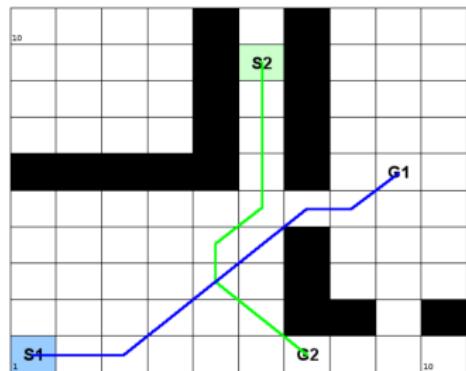
Centralized Decoupled Path Planning Algorithm for Multiple Robots Using the Temporary Goal Configurations (Oh et al, 2011)[9]

- Múltiplos robôs;
- Obstáculos estáticos;
- Simulação;
- Movimentação imediata;
- Replanejamento;

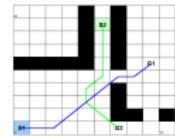
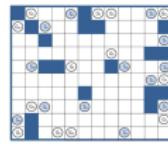
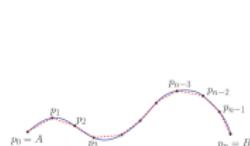
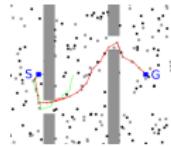
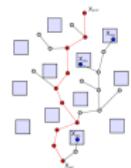


Dynamic Path Planning for Coordinated Motion of Multiple Mobile Robots (Langerwisch et al, 2011)[10]

- Múltiplos robôs;
- Obstáculos estáticos;
- Simulação;
- Replanejamento;
- LPA* e D*;



	Múltiplos Robôs	Obstáculos Móveis	Caminho Suavizado	Ambiente Real	Plataformas Genéricas
Rodrigues (2013)	✓	✓		✓	
Chiang et al. (2015)		✓			
Mottee et al. (2010)	✓	✓	✓		
Oh et al. (2011)	✓				
Langerwisch et al. (2011)	✓				
Proposta	✓	✓		✓	✓



Formulação do Problema

Problema

Dado um conjunto de robôs R , deve-se encontrar uma trajetória P para cada robô, que ligue sua pose inicial p_i a sua pose objetivo p_o , de maneira a evitar colisões com o conjunto obstáculos B e entre os demais robôs do conjunto R .



