

Planejamento de Trajetórias com Campos Potenciais

Fabricio Ferrari

Universidade Federal do Pampa
Campus Bagé

Maio 2007

Pesquisadores

Edson Kakuno

Guilherme Marranghello

Christian Cechinel

André Gündel

Fabricio Ferrari.

Pesquisadores

Edson Kakuno

Guilherme Marranghello

Christian Cechinel

André Gündel

Fabrizio Ferrari.

Estudantes

Breno Dröse Neto (lic.fís)

Reinhardt Keustner (eng.quím.)

Juliano Juliane Riela (eng.quím)

Eduardo Daneres Lemos (lic. fís)

Sandra Grizza Lemos (lic. fís)

Janice Botelho Souza (eng. energ.)

Mirtô Fernandes Morrudo (eng. energ.)

Inteligência Artificial

Robótica Teórica

Sensores Inteligentes

Interface Homem-Máquina

Instrumentação Básica e de Raios-X

Sensores de Campo Magnético

Estação de Sensoriamento Digital

Estação de Sensoriamento Digital

Automação Instrumental para Laboratórios de Física

Estação de Sensoriamento Digital

Automação Instrumental para Laboratórios de Física

Aquecedor Solar Reciclado (IC)

Estação de Sensoriamento Digital

Automação Instrumental para Laboratórios de Física

Aquecedor Solar Reciclado (IC)

Nível de Reservatório de Água (IC)

Estação de Sensoriamento Digital

Automação Instrumental para Laboratórios de Física

Aquecedor Solar Reciclado (IC)

Nível de Reservatório de Água (IC)

