

Planejamento Probabilístico de Mapa de Rotas com Seleção de Vértices em Componentes
Conexos Restritos à Distância ¹

Author(s):

Paulo Thiago Fracasso

Anna Helena Reali Costa

¹This work was supported by Fapesp Project LogProb, grant 2008/03995-5, São Paulo, Brazil.

PLANEJAMENTO PROBABILÍSTICO DE MAPA DE ROTAS COM SELEÇÃO DE VÉRTICES EM COMPONENTES CONEXOS RESTRITOS À DISTÂNCIA

PAULO THIAGO FRACASSO*, ANNA HELENA REALI COSTA*

**Laboratório de Técnicas Inteligentes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto 158, travessa 3 - CEP 05508-900
São Paulo, SP, Brasil*

Emails: paulo.fracasso@poli.usp.br, anna.reali@poli.usp.br

Abstract— The probabilistic roadmap planning has emerged as a powerful framework for path planning of mobile robots due to its computational efficiency, implementation simplicity, and scalability for robots with many degrees of freedom. In this work are presented a new vertices selection technique that reduce significantly the processing time. The key of this new technique is adding new edges, or paths, in the graph using vertices of others connected components but, distance restricted. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposal method to solve the mobile robot path planning problem in internal environment.

Keywords— Path Planning, Probabilistic Roadmap, Mobile Robots, Vertices Selection.

Resumo— O planejamento probabilístico de mapa de rotas tem se mostrado uma poderosa ferramenta para o planejamento de caminhos para robôs móveis, devido a sua eficiência computacional, simplicidade de implementação e escalabilidade para robôs com muitos graus de liberdade. Neste trabalho é apresentada uma nova técnica para seleção de vértices que permite reduções significativas do tempo de processamento. A peça chave desta nova técnica é acrescentar novas arestas, ou caminhos, ao grafo de nós que interliguem outros componentes conexos, porém restritos a uma certa distância. Os resultados dos experimentos demonstram a eficácia do método proposto à resolução do problema de planejamento de caminhos aplicado a robôs móveis em ambientes internos.

Palavras-chave— Planejamento de Caminhos, Mapa de Rotas Probabilístico, Robôs Móveis, Seleção de Vértices.

1 Introdução

O planejamento de caminhos é definido com a organização das ações de navegação visando encontrar um caminho factível entre duas posições quaisquer, condicionada ao controle de um sistema móvel (Russel and Norvig, 2002). A organização destas ações é uma tarefa altamente complexa, pois está intimamente ligada à representação do ambiente como também à representação do robô (Nehmzow, 2002), podendo ainda possuir outros fatores que podem aumentar sua complexidade, tais como formulações de menor caminho, menor tempo, robôs com muitos graus de liberdade, etc.

Dentre as diversas técnicas de planejamento de caminhos, uma que lida muito bem com o problema da explosão da complexidade computacional, associada ao tempo de processamento e à quantidade de espaço de armazenamento, é o planejamento probabilístico de mapa de rotas (*Probabilistic Roadmap Planning - PRMP*) (Geraerts, 2006; Dale and Amato, 2001; Svestka and Overmars, 1998; Kavraki et al., 1996).

De forma bem simplista, o PRMP constrói um grafo $G(V,A)$ de forma iterativa e incremental, onde o conjunto de vértices V são configurações livres amostradas no espaço de configurações do robô e o conjunto de arestas A correspondem à caminhos livres de colisão entre tais configurações. Para se encontrar um caminho entre as configurações de origem e destino, α e β respectivamente, primeiramente são inseridas arestas unindo estas

configurações ao grafo G , para então procurar por um caminho livre de colisão entre α e β em G .

Existem diversos parâmetros que podem ser ajustados para que o PRMP consiga obter um caminho factível entre as configurações α e β , um dos que mais influenciam no desempenho do algoritmo é a forma com que as configurações livres amostradas, ou vértices, serão conectadas umas às outras (Svestka and Overmars, 1998). Este fato está relacionado à estrutura do mapa de rotas, que poderá ter uma quantidade excessiva de arestas desnecessárias para a resolução do problema durante a fase de questionamento (Geraerts and Overmars, 2006).