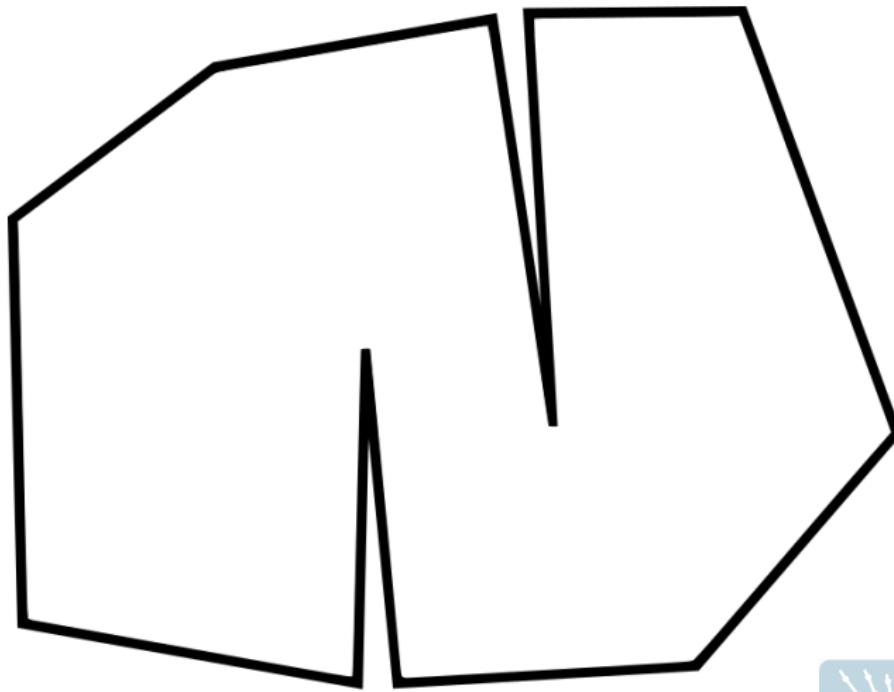
Formulação do Problema

Ambiente

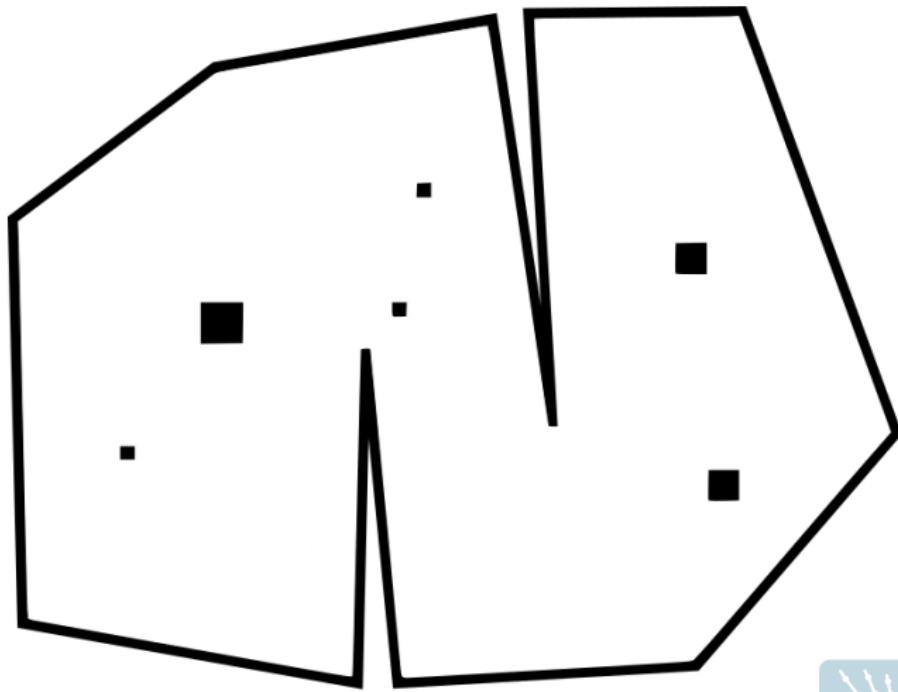
O espaço de trabalho W é limitado e se encontra em \mathbb{R}^2 , os robôs ocupam poses $p = [x \ y \ \theta]^T$ em W , existem obstáculos fixos e móveis em W representados por B e uma trajetória é tida como um conjunto de poses $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$.