Planejamento de Trajetórias

Planejamento de Trajetórias

Caminho contínuo de um objeto móvel (**OM**)
até um objetivo sem colisões

caminho: evolução das coordenadas

objetivo: posição final

colisões: obstáculos

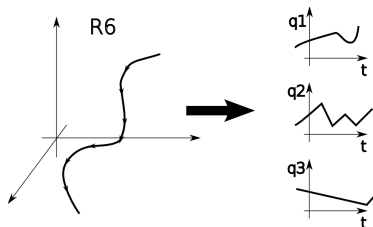
Planejamento de Trajetórias

Caminho contínuo de um objeto móvel (**OM**)
até um objetivo sem colisões

caminho: evolução das coordenadas

objetivo: posição final

colisões: obstáculos



Planejamento de Trajetórias

Caminho contínuo de um objeto móvel (**OM**)
até um objetivo sem colisões

caminho: evolução das coordenadas

objetivo: posição final

colisões: obstáculos

veículo numa via

Planejamento de Trajetórias

Caminho contínuo de um objeto móvel (**OM**)
até um objetivo sem colisões

caminho: evolução das coordenadas

objetivo: posição final

colisões: obstáculos

veículo numa via

braço mecânico

Planejamento de Trajetórias

Caminho contínuo de um objeto móvel (**OM**)
até um objetivo sem colisões

caminho: evolução das coordenadas

objetivo: posição final

colisões: obstáculos

veículo numa via

braço mecânico

projeto de construção e manutenção; linha de produção

Planejamento de Trajetórias

Caminho contínuo de um objeto móvel (**OM**)
até um objetivo sem colisões

caminho: evolução das coordenadas

objetivo: posição final

colisões: obstáculos

veículo numa via

braço mecânico

projeto de construção e manutenção; linha de produção

projeto de tubulação, cabeamento

Planejamento de Trajetórias

Caminho contínuo de um objeto móvel (**OM**)
até um objetivo sem colisões

caminho: evolução das coordenadas

objetivo: posição final

colisões: obstáculos

veículo numa via

braço mecânico

projeto de construção e manutenção; linha de produção

projeto de tubulação, cabeamento

exploração planetária

Planejamento de Trajetórias

Caminho contínuo de um objeto móvel (**OM**)
até um objetivo sem colisões

caminho: evolução das coordenadas

objetivo: posição final

colisões: obstáculos

veículo numa via

braço mecânico

projeto de construção e manutenção; linha de produção

projeto de tubulação, cabeamento

exploração planetária

planejamento de cirurgias

Planejamento de Trajetórias

Caminho contínuo de um objeto móvel (**OM**)
até um objetivo sem colisões

caminho: evolução das coordenadas

objetivo: posição final

colisões: obstáculos

veículo numa via

braço mecânico

projeto de construção e manutenção; linha de produção

projeto de tubulação, cabeamento

exploração planetária

planejamento de cirurgias

verificação de acessibilidade universal

Planejamento de Trajetórias

Caminho contínuo de um objeto móvel (**OM**)
até um objetivo sem colisões

caminho: evolução das coordenadas

objetivo: posição final

colisões: obstáculos

veículo numa via

braço mecânico

projeto de construção e manutenção; linha de produção

projeto de tubulação, cabeamento

exploração planetária

planejamento de cirurgias

verificação de acessibilidade universal

transporte de um piano.

Graus de Liberdade

- translação de robô no plano $\longrightarrow (x, y)$
- translação e rotação de robô no plano $\longrightarrow (x, y, \phi)$
- translação e rotação de robô no \mathbb{R}^3 $\longrightarrow (x, y, z, \phi, \theta, \psi)$
- robô articulado $\longrightarrow (\alpha, \beta, \dots)$

Graus de Liberdade

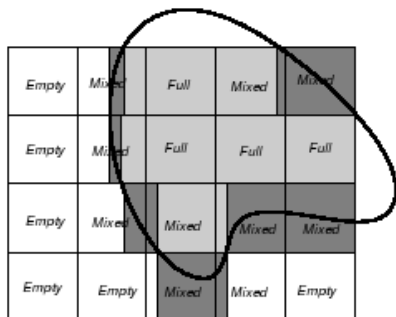
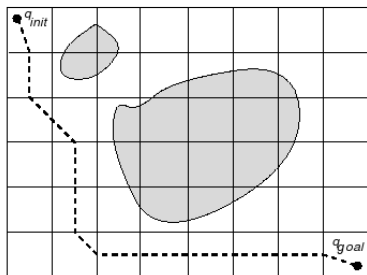
- translação de robô no plano $\longrightarrow (x, y)$
- translação e rotação de robô no plano $\longrightarrow (x, y, \phi)$
- translação e rotação de robô no \mathbb{R}^3 $\longrightarrow (x, y, z, \phi, \theta, \psi)$
- robô articulado $\longrightarrow (\alpha, \beta, \dots)$

Métodos

- Decomposição Celular;
- Mapas de Caminhos
- **Campos Potenciais**

Decomposição Celular

Decompõe o espaço livre em células
Conecta-as para representar vários caminhos.
Busca em árvore pela solução.



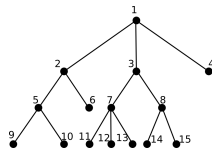
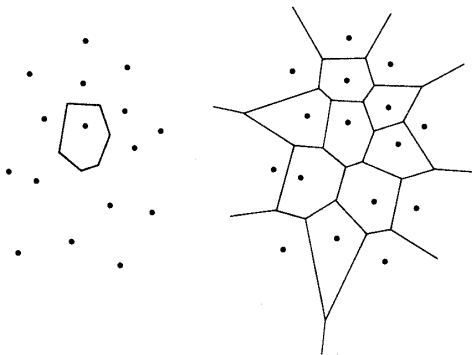
Mapas de Caminhos