Dentre as técnicas de seleção de vértices existem três grandes vertentes: proximidade (Kavraki and Latombe, 1994), visibilidade (Nissoux et al., 1999) e conectividade (Geraerts, 2006). A primeira lida apenas com vértices que representam configurações livres próximas, a segunda com vértices cuja interligação não cruza com configurações proibidas e a terceira com o conceito de componentes conexos em grafos.

Para robôs móveis operando em ambientes internos procura-se algoritmos que possam calcular rapidamente um caminho e que este seja o menor possível. Desta forma, este trabalho apresenta uma nova técnica de seleção de vértices, que funde as características de conectividade e proximidade.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: A seção 2 descreve o algoritmo PRMP.

A seção 3 apresenta as técnicas de seleção por proximidade e conectividade, além da técnica desenvolvida. Na seção 4 é descrita a metodologia utilizada nos experimentos. Já na seção 5 são exibidos os resultados dos experimentos realizados. Finalmente, a seção 6 apresenta as conclusões e considerações finais sobre a técnica proposta aplicada à robôs móveis em ambientes internos.

2 O algoritmo PRMP

Diferentemente de outras técnicas de planejamento o PRMP possui como espinha dorsal a construção de uma estrutura de dados de maneira probabilística (Kavraki et al., 1996) e pode ser resumido em duas fases distintas: a fase de construção do mapa de rotas e a fase de questionamento.

Na fase de construção do mapa de rotas o algoritmo utiliza a conectividade do espaço de configurações livres para traçar um grafo não-orientado e acíclico que exprima, da forma mais próxima possível, as possibilidades de navegação no ambiente de trabalho do robô. Para tanto são utilizadas técnicas de amostragem, que selecionam configurações livres deste ambiente, e de seleção de vértices, que escolhem um conjunto de configurações livres, selecionadas pela técnica de amostragem, que irão se ligar para formar um grafo, também conhecido como mapa de rotas, conforme pode ser observado no algoritmo da Figura 1.

<p>Entrada: espaço de configurações livres Saída: $G(V, A)$</p> <p>$V = \emptyset$ $A = \emptyset$ loop $c \leftarrow$ configuração livre amostrada $V \leftarrow V \cup \{c\}$ $V_C \leftarrow$ configurações livres vizinhas à c $ordenar(V_C)$ para todo $v \in V_C$ se $[\neg ciclo(c, v) \wedge possivel(c, v)]$ então: $A \leftarrow A \cup \{(c, v)\}$</p>
--

Figura 1: Fase de construção do mapa de rotas.

Inicialmente o conjunto de vértices amostrados V e o conjunto de arestas A estão vazios. Uma configuração livre c é amostrada e adicionada em V . São escolhidos então os vértices vizinhos à c e também pertencentes ao conjunto V , criando assim um conjunto de vértices próximos à c , conhecido como conjunto V_C e que será o foco deste trabalho. Os vértices de V_C são ordenados e um a um, de forma crescente, eles são selecionados para verificar a existência de ciclos no mapa de rotas e a possibilidade de um caminho entre as configurações livres representadas por esses vértices no grafo. Caso as duas premissas anteriores sejam

satisfeitas, há a inclusão de uma aresta entre os vértices c e v ao conjunto A . Quando um certo número de configurações livres amostradas é atingido, o grafo resultante é disponibilizado para a fase de questionamento, onde é encontrada a solução do problema.

Na fase de questionamento, as configurações α e β são adicionadas e interligadas ao grafo G obtido na fase de construção. Utilizando um algoritmo de busca pelo menor caminho em um grafo, é encontrado um conjunto ordenado de configurações que corresponde a um caminho factível entre as configurações de origem e destino.

3 Seleção de Vértices

A seleção dos vértices nada mais é que a escolha dos vértices que irão compor o conjunto V_C , ou seja, aqueles vértices que poderão formar arestas com o vértice amostrado c , conforme algoritmo da Figura 1. A seguir são apresentadas as técnicas de seleção de vértices por conectividade, por proximidade e por conectividade restrita à distância, foco deste trabalho.