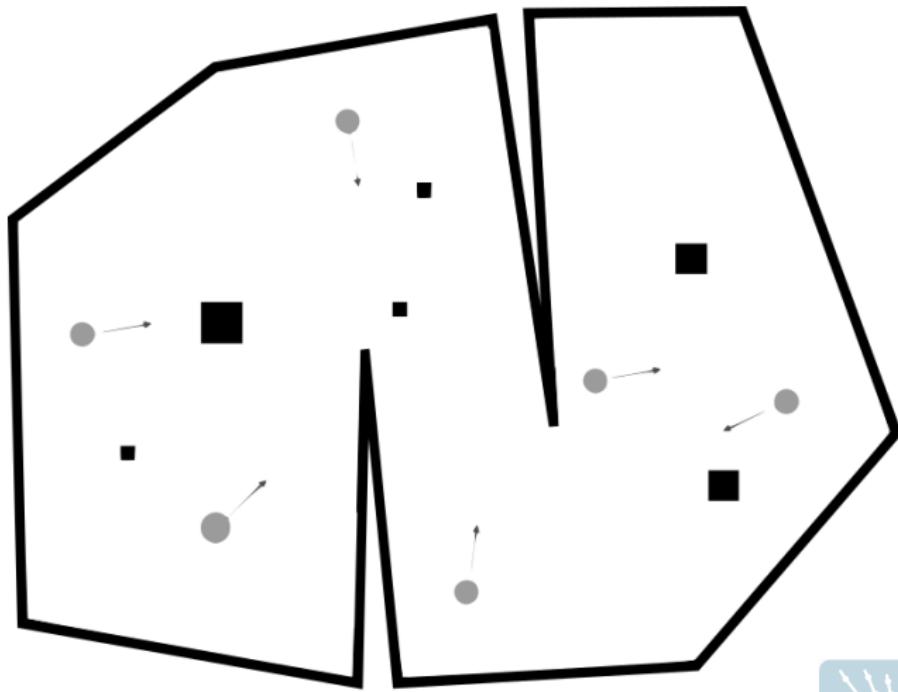
Formulação do Problema



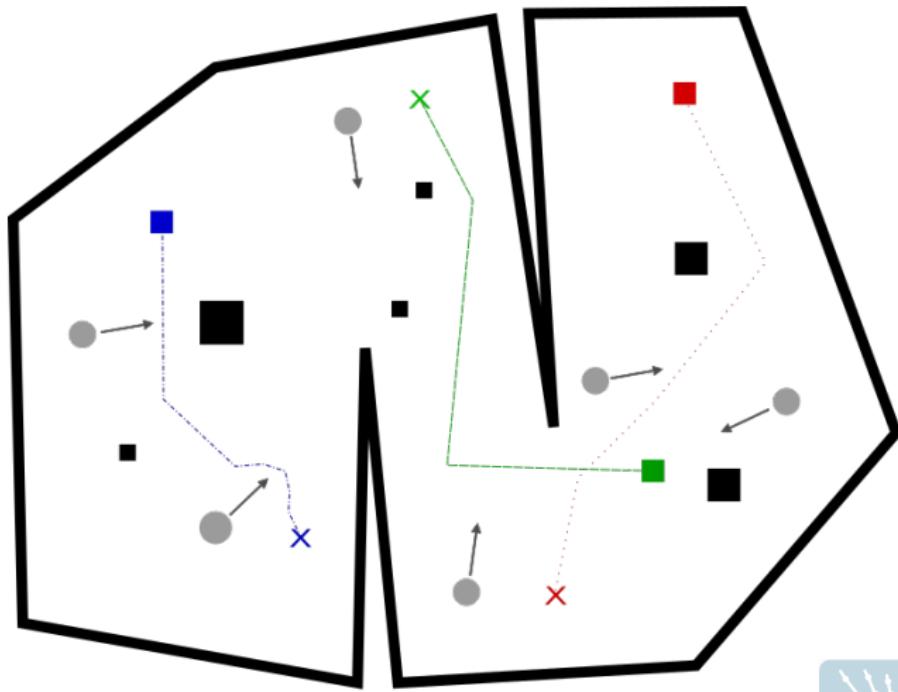
Formulação do Problema



Formulação do Problema



Formulação do Problema



Custo computacional

```

for  $r = 0$  to  $R$  do
|    $G[r].init(q_{init})$ 
end
for  $r = 0$  to  $R$  do
|   for  $k = 0$  to  $K$  do
|   |    $q_{rand} \leftarrow rand\_free\_conf()$ 
|   |    $q_{near} \leftarrow$ 
|   |    $nearest\_vertex(q_{rand}, G[r])$ 
|   |    $G[r].add\_vertex(q_{near})$ 
|   |    $G[r].add\_edge(q_{near}, q_{rand})$ 
|   end
end

```

- Considerando a complexidade de $rand_free_conf()$ como D ;
- $RRT \rightarrow O(R(K^2 + KD))$;
- D tem sua complexidade aumentada de acordo com a quantidade de obstáculos e robôs;



Ambiente Dinâmico

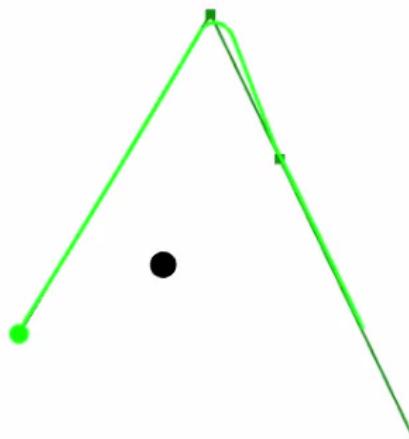
A existência de obstáculos com movimentação aleatória inviabiliza qualquer resolução completamente *offline*, pois é impossível ou muito custoso prever a localização de todos os objetos em qualquer período.

- Solução ótima é inviável nesse caso;
- Há a necessidade de um algoritmo retroativo (decisões online);



Ambiente Real

Diversas abordagens de execução *offline* buscam calcular caminhos considerando que todos os robôs do grupo se movimentam da mesma maneira, sem brechas para nenhum tipo de erro.



