PLANEJAMENTO DE MOVIMENTO BASEADO EM ESPUMA PROBABILÍSTICA APLICADO A UMA ÓRTESE ATIVA PARA OS MEMBROS INFERIORES

Luís B. P. Nascimento*, Kassio J. S. Eugenio*, Daniel H. S. Fernandes*, Diego S. Pereira*†, Pablo J. Alsina*

*Departamento de Engenharia de Computação e Automação - DCA Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN Natal, RN, Brasil

> † Instituto Federal do Rio Grande do Norte - IFRN Parnamirim, RN, Brasil

Emails: lbruno@ufrn.edu.br, kassioeugenio@gmail.com, eng.danielhsfernandes@gmail.com, diego.pereira@ifrn.edu.br, pablo@dca.ufrn.br

Abstract— In motion planning for an active lower limb orthosis, it is necessary to consider that it is an assistive technology, which requires a degree of safety and reliability in the planned movements. In addition, it is a high dimensional robotic problem, and this reflects on computational cost. In this context, this article presents an approach to simplify the path planning for an active orthosis through the application of the Probabilistic Foam method. In PFM, a structure called Probabilistic Foam, formed by a set of bubbles, propagates through the free space starting from an initial configuration to a goal configuration. It is thus possible to extract a path free of obstacles. Bubbles ensure safe maneuverability areas, meeting the safety requirements in the maneuver. Thus, PFM was applied in the planning of obstacle transposing by an active orthosis for lower limbs. Although preliminary results were presented, the method was able to plan the safe movement to be performed by the robot in the proposed scenario.

Keywords— Robotics, Path Planning, Probabilistic Foam, Active Orthosis.

Resumo— No planejamento de movimentos para uma órtese ativa para membros inferiores, é necessário considerar que se trata de uma tecnologia assistiva, ou seja, exige um certo grau de segurança e confiabilidade nos movimentos gerados. Além disso, é um problema robótico de alta dimensão, refletindo no custo computacional. Nesse contexto, este artigo apresenta uma abordagem para simplificar o planejamento de movimentos para uma órtese ativa através da aplicação do método Espuma Probabilística (*Probabilistic Foam Method - PFM*). No PFM, uma estrutura chamada Espuma Probabilística, formada por um conjunto de bolhas, se propaga pelo espaço livre partindo de uma configuração inicial até uma configuração final, sendo possível extrair um caminho livre de obstáculos. As bolhas da espuma garantem regiões seguras de manobrabilidade, atendendo aos requisitos de segurança na manobra. Dessa forma, o PFM foi aplicado no planejamento da ultrapassagem de um obstáculo por uma órtese ativa para os membros inferiores. Apesar de serem apresentados resultados preliminares, o método foi capaz de planejar o movimento seguro a ser realizado pelo robô no cenário proposto.

Palavras-chave— Robótica, Planejamento de Caminho, Espuma Probabilística, Órtese Ativa.

1 Introdução

No desenvolvimento de quaisquer tipos de robôs autônomos, o planejamento de caminho é uma importante etapa que busca garantir que seus movimentos sejam realizados com autonomia e que possa concluir com êxito uma determinada tarefa (Imen Chaari et al., 2017). O planejamento de caminho pode ser entendido como uma sequência de configurações que o robô deve assumir para atingir um determinado objetivo, isto é, sair de uma configuração inicial q_{init} até uma configuração final q_{goal} , sem colidir com possíveis obstáculos pelo caminho (Svestka and Overmars, 1998).

Para planejamento de caminho em espaços de configuração de baixa dimensão, métodos determinísticos são tradicionalmente utilizados, como mostra Latombe (1991) e LaValle (2006). Entretanto, para espaços de configuração de altas dimensões, é necessário o uso de elevados recursos computacionais, o que tornam impraticáveis a

aplicação desses métodos. Dessa forma, os métodos probabilísticos de planejamento, têm sido fortemente aplicados nesses problemas.