Diagrama de Voronoi

Poligonos equidistantes entre os pontos

Caminho mais seguro

Busca em árvore pela solução



Potenciais Virtuais

O. Khatib 1985, Rimon & Koditschek 1992.

Associa função ao espaço de configuração

Mínimo global no alvo

Máximos nos obstáculos

Potenciais Virtuais

O. Khatib 1985, Rimon & Koditschek 1992.

Associa função ao espaço de configuração

Mínimo global no alvo

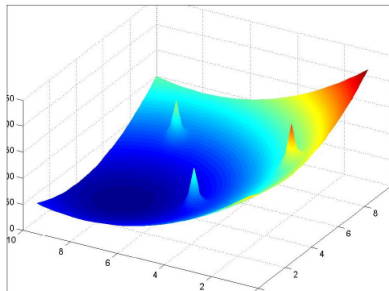
Máximos nos obstáculos

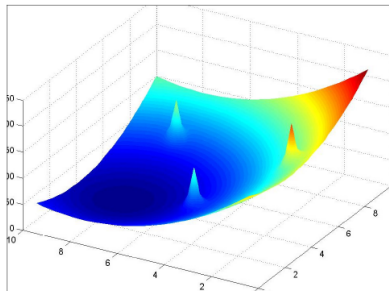
$\psi(\mathbf{r}_a)$ negativo/atrativo – alvo
 $\varphi(\mathbf{r}_o)$ positivo/repulsivo – obstáculos

$$\Phi(\mathbf{r}) = \psi(\mathbf{r}_a) + \sum_{i=1}^{N_o} \varphi_i(\mathbf{r}_o)$$

OM segue o decréscimo do gradiente da função $\mathbf{F} = -\nabla\Phi$

Potenciais Virtuais

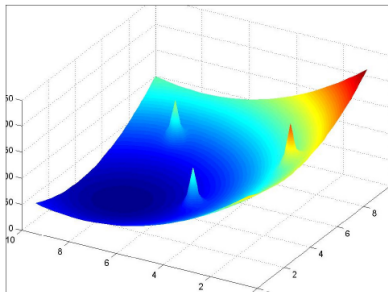




Virtudes

- Solução teórica, analítica, formal;
- Complexidade computacional pequena;
- Comportamento emergente;

Potenciais Virtuais



Virtudes

Solução teórica, analítica, formal;
Complexidade computacional
pequena;
Comportamento emergente;

Defeitos

Passagem estreitas;
Oscilação em corredores.
Armadilha em mínimos locais;
(*random walk*, funções harmônicas, obstáculos virtuais)

Potenciais Usuais

Alvo – atrativo:

atrativo a longas distâncias,
nulo próximo ao alvo.

Potenciais Usuais

Alvo – atrativo:

atrativo a longas distâncias,
nulo próximo ao alvo.

$$\psi(r) = A r$$

$$\psi(r) = A r^2$$

Alvo – atrativo:

atrativo a longas distâncias,
nulo próximo ao alvo.

$$\psi(r) = A r$$

$$\psi(r) = A r^2$$

Obstáculo – repulsivo:

repulsivo próximo ao obstáculo,
nulo longe do obstáculo.

Alvo – atrativo:

atrativo a longas distâncias,
nulo próximo ao alvo.

$$\psi(r) = A r$$

$$\psi(r) = A r^2$$

Obstáculo – repulsivo:

repulsivo próximo ao obstáculo,
nulo longe do obstáculo.

$$\varphi(r) = B \frac{1}{r^2}$$

$$\varphi(r) = \begin{cases} B \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) & \text{se } r \leq R \\ 0 & \text{se } r > R \end{cases}$$

R distância de influência.

Alvo:

$$\psi_{m,b}(r) = - \left(\frac{r}{b} \right)^m ,$$

Alvo:

$$\psi_{m,b}(r) = - \left(\frac{r}{b} \right)^m ,$$

Obstáculos:

$$\varphi_{n,a}(r) = \exp \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^n \right]$$

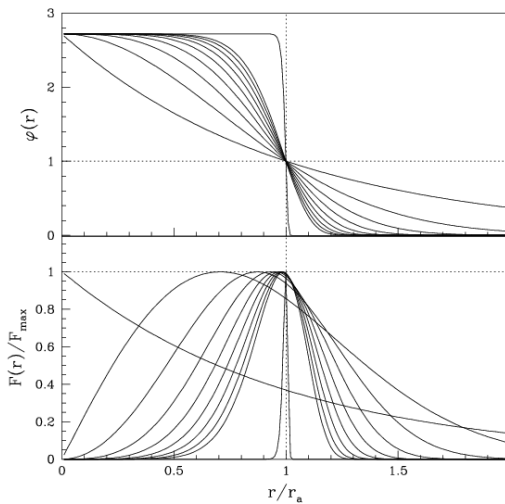
parâmetros:

graus m, n

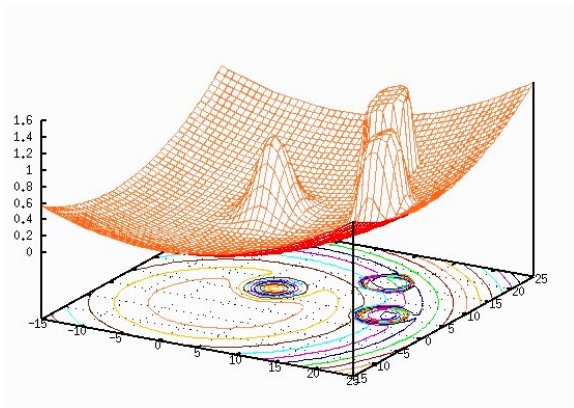
escala a, b

Novos Potenciais – perfis

$$n = 1 - 9, 100$$



Novos Potenciais – 3D



Potencial do Alvo

$$\psi(r) = -\left(\frac{r}{b}\right)^m$$

Potencial do Alvo

$$\psi(r) = -\left(\frac{r}{b}\right)^m$$
$$\mathbf{F}(r) = \frac{m}{b} \left(\frac{r}{b}\right)^{m-1} \hat{e}_r$$

Potencial do Alvo

$$\psi(r) = -\left(\frac{r}{b}\right)^m$$

$$\mathbf{F}(r) = \frac{m}{b} \left(\frac{r}{b}\right)^{m-1} \hat{e}_r$$

$$\psi(b) = -1$$

$$\mathbf{F}(0) = 0$$

Potencial dos Obstáculos

$$\varphi(r) = \exp \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^n \right]$$

Potencial dos Obstáculos

$$\varphi(r) = \exp \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^n \right]$$

$$\mathbf{F}(r) = n \frac{1}{r} \left(\frac{r}{a} \right)^n \exp \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^n \right] \mathbf{e}_r$$

$$\mathbf{F}(r) = n \frac{1}{r} \left(\frac{r}{a} \right)^n \varphi(r) \mathbf{e}_r$$

Potencial dos Obstáculos

$$\varphi(r) = \exp \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^n \right]$$

$$\mathbf{F}(r) = n \frac{1}{r} \left(\frac{r}{a} \right)^n \exp \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^n \right] \mathbf{e}_r$$

$$\mathbf{F}(r) = n \frac{1}{r} \left(\frac{r}{a} \right)^n \varphi(r) \mathbf{e}_r$$

$$\varphi(a) = 1$$

$$\mathbf{F}(a) = \frac{n}{a} \mathbf{e}_r$$

Potencial dos Obstáculos

$$\varphi(r) = \exp \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^n \right]$$

$$\mathbf{F}(r) = n \frac{1}{r} \left(\frac{r}{a} \right)^n \exp \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^n \right] \mathbf{e}_r$$

$$\mathbf{F}(r) = n \frac{1}{r} \left(\frac{r}{a} \right)^n \varphi(r) \mathbf{e}_r$$

$$\varphi(a) = 1$$

$$\mathbf{F}(a) = \frac{n}{a} \mathbf{e}_r$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} r_{\max} = a$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{F}_{\max} = \infty$$

raio de máxima força

$$r_{\max} = a \left[1 - \frac{1}{n} \right]^{1/n}$$

Força máxima

$$F(r_{\max}) = e^{\frac{1}{n}} \frac{n}{a} \left[1 - \frac{1}{n} \right]^{1 - \frac{1}{n}} e_r$$

Máxima aproximação OM-obstáculo

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_a(r_a) &= \mathbf{F}_o(r_o) \\ y &= x e^x \iff x = W(y) \end{aligned}$$

Máxima aproximação OM-obstáculo

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_a(r_a) &= \mathbf{F}_o(r_o) \\ y &= x e^x \iff x = W(y) \end{aligned}$$

$$r_{\min} = a \xi^{\frac{1}{n-1}} \exp \left[-\frac{1}{n} W \left(\frac{n}{n-1} \xi^{\frac{n}{n-1}} \right) \right]$$

$$\xi \equiv \frac{1}{e} \frac{m}{n} \frac{a}{b} \left(\frac{r_a}{b} \right)^{m-1}$$

W Função de Lambert

Código Orientado Objeto em Python,
Plataforma Linux.