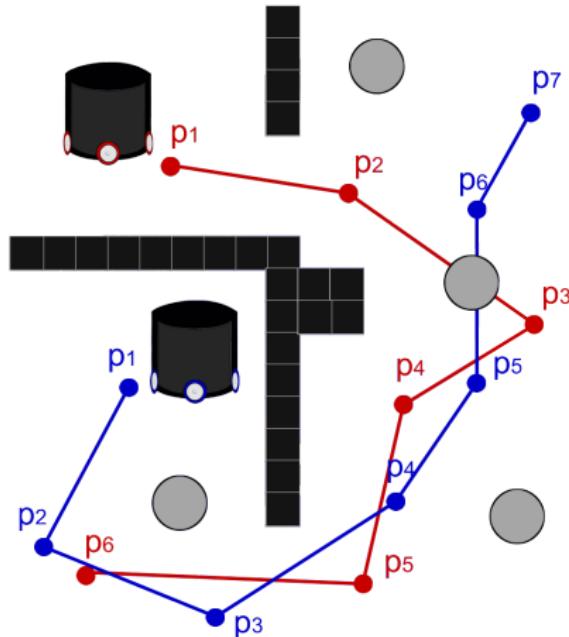
Abordagem

- Cálculo de trajetória executável em tempo real;
- Cálculo do campo potencial aplicado ao robô;
- Conversão da força resultante para velocidades das rodas;
- Controle das velocidades;



Cálculo de trajetória executável em tempo real (*Offline*)

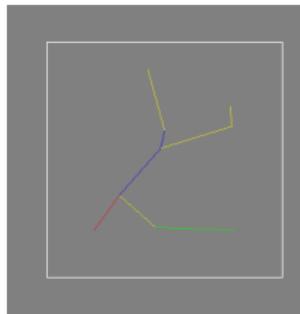
Tarefa: Para cada $r_n \in R$, encontrar uma trajetória P_n que ligue a pose atual p_n^a e a pose objetivo p_n^o , de maneira a evitar contato com os obstáculos fixos de B .



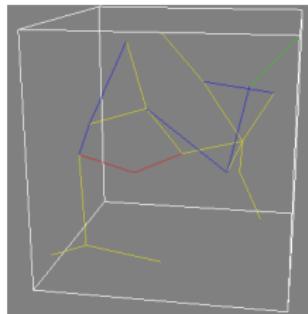
Cálculo de trajetória executável em tempo real (*Offline*)

OMPL: Open Motion Planning Library (Ioan et al, 2012)[11]

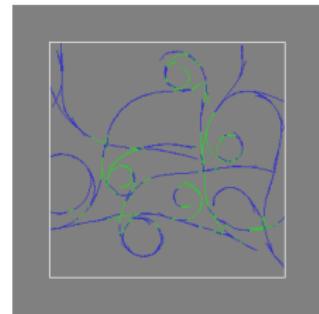
- Padrão do ROS (*Robot Operating System*);
- Contém diversos algoritmos de planejamento de trajetória;



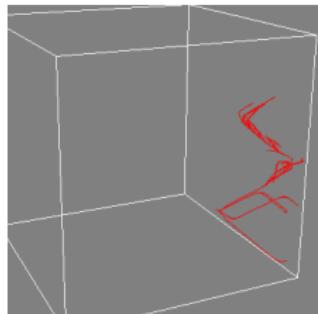
2D Holonômico



3D Holonômico



2D Não-holonômico
(Carro)



3D (Quadricoptero)



Extração do vetor de movimento guia de trajetória (*Online*)

Tarefa: Utilizando a técnica campos potenciais apresentada em (Goodrich, 2002)[5], fazer com que o robô siga a trajetória calculada, gerando um vetor de movimento;

X

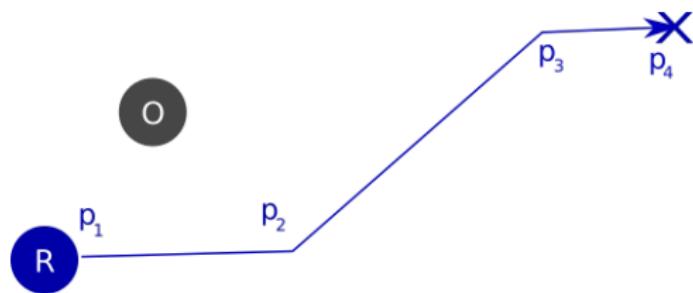
O

R



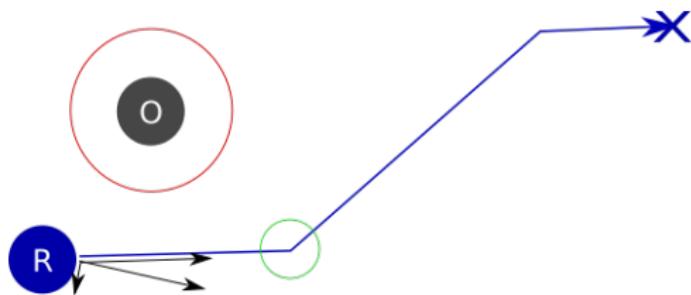
Extração do vetor de movimento guia de trajetória (*Online*)