Os métodos probabilísticos de planejamento se baseiam na captura da informação do espaço de configuração a partir de amostras aleatórias, sendo assim, capazes de construir uma representação aproximada da topologia do espaço livre, o que os tornam computacionalmente viáveis (Latombe, 1991; LaValle, 2006). Dentre os diversos métodos probabilísticos de planejamento, é possível citar o Mapa de Rotas Probabilístico (*Probabilistic Roadmaps*) (Kavraki et al., 1996) e a Árvore Aleatória de Exploração Rápida (*Rapidly-Exploring Random Tree* - RRT) (Lavalle, 1998; Lavalle et al., 2000) como os mais populares.

Em Quinlan (1995) foi introduzido o conceito Bolhas do Espaço Livre. Uma bolha foi definida como uma estrutura que representa um subconjunto do espaço livre calculada a partir de informação de distância entre o robô e o conjunto de obstáculos no espaço de

trabalho. Em Silveira and Alsina (2016), bolhas foram calculadas com informação de distância do espaço de configuração e foram aplicadas no desenvolvimento do método de planejamento de caminho Espuma Probabilística (Probabilistic Foam Method - PFM), que visa representar de forma aproximada o espaço livre por meio de bolhas conectadas, formando uma estrutura chamada espuma probabilística que representa uma cobertura aproximada do espaço livre, similar aos métodos de decomposição aproximada em células convexas. A espuma se propaga pelo espaço de configuração de forma similar à propagação em frente de onda, com as bolhas formando uma árvore de busca, similar à árvore do método RRT.

Durante os últimos anos, diversos estudos foram desenvolvidos envolvendo métodos probabilísticos de planejamento aplicados em problemas robóticos de alta complexidade computacional, como na navegação de veículos autônomos (Jose Luis Blanco et al., 2015), em veículos aéreos não-tripulados (Lin and Saripalli, 2017), etc. Entre outros problemas, os métodos probabilísticos são fortemente utilizados em robôs que apresentam cadeia cinemática extensa, como em robôs bípedes (Liu and Veloso, 2008; Liu et al., 2012; Zhu et al., 2016).

No universo de robôs bípedes, existem diversos dispositivos que se enquadram em tecnologias assistivas, tais como órteses e A órtese Ortholeg (Araujo proteses ativas. et al., 2015) pode ser destacada como um protótipo de uma órtese ativa para a assistência à caminhada, projetada de acordo com o conceito de transparência, que visa, dentre outras coisas, reduzir a frequência com que o usuário interage com o dispositivo a fim A incorporação de técnicas de comandá-lo. oriundas de robótica autônoma, é fundamental para atingir este objetivo. É importante frisar que esses dispositivos requerem um maior grau de confiabilidade e segurança nos movimentos, por se tratarem de mecanismos que estão diretamente conectados à membros humanos.

A Espuma Probabilística apresenta-se como um método que atende aos requisitos de segurança para a órtese citados, pois é acapaz de obter um caminho livre de obstáculos com a propriedade de garantir uma região segura de manobrabilidade dentro do diâmetro das bolhas geradas no espaço de configuração. Desta forma, neste artigo é proposto o uso desta técnica para permitir que a órtese Ortholeg, de forma autônoma, possa planejar os movimentos para a ultrapassagem de obstáculos de forma segura.

As seções seguintes estão organizadas da seguinte maneira: a seção 2 apresenta uma contextualização sobre a robótica bípede e apresenta o estudo de caso órtese Ortholeg. A

seção 3 descreve o método Espuma Probabilística. A seção 4 apresenta a metodologia utilizada na aplicação do método PFM à órtese. Na seção 5 são apresentados os resultados preliminares desse estudo e por fim, na seção 6, são indicadas as conclusões, assim como, os trabalhos futuros.

