

Bug Algorithm

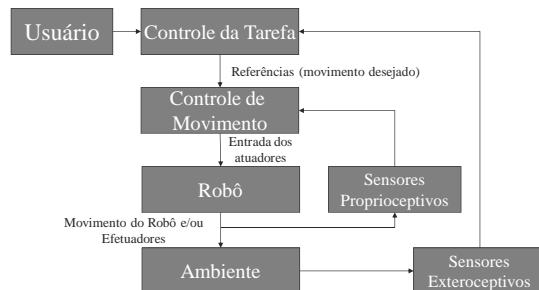
Referências: Cap 2 – Choset et al., slides Prof. Choset, CMU.

Prof. Guilherme Augusto Silva Pereira
gpereira@ufmg.br

Prof. Luciano Cunha de Araújo Pimenta
lucpim@cpdee.ufmg.br



Diagrama de Blocos Funcional de um Sistema Robótico



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
 G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

2

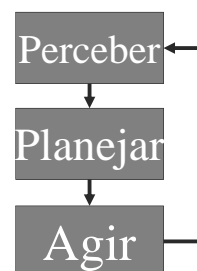
Controle da Tarefa: Perceber, Planejar e Agir



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
 G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

3

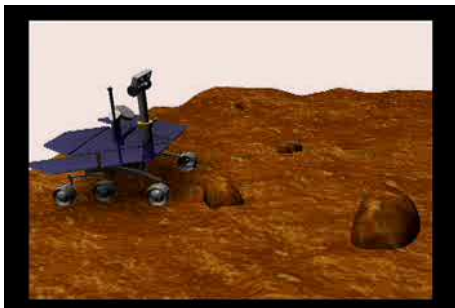
Arquitetura Deliberativa



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
 G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

4

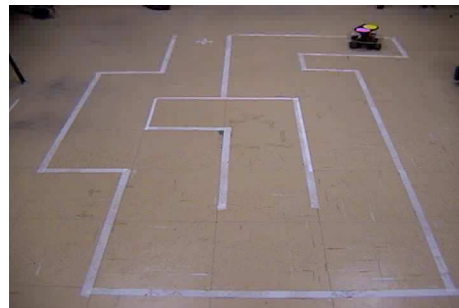
Exemplo de arquitetura deliberativa



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
 G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

5

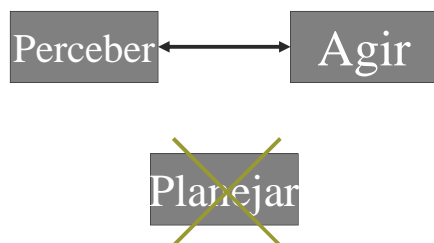
Como sair de um Labirinto?



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
 G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

6

Arquitetura Reativa



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

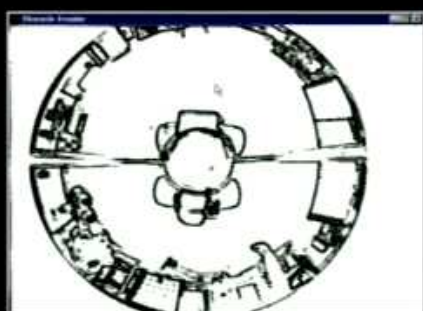
7

Exemplo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

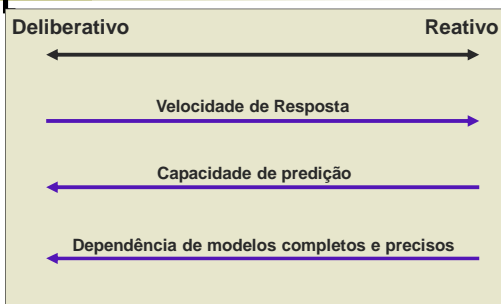
8



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

9

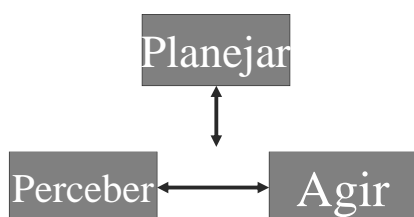
Reativo x Deliberativo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

10

Arquitetura Híbrida



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

11

Exemplo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

12

[O nosso curso]

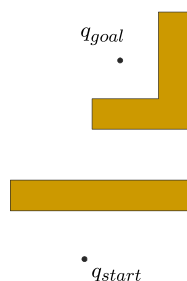
- Foco em algoritmos deliberativos e híbridos.
- Vamos começar com o algoritmo mais simples de todos: Bug (Inseto)
 - Não é necessário o conhecimento global do ambiente (mapa): Planejamento baseado em dados sensoriais
 - Existe prova de convergência!