Tarefa: Utilizando a técnica campos potenciais apresentada em (Goodrich, 2002)[5], fazer com que o robô siga a trajetória calculada, gerando um vetor de movimento;



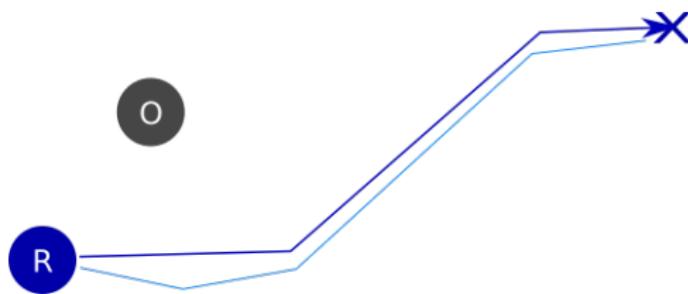
Extração do vetor de movimento guia de trajetória (*Online*)

Tarefa: Utilizando a técnica campos potenciais apresentada em (Goodrich, 2002)[5], fazer com que o robô siga a trajetória calculada, gerando um vetor de movimento;

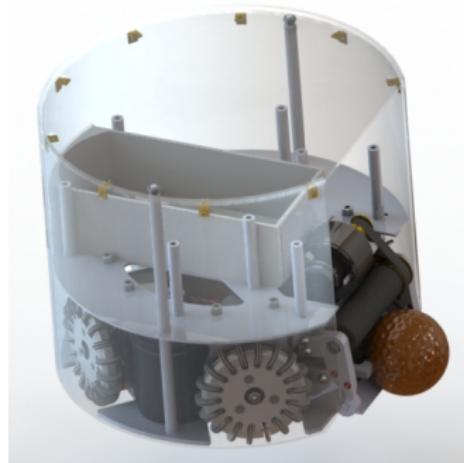


Extração do vetor de movimento guia de trajetória (*Online*)

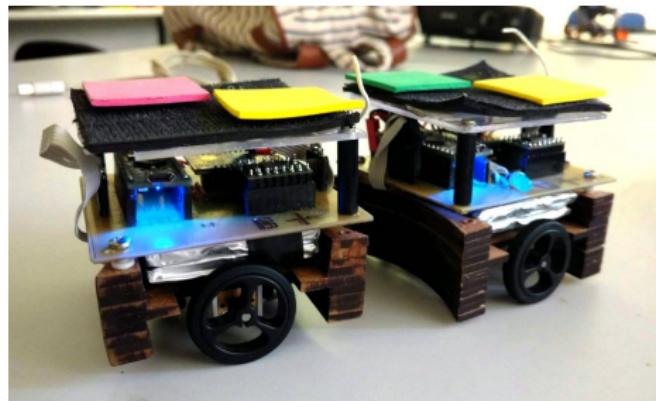
Tarefa: Utilizando a técnica campos potenciais apresentada em (Goodrich, 2002)[5], fazer com que o robô siga a trajetória calculada, gerando um vetor de movimento;



Conversão do vetor de movimento para comandos dos atuadores (*Online*)



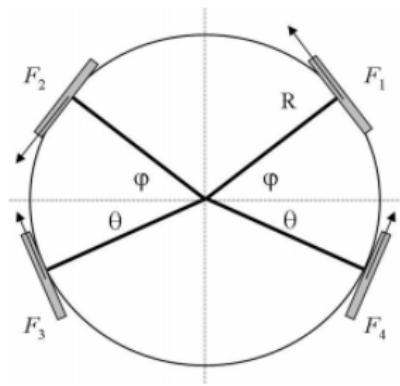
Plataforma da equipe RoboIME.



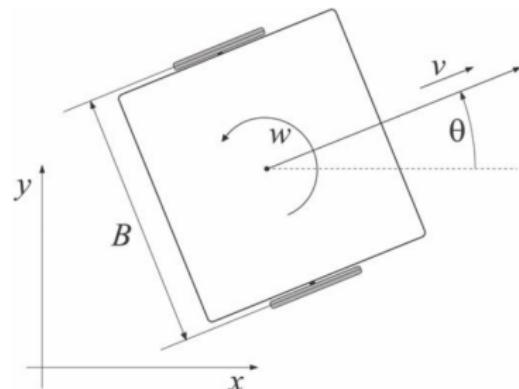
Plataforma da equipe SirSoccer.