Código Orientado Objeto em Python,
Plataforma Linux.

Evolução do OM ao longo de um espaço retangular 2D
Velocidade constante \rightarrow \mathbf{F} determina direção

Código Orientado Objeto em Python,
Plataforma Linux.

Evolução do OM ao longo de um espaço retangular 2D
Velocidade constante \rightarrow \mathbf{F} determina direção

Posição inicial do OM fixa;
Posição do Alvo fixa;

Sem fuga de mínimos locais.

Parâmetros de Entrada

- Dimensão do espaço DIMx, DIMy
- Número de Obstáculos No
- Densidade de obstáculos UNIFORME ou GAUSSIANA
- Propriedades do Alvo *m, b*
- Propriedades dos Obstáculos $(n, a)_1, (n, a)_2, \dots$

- Diagrama da Trajetória
- Sucesso ou Fracasso
- Espaçamento
- Preenchimento
- Comprimento da Trajetória

Simulação

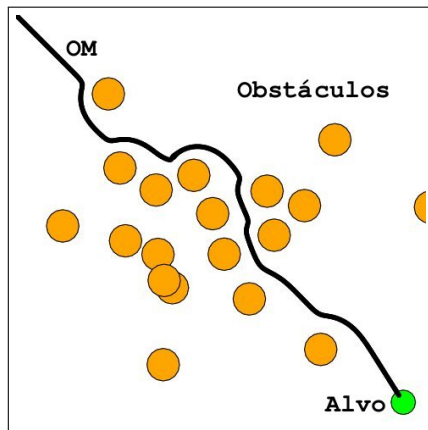
$DIM_x = DIM_y = 500$

$N_o = 20$, GAUSSIANA, $SIGMA = DIM_x / 8$,

$a = 20$, $n = 2$,

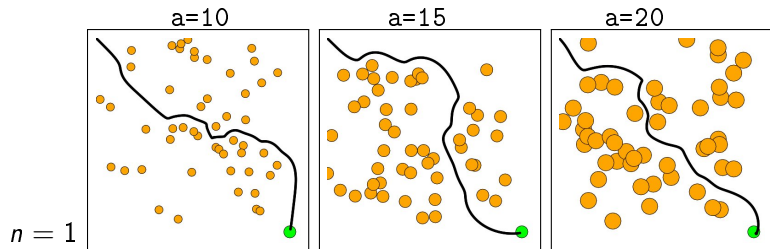
$b = 120$, $m = 1.8$

$100 * 3 * 3 * 9 * 2 = 16.200$ simulações



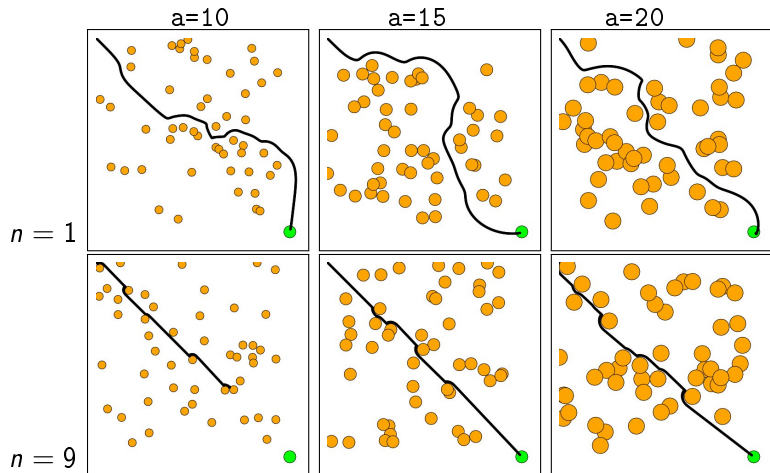
Simulações

UNIFORME $N_0=50$