3.1 Seleção de Vértices por Proximidade

A técnica de seleção de vértices por proximidade foi a primeira estratégia de seleção de vértices desenvolvida e foi descrita por Kavraki and Latombe (1994). Sua principal característica é a escolha de uma certa quantidade de vértices dentro de uma determinada área de abrangência, fazendo com que não seja necessária a utilização de todos os vértices amostrados.

Na técnica de seleção de vértices por proximidade são definidas *a priori* a área de seleção e a quantidade de vértices selecionados.

Durante a construção do conjunto V_C é realizado o seguinte procedimento. Suponha que, após algumas iterações na fase de construção do mapa de rotas exista um grafo, conforme mostra a Figura 2 (a). Em seguida, é amostrada uma nova configuração livre, conforme vértice na cor vermelha da Figura 2 (b). Com esta nova configuração é gerada a área de seleção, que nada mais é que uma circunferência centrada neste vértice e com diâmetro definido *a priori*, conforme círculo na cor cinza da Figura 2 (c). Se, por exemplo, o número de vértices selecionados for igual a 3, resultará nos vértices selecionados na cor azul da Figura 2 (d).

3.2 Seleção de Vértices por Conectividade

Um componente conexo de um grafo pode ser definido como um sub-grafo conectado. Já um grafo conectado é definido como um grafo que possui pelo menos um caminho que possibilite alcançar

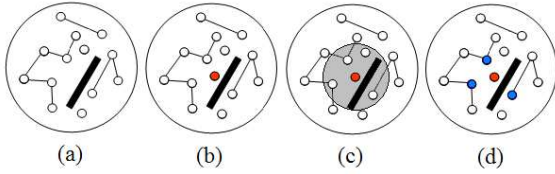


Figura 2: Seleção de vértices por proximidade.

qualquer vértice a partir de qualquer outro vértice deste grafo. Por outro lado, um grafo desconexo é composto por diversos componentes conexos (Even, 1979).

A técnica de seleção de vértices por conectividade procura interligar o vértice c , do algoritmo da Figura 1, ao vértice mais próximo de k componentes conexos do grafo durante cada iteração. Desta forma, as conexões são realizadas de forma direcionada a exploração de novos caminhos.

A seguir é descrita a execução do algoritmo da fase de construção do mapa de rotas. Suponha que após algumas iterações na fase de construção do mapa rotas exista um grafo, conforme Figura 3 (a). Em seguida é amostrada uma nova configuração livre, ilustrada com o vértice na cor vermelha da Figura 3 (b). Com esta nova configuração é selecionado apenas o vértice mais próximo de k componentes conexos. Por exemplo, com $k = 3$, resultará nos vértices selecionados na cor azul da Figura 3 (c). Note que um vértice isolado é um componente conexo. Caso o valor de k seja maior que o número de componentes conexos do grafo, serão selecionados apenas o número de componentes conexos existentes.

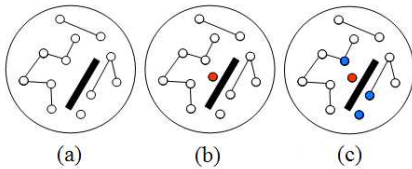


Figura 3: Seleção de vértices por conectividade.

3.3 Seleção de Vértices por Conectividade Restrita à Distância

A técnica de seleção de vértices por conectividade restrita à distância apresenta características das duas técnicas descritas anteriormente, ou seja, permite a presença do caráter exploratório, contido na técnica de conectividade simples, mas esta exploração não é realizada em todo o espaço de configuração, conforme técnica de proximidade. Com isso, mantêm-se as características de conectividade no grafo, porém, com redução no tempo de processamento.

Como na técnica de seleção de vértices por proximidade, nesta técnica também são necessá-

rios definir *a priori* a área de seleção e a quantidade de vértices selecionados, mas agora não serão vértices e sim componentes conexos.