Conversão da força resultante para velocidades das rodas (*Online*)



Omnidirecional, Holonômico

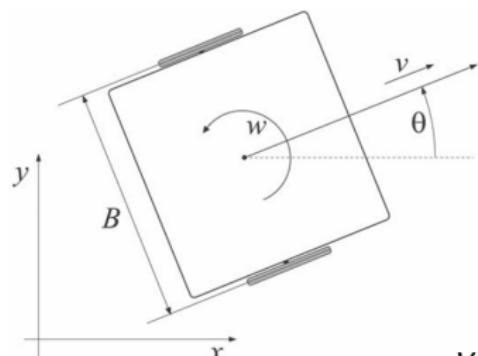


Diferencial, Não-holonômico



Conversão do vetor de movimento para comandos dos atuadores (*Online*)

Modelo cinemático de um robô diferencial. Como apresentado em (Blažič, 2014)[12].



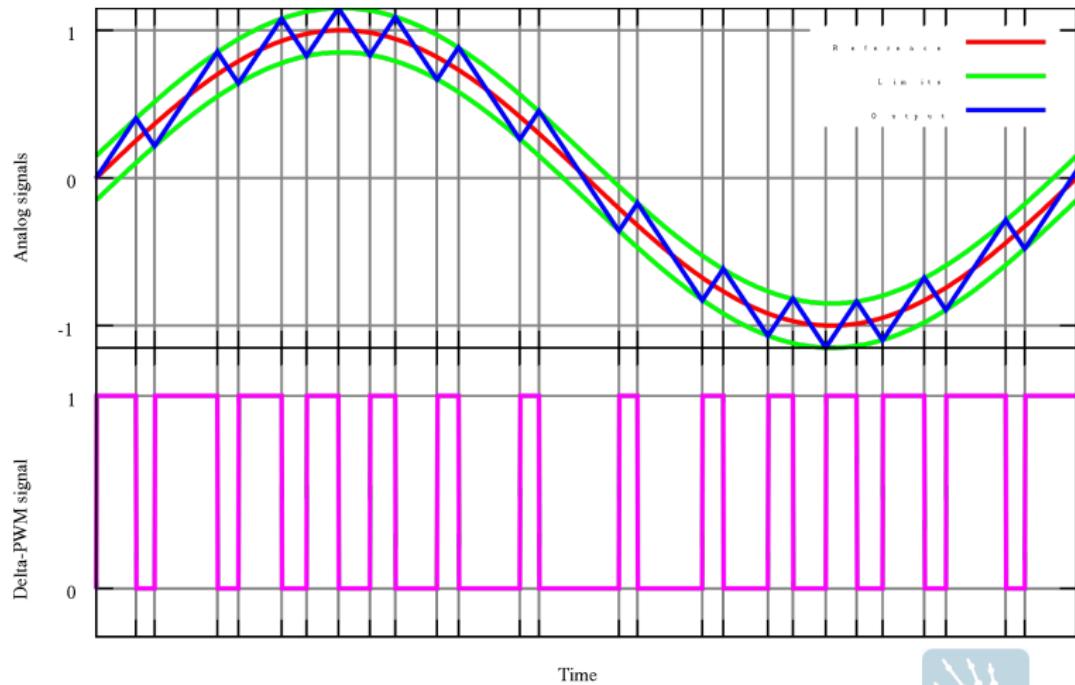
$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}$$

$$v_R = v + \frac{wB}{2}$$

$$v_L = v - \frac{wB}{2}$$



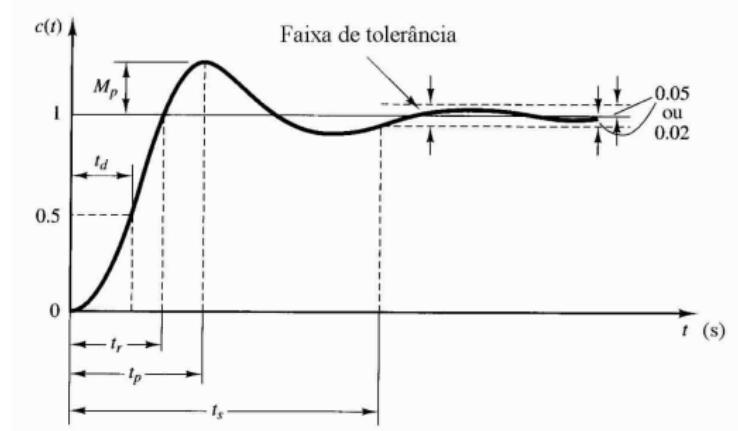
Modulação por Largura de Pulso (PWM)