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

13

[Algoritmo Bug]



Ponto inicial q_{start}

Ponto final q_{goal}

“Hit point” q_i^H

“Leave point” q_i^L

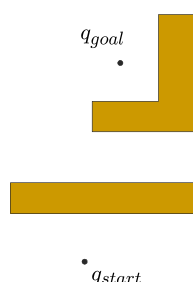
Um *caminho* é uma sequência de pares *hit/leave* limitada pelos pontos iniciais e finais.



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

14

[Algoritmo Bug 0]



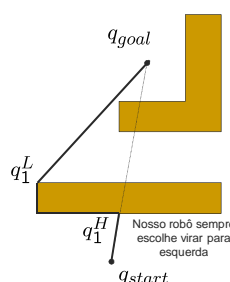
- Mova na direção do alvo
- Se encontrar um obstáculo, siga a borda do obstáculo até poder mover na direção do alvo novamente
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

15

[Algoritmo Bug 0]



- Mova na direção do alvo
- Se encontrar um obstáculo, siga a borda do obstáculo até poder mover na direção do alvo novamente
- Continue até chegar no alvo

Nosso robô sempre escolhe virar para esquerda



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

16

[Bug 0: Funciona sempre?]



Armadilha para inseto!



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

17

[E daí? Como resolver?]

- Escolha aleatória do lado
 - Posso ser um robô sem sorte!
- E se adicionarmos memória
 - Já passei por aqui antes...
 - Tenho que usar mais sensores ou sensores mais espertos para saber a minha posição (preciso me localizar)
 - No Bug 0 somente a direção do alvo era necessária
 - Tenho que ter uma certa representação do mundo
 - Como os insetos fazem isto?



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

18

Algoritmo Bug 1: Suposições

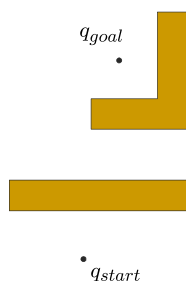
- O robô conhece sua posição e a posição do alvo
 - Portanto o robô sabe a direção do alvo
- O robô é capaz de medir a distância $d(x,y)$ entre dois pontos, x e y
- Um mundo razoável:
 - Um número finito de obstáculos em uma área finita
 - Um reta interceptará um obstáculo um número finito de vezes
 - O espaço de trabalho é limitado



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

19

Algoritmo Bug 1



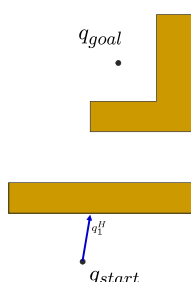
- Mova na direção do alvo
- Se encontrar um obstáculo, circule todo o obstáculo e durante o percurso lembre da posição mais perto do alvo
- Volte para a posição mais perto (*leave point*)
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

20

Algoritmo Bug 1



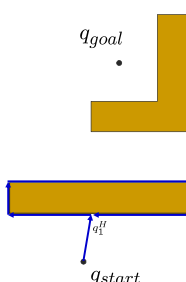
- Mova na direção do alvo
- Se encontrar um obstáculo, circule todo o obstáculo e durante o percurso lembre da posição mais perto do alvo
- Volte para a posição mais perto (*leave point*)
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

21

Algoritmo Bug 1



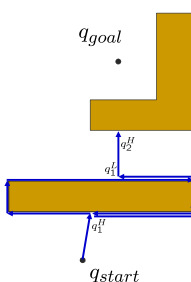
- Mova na direção do alvo
- Se encontrar um obstáculo, circule todo o obstáculo e durante o percurso lembre da posição mais perto do alvo
- Volte para a posição mais perto (*leave point*)
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