Com relação ao procedimento de execução, é o mesmo descrito pela técnica de seleção de vértices por proximidade (Figuras 2 (a), (b) e (c)), porém dos vértices englobados pelo raio de seleção, círculo na cor cinza da Figura 4 (c), é selecionado apenas o vértice mais próximo de k componentes conexos. Por exemplo, utilizando-se $k = 3$, resultará nos vértices selecionados na cor azul da Figura 4 (d).

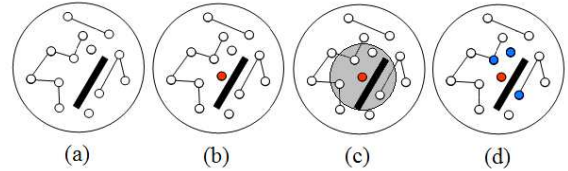


Figura 4: Seleção de vértices por conectividade restrita à distância.

Um importante ponto que se deve ressaltar é que caso a quantidade de vértices selecionadas seja menor que a quantidade de vértices englobados pelo raio de seleção, a técnica de seleção de vértices por conectividade restrita à distância será igual a técnica de conectividade simples.

4 Metodologia Experimental

Os experimentos foram realizados focando ambientes internos, onde neste caso optou-se pela descrição simplista de uma casa, com a presença de cômodos, passagens (portas) e corredores. Como há grandes áreas compostas por configurações livres, não será necessário amostrar um grande número de configurações para capturar a conectividade do ambiente, porém o raio de busca por uma solução deverá ser ajustado adequadamente para que possam existir vértices candidatos para a composição do conjunto V_C .

Com relação à modelagem do robô móvel, o mesmo foi inspirados no robô Pioneer 2DX, ou seja, holonômico, com dois graus de liberdade e geometricamente descrito como uma circunferência de 450mm de diâmetro. Desta forma, o espaço de configurações é obtido dilatando-se o espaço de trabalho em função do tamanho do modelo do robô, conforme Figuras 5 (a) e (b).

Na Figura 5 também são apresentados as posições de origem e destino no espaço de trabalho e o caminho ótimo no espaço de configurações. Para este ambiente, de 500×500 pixels, o caminho ótimo calculado foi de 783,48 pixels.

Com relação ao método de amostragem, o mesmo foi selecionado das análises realizadas por Fracasso (2008). Naquele trabalho, para ambientes internos, a amostragem pelo eixo-médio foi a

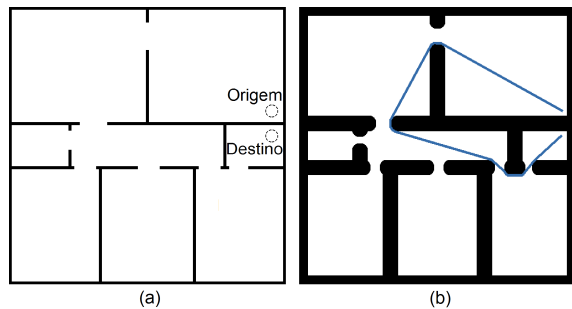


Figura 5: Espaços de trabalho (a) e de configurações (b).

que apresentou os melhores resultados nos quesitos percentual de soluções encontradas, tempo de processamento e comprimento dos caminhos encontrados.

Para que pudessem ser evidenciados alguns parâmetros estatísticos, como média, desvio padrão, valor máximo e valor mínimo, todos os experimentos foram executados 30 vezes com um conjunto de vértices diferentes e amostrados pela técnica de eixo-médio. Ao final dos experimentos foram simulados 9000 tipos diferentes de configurações totalizando mais de 500 horas de simulação.

Finalmente, para que haja uma correta comparação entre os diversos resultados, todos os experimentos foram realizados em um mesmo computador com processador Pentium IV Dual Core de 3,06 GHz e com 1 GB de memória RAM. Todos os algoritmos foram escritos em linguagem de programação C++ e compilados utilizando o compilador GCC versão 3.3.1.

5 Resultados

Foram realizados basicamente três experimentos, onde foram variados os seguintes parâmetros do algoritmo PRMP: raio de seleção, número de vértices amostrados e quantidade de componentes conexos selecionados.