2 O protótipo Ortholeg

Um robô bípede é composto por duas pernas dispostas de maneira simétrica, ligadas a um tronco, possuindo a capacidade de equilibrar-se e de realizar locomoção bípede, com o princípio de reproduzir de maneira realística os movimentos antropomórficos dos membros inferiores. Dentre as aplicações da robótica bípede, destacam-se as pesquisas envolvendo o uso de exoesqueletos e órteses ativas na reabilitação dos membros inferiores e na assistência à caminhada (Yang et al., 2017; Young and Ferris, 2017).

A órtese Ortholeg (Araujo et al., 2015), é um protótipo de uma órtese ativa com 4 graus de liberdade, projetada para a assistência à caminhada. A órtese apresenta quatro atuadores localizados nos quadris e joelhos, controlados sob o plano sagital. A Figura 1 apresenta uma ilustração do protótipo.





Figura 1: Órtese Ortholeg 1.0 (lado direto); Projeto melhorado da órtese, Ortholeg 2.0 (lado esquerdo). Adaptado de Roza et al., (2017).

A órtese Ortholeg 1.0 possui o peso de aproximadamente 20kg. O ângulo da articulação do joelho θ_1 pode variar entre 0° até 90° e o ângulo da articulação coxofemoral (ou quadril) θ_2 , pode variar entre -13° até 90° (Araujo et al., 2015).

3 O método Espuma Probabilística

Seja C o espaço n-dimensional de todas as possíveis configurações q que um robô pode assumir. Define-se o espaço de configuração C, um conjunto de obstáculos C_o e o espaço livre de

obstáculos é o conjunto C_f , tal que $C=C_o\cup C_f$. Uma bolha b de raio r centrada na configuração $q_c\in C_f$ é uma n-bola, cuja superfície é uma (n-1)—esfera em C_f (Silveira and Alsina, 2016), definida como:

$$b = b(q_c, r) = \{q/d(q, q_c) < r\}$$
 (1)

sendo $d(q, q_c)$ a métrica utilizada em C e r é a distância mínima entre q_c e C_o (2).

$$r = \min_{q' \in C_o} d(q', q_c) \tag{2}$$

Dessa forma, pressupõe-se que uma bolha centrada em q_c pode expandir-se partindo do seu centro até o obstáculo mais próximo.

A espuma probabilística $E \subset C_f$ é definida como uma coleção de bolhas, sendo $E = \cup b$. A espuma se propaga iterativamente no espaço livre por sucessivas gerações, onde novas bolhas são criadas na superfície das bolhas já existentes. O objetivo é encontrar uma sequencia de bolhas denominada "rosário" que vai da bolha inicial b_{init} até a bolha final b_{goal} , dentro do qual, é possível extrair um caminho, que vai da configuração inicial até a configuração final, resolvendo-se assim o problema do planejamento.

3.1 A propagação da espuma

A propagação da espuma probabilística através de C_f ocorre por meio da expansão de bolhas filhas na superfície livre de bolhas mães. Na superfície livre da bolha de determinada geração são amostradas aleatoriamente no máximo N bolhas filhas, onde

$$N = K \left(\left| \frac{r}{r_{min}} \right| \right)^{n-1} \tag{3}$$

O parâmetro r_{min} é uma constante que indica o menor raio admissível para uma bolha e está associado à capacidade da espuma se propagar. A constante K define o número máximo de bolhas filhas que as bolhas com r_{min} podem gerar.

Todas as bolhas expandidas são armazenadas em uma árvore de busca, sendo que, cada nova bolha filha é adicionada a uma fila. A propagação das novas bolhas na espuma ocorre por meio da estratégia first in, first out (FIFO), isto é, a ordem em que as bolhas filhas são criadas é a mesma ordem em que as novas bolhas mães são selecionadas. O algoritmo se comporta dessa maneira, em loop, até uma das bolhas filhas englobar a configuração q_{goal} , e assim, o algoritmo finaliza.