22

Algoritmo Bug 1



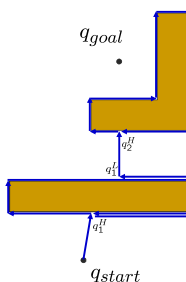
- Mova na direção do alvo
- Se encontrar um obstáculo, circule todo o obstáculo e durante o percurso lembre da posição mais perto do alvo
- Volte para a posição mais perto (*leave point*)
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

23

Algoritmo Bug 1



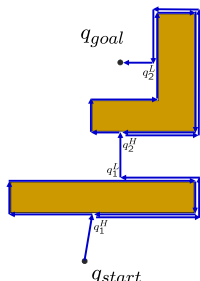
- Mova na direção do alvo
- Se encontrar um obstáculo, circule todo o obstáculo e durante o percurso lembre da posição mais perto do alvo
- Volte para a posição mais perto (*leave point*)
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

24

Algoritmo Bug 1



- Mova na direção do alvo
- Se encontrar um obstáculo, circule todo o obstáculo e durante o percurso lembre da posição mais perto do alvo
- Volte para a posição mais perto (*leave point*)
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

25

Algoritmo Bug 1

- Let $q_0^i = q_{start}$; $i = 1$
- while Forever do
 - repeat
 - from q_{i-1}^l move toward q_{goal}
 - until goal is reached or obstacle encountered at q_i^l
 - if goal is reached
 - exit
 - repeat
 - follow boundary recording point q_i^l with shortest distance to goal
 - until q_{goal} is reached or q_i^l is re-encountered
 - if goal is reached
 - exit
 - Go back to q_i^l
 - if move toward q_{goal} moves into obstacle
 - exit with failure
 - else
 - $i=i+1$
 - end while



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

26

Algoritmo Bug 1: Análise

- Quais são os limites inferiores e superiores para o tamanho, L , dos caminhos percorridos pelo robô?
 - D – Distância do início até o fim
 - P_i – Perímetro do i -ésimo obstáculo

$$L \geq D$$

$$L \leq D + 1,5 \sum_{i=1}^n P_i$$



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

27

Algoritmo Bug 1: Análise

- Como mostramos que o algoritmo é completo?
 - Um algoritmo de planejamento é completo se, em tempo finito, ele encontra um caminho se um caminho existir ou termina se não existir.
- Por contradição: Suponha que Bug 1 seja incompleto
 - Então existe um caminho e o algoritmo não o encontra
 - Por suposição o caminho tem tamanho finito e intercepta obstáculos um número finito de vezes
 - Ou ele termina com falha ou gasta tempo infinito e nunca termina



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

28

Algoritmo Bug 1: Análise

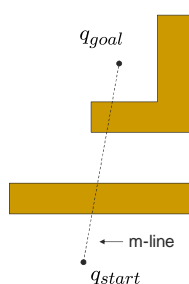
- Suponha que nunca termina
 - Mas cada *leave point* é mais perto do obstáculo que o *hit point* correspondente;
 - Cada *hit point* é mais perto que o último *leave point*;
 - Então, como existe um número finito de pares *hit/leave*, após ter encontrado todos, o robô segue para o alvo e termina: Contradição
- Suponha que ele termina com falha
 - Então, o ponto mais perto do obstáculo após um *hit* deve ser um *leave* onde o robô deve se mover para dentro do obstáculo (condição de falha.)
 - Segundo o Teorema de Jordan a linha do robô ao alvo deve interceptar o obstáculo um número par de vezes
 - Mas então, existe um outro ponto de interseção na borda do obstáculo que é mais perto do alvo. Desde que assumimos que existe um caminho, o robô deve ter passado por este ponto, o que contradiz a definição de *leave point*.



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

29

Algoritmo Bug 2



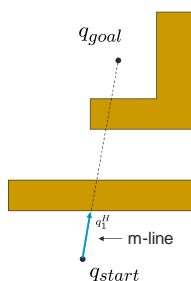
- Mova na direção do alvo seguindo a *m-line*
- Se encontrar um obstáculo, circule o obstáculo até encontrar a *m-line* em um ponto mais perto do alvo (*leave point*)
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

30

Algoritmo Bug 2



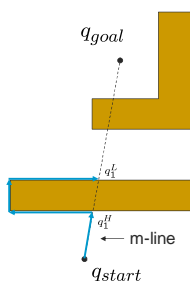
- Mova na direção do alvo seguindo a *m-line*
- Se encontrar um obstáculo, circule o obstáculo até encontrar a *m-line* em um ponto mais perto do alvo (*leave point*)
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