O primeiro experimento utilizou raio de seleção igual a 50 *pixels*, o segundo igual a 100 *pixels* e o terceiro não utilizou raio de seleção, tornando-se uma técnica de seleção por conectividade simples. Em ambos os três experimentos variou-se também o número de vértices amostrados, de 100 a 1000 com passo de 100, e a quantidade de componentes conexos selecionados, de 2 a 20 com passo de 2.

O objetivo dos experimentos foi avaliar três importantes características de algoritmos de planejamento de caminhos: o percentual de soluções encontradas, o tempo médio de processamento e comprimento médio dos caminhos encontrados.

Os resultados dos experimentos realizados são apresentados na forma de uma dupla de figuras, uma que descreve o comprimento médio dos caminhos encontrados (figura superior) e a outra que

descrever o tempo médio de processamento (figura inferior). Em cada uma das figuras, o eixo vertical representa a quantidade de componentes conexos selecionados e o eixo horizontal representa o número de vértices amostrados. As barras graduadas na lateral direita representam o valor da cor na sua respectiva figura, no caso da figura superior, por se tratar do comprimento médio das soluções encontradas, a unidade é o *pixel* e na inferior, por se tratar do tempo médio de processamento, a unidade é o *segundo*. Finalmente as linhas na cor preta numericamente identificadas no interior das figuras apresentam o percentual de soluções encontradas.

A Figura 5 apresenta os resultados para o experimento com raio de seleção igual a 50 *pixels*. Nela pode-se observar que o algoritmo PRMP não encontra nenhuma solução com menos de 200 vértices amostrados. Por outro lado, com mais de 700 vértices o algoritmo encontrou um caminho factível para todos os experimentos realizados. Também é possível observar a existência de mínimos locais nos resultados do comprimento médio dos caminhos encontrados, assim, caso deseja-se escolher os parâmetros, quantidade de componentes conexos selecionados e número de vértices amostrados, que forneçam o menor comprimento de caminho é necessário ponderar se estes possuem as melhores respostas com relação ao tempo de processamento e percentual de soluções encontradas.

Já a Figura 5 apresenta os resultados para o experimento com raio de seleção igual a 100 *pixels*. Nesta figura pode-se observar que o algoritmo PRMP encontrou solução com todo o conjunto de vértices amostrados e, com mais de 400 vértices amostradas, é possível encontrar um caminho factível para todos os experimentos realizados. Porém, observa-se que o comprimento médio das soluções encontradas e o tempo de processamento são maiores que os resultados do experimento anterior, raio de seleção igual a 50 *pixels*.

Finalmente a Figura 5 apresenta os resultados para o experimento sem raio de seleção, ou seja, seleção de vértices por conectividade simples. Nesta figura pode-se observar que o algoritmo PRMP também encontrou solução com todo o conjunto de vértices amostrados e, com apenas 200 vértices amostradas, é possível encontrar um caminho factível para todos os experimentos realizados. Infelizmente as vantagens param por aí, pois o comprimento médio das soluções encontradas e o tempo de processamento são maiores que os resultados dos dois experimento anterior.

6 Conclusões

A técnica de seleção de vértices proposta apresenta resultados melhores em termos de comprimento médio das soluções encontradas e o tempo de processamento do que a técnica de seleção de