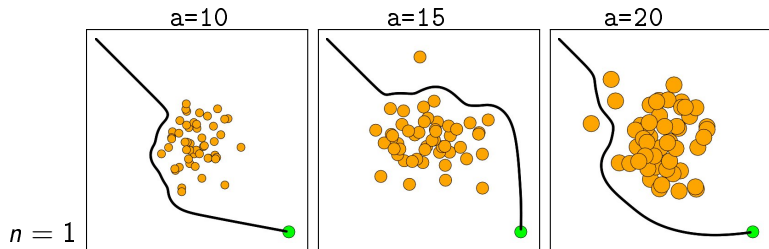


Simulações

UNIFORME $N_0=50$

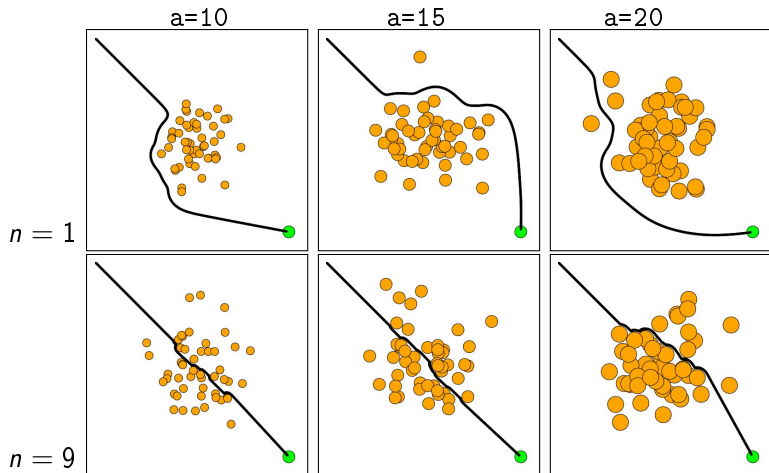


GAUSSIANA No=50



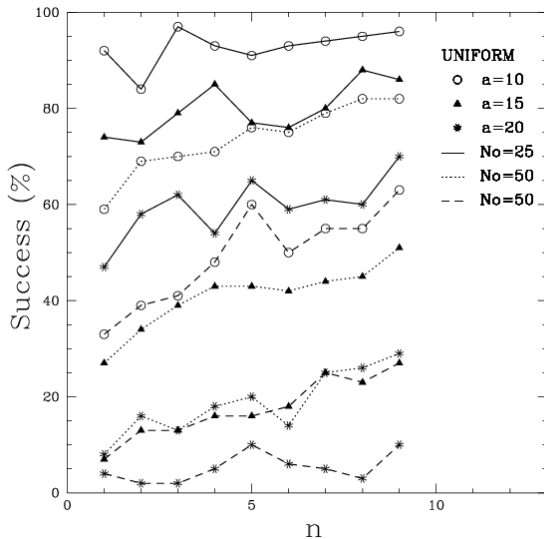
Simulações

GAUSSIANA No=50



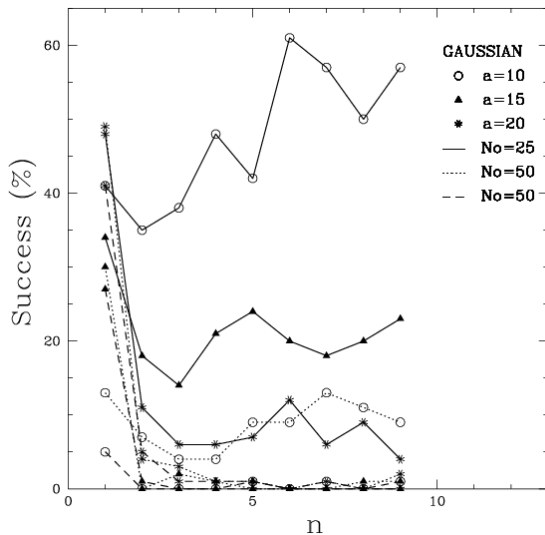
Taxa de Sucesso e n

Dist. Uniforme, 100 simulações



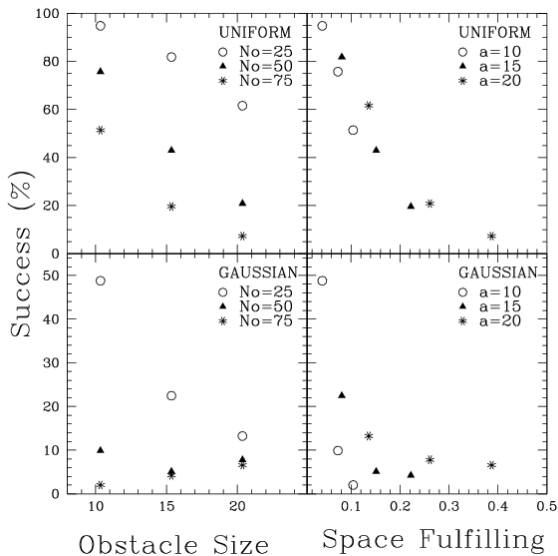
Taxa de Sucesso e n

Dist. Gaussiana, 100 simulações



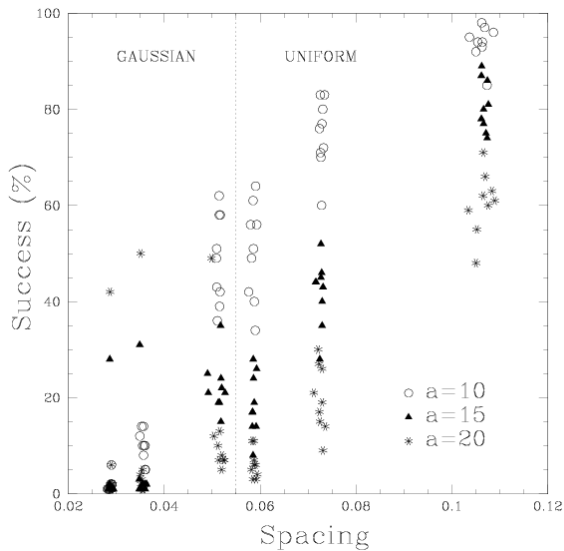
Sucesso Médio, Tamanho de Obstáculo e Preenchimento

100 simulações



Sucesso e Espaçamento

100 simulações



- Nova família de potenciais oferece melhor controle na trajetória;

Conclusões

- Nova família de potenciais oferece melhor controle na trajetória;
- Parâmetros de escala a, b e de forma n, m ;

Conclusões

- Nova família de potenciais oferece melhor controle na trajetória;
- Parâmetros de escala a, b e de forma n, m ;
- $S \propto n$ dist. uniforme;

Conclusões

- Nova família de potenciais oferece melhor controle na trajetória;
- Parâmetros de escala a, b e de forma n, m ;
- $S \propto n$ dist. uniforme;