31

Algoritmo Bug 2



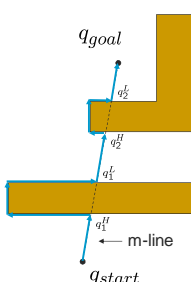
- Mova na direção do alvo seguindo a *m-line*
- Se encontrar um obstáculo, circule o obstáculo até encontrar a *m-line* em um ponto mais perto do alvo (*leave point*)
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

32

Algoritmo Bug 2



- Mova na direção do alvo seguindo a *m-line*
- Se encontrar um obstáculo, circule o obstáculo até encontrar a *m-line* em um ponto mais perto do alvo (*leave point*)
- Continue até chegar no alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

33

Algoritmo Bug 2

- Let $q_0^i = q_{start}$, $i = 1$
- while forever do
 - repeat
 - from q_{i-1}^i move toward q_{goal} along the *m-line*
 - until goal is reached or obstacle encountered at q_i^l
 - if goal is reached, exit
 - repeat
 - follow boundary
 - until (q_{goal} is reached) or (q_i^l is re-encountered) or (*m-line* is re-encountered in a point x , x is not q_i^l , $d(x, q_{goal}) < d(q_i^l, q_{goal})$, and way to goal is unimpeded)
 - if goal is reached, exit
 - if q_i^l is reached
 - return failure
 - else
 - $q_i^l = m$
 - $i = i + 1$
 - end while

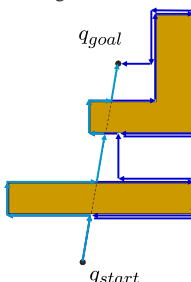


Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

34

Qual é melhor? Bug 1 ou Bug 2?

Bug 2 é melhor!



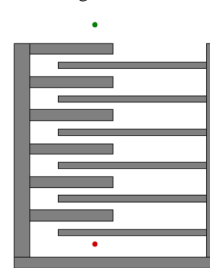
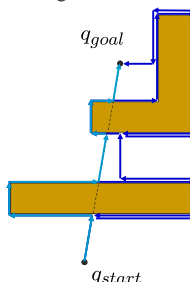
Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

35

Qual é melhor? Bug 1 ou Bug 2?

Bug 2 é melhor!

Bug 1 é melhor!



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

36

Algoritmo Bug 2: Análise

- Quais são os limites inferiores e superiores para o tamanho, L , dos caminhos percorridos pelo robô?
 - D – Distância da início até o fim
 - P_i – Perímetro do i -ésimo obstáculo
 - n_i – número de vezes que o caminho intercepta o obstáculo i (número de possíveis *leave points*) – metade deles está do lado oposto ao alvo

$$L \leq D + \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{2} P_i$$



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

37

O que pode ser melhorado

- Até agora assumimos que o robô encosta no obstáculo antes de circulá-lo
 - Usa sensores de toque, por exemplo
- E se o robô for equipado com um sensor de proximidade que permita detectar o obstáculo antes de chegar até ele?

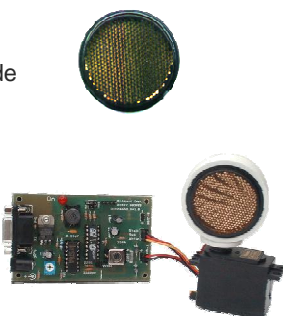


Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

38

Sensores de Proximidade

- Ultra-som
 - Aplicação de pulsos de 40 a 60kHz por 1 msec.
 - Precisão de 1 % do valor máximo.
 - Ângulo de 30 graus que causa reflexões indesejadas.