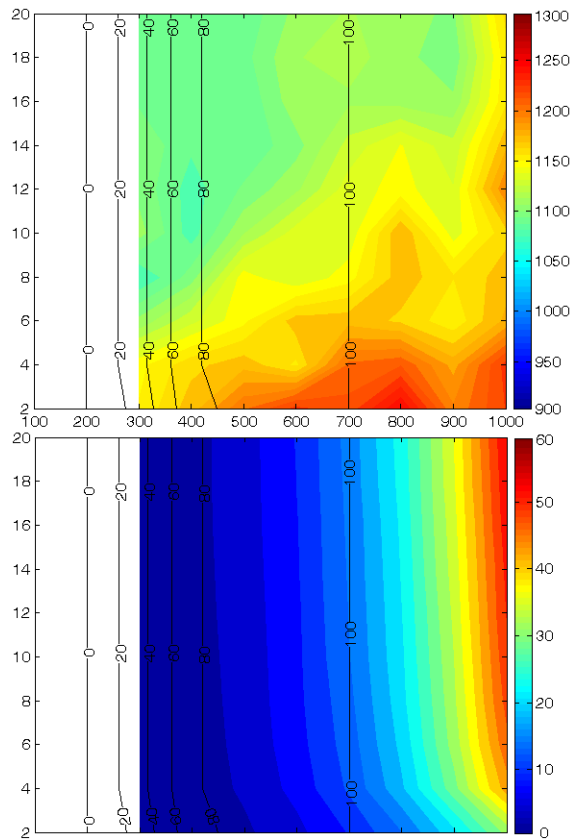


Figura 6: Resultados dos experimentos com raio de seleção de 50 *pixels*.

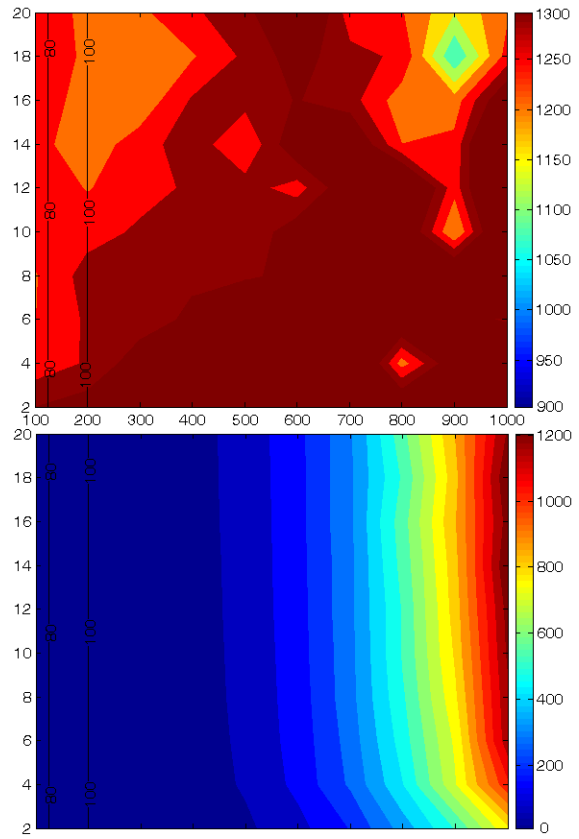


Figura 8: Resultados dos experimentos sem raio de seleção.

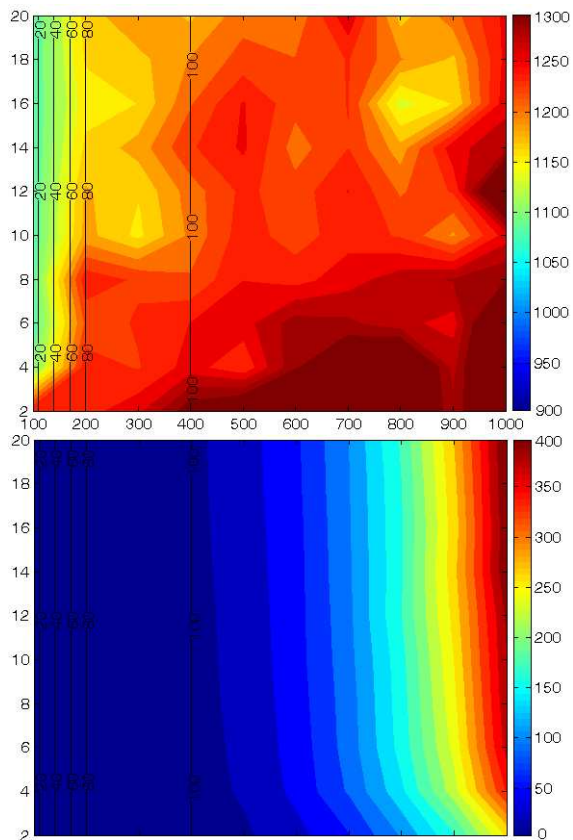


Figura 7: Resultados dos experimentos com raio de seleção de 100 *pixels*.

vértices por conectividade simples.