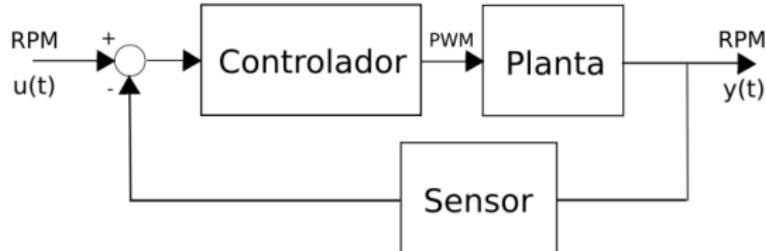
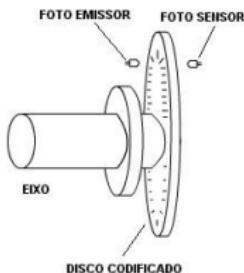
Controlador PID

Como apresentado em (Ogata, 2003)[13].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(T) dT + k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

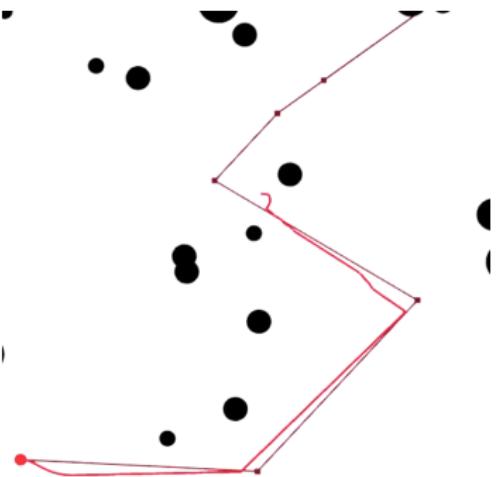


Encoder e Sistema



Validação em ambiente simulado simples

- Objetos sem restrições na movimentação;
- Quantidade de robôs entre 5 e 10;
- Quantidade de obstáculos entre 9 e 99;



Validação em ambiente simulado (grSim)

- Futebol de robôs (*SSL - Small Size League/F180*);
- Robôs modelados (Omnidirecionais);
- 6 robôs e 6 obstáculos;
- Baseado no funcionamento do *SSL-Vision*:
 - Câmera no topo do campo localiza os robôs pelos padrões de cores;



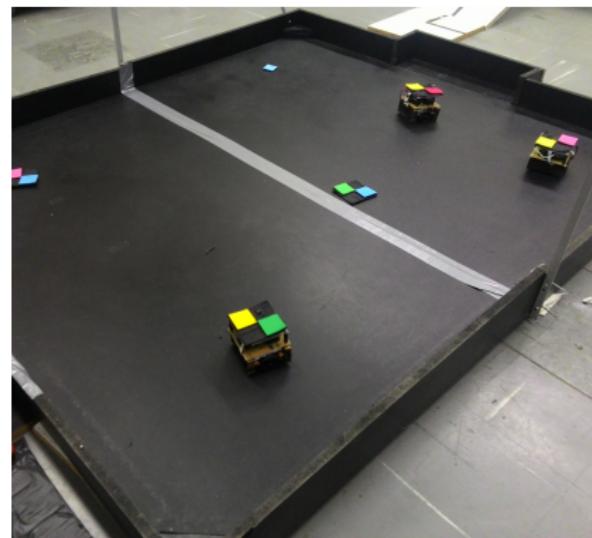
Validação em ambiente simulado (VSS-Simulator)

- Futebol de robôs (*VSS - IEEE Very Small Size*);
- Robôs modelados (Diferenciais);
- 3 robôs e 3 obstáculos;
- Debug no *VSS-Viewer* de poses finais, trajetórias e vetores de movimento;



Validação em ambiente real

- *VSS-Vision* com uma câmera no topo do campo;
- Robôs da equipe SirSoccer;
- 3 robôs e 3 obstáculos;



Vídeo



Primeiros Experimentos

	Tempo	Sucesso	Colisões
5 robôs	0.096s	96.4%	0.30
6 robôs	0.121s	97.6%	0.46
7 robôs	0.165s	97.6%	0.62
8 robôs	0.188s	95.6%	0.76
9 robôs	0.221s	97.2%	0.87
10 robôs	0.265s	94.1%	1.00

Tabela: Resultados no ambiente de simulação simples.