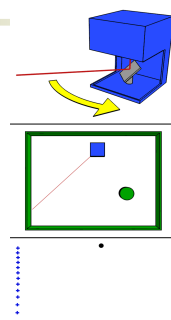


Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

39

Radar a laser

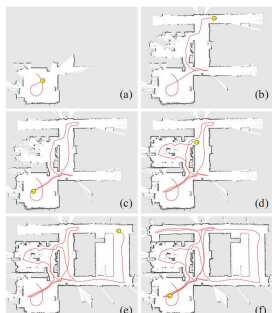
- Lidar – Light Detection and Ranging
- Ladar – Laser Detection and Ranging



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

40

Radar a laser



Information Gain-based
Exploration Using Rao-Blackwellized
Particle Filters



www.openslam.org

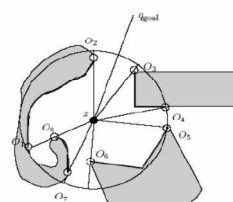


Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

41

Tangent Bug

- Se baseia no fato de que é possível encontrar as descontinuidades na medição do sensor
- Assume um sensor omnidirecional e com alcance limitado



42

Tangent Bug

- Como nos outros “Bugs” possui dois comportamentos
 - Move-para-o-alvo
 - Segue-o-obstáculo
- O que muda
 - O move-para-o-alvo nem sempre move em linha reta para o alvo
 - A hora do chaveamento entre os comportamentos



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

43

Move-para-o-alvo

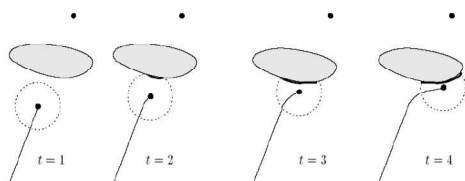
- Se não tiver um obstáculo, move sobre a linha que liga a posição x ao alvo (a m -line do Bug 2)
- Se houver obstáculo, move para o ponto de descontinuidade que minimiza a distância para o alvo. Este ponto é atualizado durante o movimento do robô. É usada uma heurística para escolher o ponto O_i que minimiza $d(x, O_i) + d(O_i, q_{goal})$



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

44

Move-para-o-alvo: Exemplo

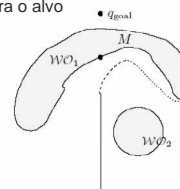


Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

45

Chaveando comportamentos

- E se a heurística detectar que a distância para o alvo começou a aumentar?
 - Foi encontrado um ponto de mínimo local, M
 - Segue o obstáculo na mesma direção que estava se movendo para o alvo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

46

Quando chavear de volta?

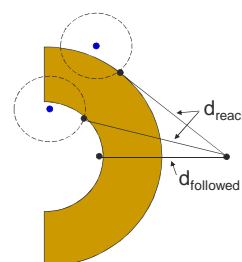
- $d_{followed}$: menor distância entre o alvo e a borda já explorada do obstáculo sendo seguido;
- d_{reach} : menor distância entre o alvo e a borda do obstáculo sendo seguido que está na linha de visão robô (a borda que está dentro do limite de percepção do robô e não está bloqueada por obstáculos);
- Quando $d_{reach} < d_{followed}$ o robô chaveia novamente para o comportamento Move-para-o-alvo
 - Detectou que a distância pode diminuir, ou seja, escapou do mínimo local



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

47

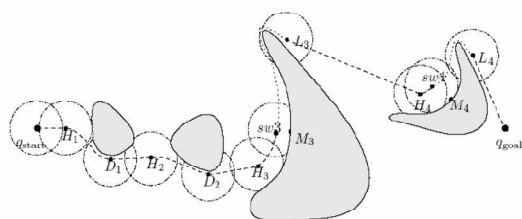
Exemplo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

48

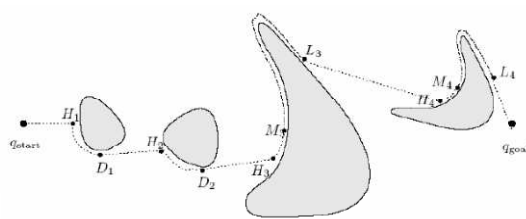
Exemplo



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

49

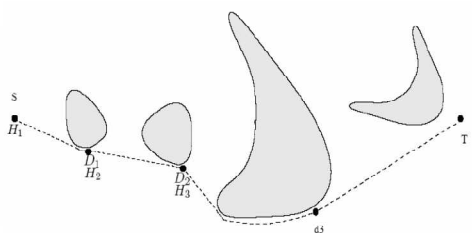
Exemplo: Sensor de toque



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

50

Exemplo: Sensor com campo de visão ilimitado



Planejamento de Movimento e Estratégias de Controle de Robôs
G. A. S. Pereira & L. C. A. Pimenta

51