A grande dificuldade desta técnica está em encontrar os melhores valores para o raio da circunferência de seleção e a quantidade de vértices selecionados. Na escolha correta dos valores desses dois parâmetros está a chave entre o sucesso e o fracasso desta técnica.

Na escolha do raio da circunferência de seleção, se o valor for muito pequeno, poderá não haver vértices para a formação das arestas, conseqüentemente os questionamentos não terão solução. Por outro lado, se o valor do raio da circunferência de seleção for muito grande, haverá muitos vértices candidatos e desta maneira o número dos vértices selecionados deve ser capaz de absorvê-los, senão haverá um desperdício de tempo de processamento ao definir candidatos que não serão usados.

Já na escolha do número de vértices selecionados, deve haver um compromisso entre as possibilidades de caminhos a partir do mesmo vértice e o raio de seleção. Valores muito grandes do número de vértices selecionados fazem com que alguns vértices tenham um alto grau, mas somente poucos contribuem para o mapa de rotas, conseqüentemente o comprimento dos caminhos resultantes na fase de questionamento será penalizado. Por outro lado, valores muito pequenos do número de vértices selecionados fazem com que os vértices sejam

conectados somente entre si, resultando um grafo com muitos componentes e que não será proveitoso durante a fase de questionamentos.

Um outro ponto interessante observado nos resultados dos experimentos foi a correlação existente entre o número de vértices amostrados e o percentual de soluções encontradas. Além disso, esta correlação é independente do valor do raio de seleção utilizado.

Finalmente com relação ao tempo de processamento, observa-se que há um crescimento exponencial com relação ao número de vértices amostrados e também ao número de componentes conexos selecionados em todos os experimentos realizados.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT por ter gentilmente cedido o computador que realizou as simulações contidas neste trabalho.

Referências

- Dale, L. and Amato, N. (2001). Probabilistic roadmaps: Putting it all together, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'01)*, Vol. 2, IEEE Robotics and Automation Society, Seoul, South Korea, pp. 1940–1947.
- Even, S. (1979). *Graph Algorithms*, Computer Science Press, Potomac, USA.
- Fracasso, P. T. (2008). *Análise de Técnicas para Amostragem e Seleção de Vértices no Planejamento Probabilístico de Mapa de Rotas*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Geraerts, R. (2006). *Sampling-based Motion Planning: Analysis and Path Quality*, PhD Thesis, Utrecht University, The Netherlands.
- Geraerts, R. and Overmars, M. (2006). Sampling and node adding in probabilistic roadmap planners, *Robotics and Autonomous Systems* **54**: 165–173.
- Kavraki, L., Kolountzakis, K. and Latombe, J.-C. (1996). Analysis of probabilistic roadmaps for path planning, *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'96)*, Vol. 4, IEEE Robotics and Automation Society, Minneapolis, USA, pp. 3020–3025.
- Kavraki, L. and Latombe, J.-C. (1994). Randomized preprocessing of configuration space for fast path planning, *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'94)*, Vol. 3, IEEE Robotics and Automation Society, San Diego, USA, pp. 2138–2145.
- Nehmzow, U. (2002). *Mobile Robotics: A Practical Introduction*, Springer-Verlag, New York, USA.
- Nissoux, C., Simeon, T. and Laumond, J.-P. (1999). Visibility-based probabilistic roadmaps, *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'99)*, Vol. 3, IEEE Robotics and Automation Society, Kyongjy, South Korea, pp. 1316–1321.
- Russel, S. and Norvig, P. (2002). *Artificial Intelligence: A modern Approach*, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Svestka, P. and Overmars, M. (1998). *Probabilistic Path Planning In: Robot Motion Planning and Control*, Springer-Verlag, New York, USA, p. 255-304.