	Sucesso	Colisões
6 robôs	98.0%	0.52

Tabela: Resultados no ambiente de simulação grSim.



Últimos Experimentos

- 3 robôs;

	Resoluções	Colisões-Robôs	Colisões-Obstáculos
Framework Simplificada	56.2	1.7	0.6
	50.2	27.7	23.8

Tabela: Resultados no VSS-Simulator. Ambientes estáticos.

	Resoluções	Colisões-Robôs	Colisões-Obstáculos
Framework Simplificada	57.3	2.8	4.9
	30	39.6	44.6

Tabela: Resultados no VSS-Simulator. Ambientes dinâmicos.



Últimos Experimentos

- 3 robôs;

	Resoluções	Colisões-Robôs	Colisões-Obstáculos
Framework	55.5	3.5	2.7

Tabela: Resultados em ambiente real estático.



Últimos Experimentos

- 3 robôs;

	Resoluções	Colisões-Robôs	Colisões-Obstáculos
Real	55.5	3.5	2.7
Simulado	56.2	1.7	0.6

Tabela: Comparativo entre os resultados em ambiente real e simulado.



Conclusão

Conclusão

- A abordagem proposta para a construção do *framework* atende aos requisitos em ambientes simulados e reais, possibilitando o controle de múltiplos robôs em tempo real em um ambiente dinâmico.
- O algoritmo criado possibilita o controle de diferentes tipos de robôs, assim facilitando a utilização do *framework* em diversas aplicações.



Conclusão

Futuros trabalhos

- Refinamento das trajetórias;
- Conjunto de robôs heterogêneos;
- Modelo dinâmico;
- Adicionar mais plataformas;



Agradecimentos

- Agradecimentos as equipes RoboIME e SirSoccer;
- Agradecimentos a Demanda Social/CAPES;



Referências I



Lorenzo Sciavicco and Bruno Siciliano.

Modelling and control of robot manipulators.

Springer Science & Business Media, 2012.



Richard M Karp.

On-line algorithms versus off-line algorithms: How much is it worth to know the future?

In *IFIP Congress (1)*, volume 12, pages 416–429, 1992.



Jean-Claude Latombe.

Robot motion planning, volume 124.

Springer Science & Business Media, 2012.



James J Kuffner and Steven M LaValle.

Rrt-connect: An efficient approach to single-query path planning.

In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, volume 2, pages 995–1001. IEEE, 2000.



Referências II



Michael A Goodrich.

Potential fields tutorial.

Citeseer, 2002.

http://phoenix.goucher.edu/~jillz/cs325_robotics/goodrich_potential_fields.pdf.



Stefano H Rodrigues.

Sistemas autônomos e inteligentes para robôs cooperativos no ambiente small size league.

Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, 2013.



Hao-Tien Chiang, Nick Malone, Kendra Lesser, Meeko Oishi, and Lydia Tapia.

Path-guided artificial potential fields with stochastic reachable sets for motion planning in highly dynamic environments.

In *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, pages 2347–2354. IEEE, 2015.



Referências III

 Nader Motee, Ali Jadbabaie, and George Pappas.

Path planning for multiple robots: An alternative duality approach.

In *American Control Conference (ACC), 2010*, pages 1611–1616. IEEE, 2010.

 Jun-Han Oh, Joo-Ho Park, and Jong-Tae Lim.

Centralized decoupled path planning algorithm for multiple robots using the temporary goal configurations.

In *Computational Intelligence, Modelling and Simulation (CIMSiM), 2011 Third International Conference on*, pages 206–209. IEEE, 2011.

 Marco Langerwisch and Bernardo Wagner.

Dynamic path planning for coordinated motion of multiple mobile robots.

In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on*, pages 1989–1994. IEEE, 2011.



Referências IV



Ioan A. Sucan, Mark Moll, and Lydia E. Kavraki.
The Open Motion Planning Library.
IEEE Robotics & Automation Magazine, 19(4):72–82, December 2012.
<http://ompl.kavrakilab.org>.



Sašo Blažič.
On periodic control laws for mobile robots.
IEEE transactions on industrial electronics, 61(7):3660–3670, 2014.



Katsuhiko Ogata.
Modern control engineering.
Prentice Hall PTR, 2003.



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Construção de um *framework* de planejamento e controle de trajetória em tempo real de múltiplos robôs terrestres

Johnathan Fercher da Rosa, Mestrando
johnathanfercher22@gmail.com

Paulo Fernando Ferreira Rosa
rpaolo@ime.eb.br