- $S \propto \frac{1}{f(n)}$ dist. gaussiana;

Conclusões

- Nova família de potenciais oferece melhor controle na trajetória;
- Parâmetros de escala a, b e de forma n, m ;
- $S \propto n$ dist. uniforme;
- $S \propto \frac{1}{f(n)}$ dist. gaussiana;
- $S \propto -a$ dist uniforme

Conclusões

- Nova família de potenciais oferece melhor controle na trajetória;
- Parâmetros de escala a, b e de forma n, m ;
- $S \propto n$ dist. uniforme;
- $S \propto \frac{1}{f(n)}$ dist. gaussiana;
- $S \propto -a$ dist uniforme
- $S \propto e^{-P}$ dist. uniforme e gaussiana

Conclusões

- Nova família de potenciais oferece melhor controle na trajetória;
- Parâmetros de escala a, b e de forma n, m ;
- $S \propto n$ dist. uniforme;
- $S \propto \frac{1}{f(n)}$ dist. gaussiana;
- $S \propto -a$ dist uniforme
- $S \propto e^{-P}$ dist. uniforme e gaussiana
- fácil expansão para espaços de maior dimensão.

- obstáculos fixos, posições definidas;
- fuga de mínimos;
- espaço de dimensão maior;
- OM extendido;

Fabrizio Ferrari

`fabricio@ferrari.pro.br`

`www.ferrari.pro.br`