Por meio de uma busca descendente seguindo o grau de parentesco é possível encontrar o rosário, constituído por uma sequencia de bolhas sobrepostas, partindo da bolha final até a bolha inicial. A partir desse rosário é possível extrair um caminho factível da configuração inicial até

a configuração final. O conceito de rosário é similar ao conceito de *channel* utilizado nos métodos de planejamento de caminho baseados em decomposição de células convexas. A principal diferença entre os conceitos é que no PFM existe uma região de interseção entre duas bolhas adjacentes chamada de "Escotilha" que garante uma região segura de navegação entre as bolhas geradas.

Com base na descrição dos passos do método em Silveira and Alsina (2016), um pseudocódigo descrevendo o método Espuma Probabilística é apresentado em Algoritmo 1.

Algoritmo 1: O método Espuma Probabilística

```
Entrada: b_{init}, b_{goal}, r_{min}, K, C_o
Saída: Rosário saindo de b(q_{goal}) até b(q_{init}).
 1: E = \emptyset;
                             // Lista para a espuma
 2: F = \emptyset;
                             // Fila para as bolhas mães
 3: adiciona(E, b_{init});
 4: adiciona(F, b_{init});
 5: enquanto F \neq \emptyset faça
         b_p \leftarrow \text{primeiro\_elemento}(F);
 6:
         r_m \leftarrow \operatorname{raio}(b_p);
 7:
         N \leftarrow K(\lfloor r_m/r_{min} \rfloor)^{n-1};
 8:
         para todo i tal que 0 \le i \le N faça
 9:
10:
              q_a \leftarrow \text{amostra\_configuracao}(b_n);
              se (q_a \not\subset \text{interior\_de}(E)) então
11:
                   r_i \leftarrow \text{calcula\_raio}(q_a, C_o);
12:
                   b_i \leftarrow \text{expande\_bolha}(q_a, r_i);
13:
                   se (r_i \geq r_{min}) então
14:
                        adiciona(E, b_i \rightarrow b_p);
15:
                        adiciona(F, b_i);
16:
                        se (||b_i - q_{goal}|| \le r_i) então b_{goal} \leftarrow b_i;
17:
18:
                            obtem\_rosario(E);
19:
                            return Sucesso;
20:
                        fim se
21:
                   fim se
22:
23:
              fim se
         fim para
24:
25:
         remove_primeiro(F);
26: fim enquanto
27: return Falha;
                             // Rosário não encontrado
```

O procedimento apresentado em Algoritmo 1 descreve os passos da busca realizada pelo método partindo da definição da lista E que contém os vértices da árvore e da fila F que contém as bolhas mãe disponíveis (linhas 1 e 2). O processo de propagação da espuma inicia-se na linha 5 onde é selecionada uma bolha mãe disponível na fila F (linha 6). O raio da bolha selecionada é obtido e o número N de bolhas filhas possíveis para essa bolha mãe é calculado (linhas 7 e 8).

A função amostra_configuração q_a na superfície da bolha mãe b_p (linha 10). Na linha 11 é verificado se a configuração q_a não está contida

no interior de outras bolhas pertencentes à espuma E. Se não estiver, é calculado o raio da nova bolha e em seguida, a bolha é expandida (linhas 12 e 13). É verificado se o raio da bolha filha não é inferior ao r_{min} (linha 14). A nova bolha é adicionada à fila F e à árvore E com um ponteiro para sua bolha mãe (linhas 15 e 16). Se a nova bolha conter a configuração final (linha 17), o algoritmo obtém o rosário e retorna "sucesso" (linhas 19 e 20). Caso não haja mais bolhas mães, o algoritmo para, retornando "falha".

É possível perceber que o algoritmo calcula as bolhas com base no conjunto de obstáculos no espaço de configuração. Em problemas com elevadas dimensões, o cálculo da bolha b torna-se computacionalmente ineficiente do ponto de vista prático, já que é necessário que o conjunto C_o seja computado de forma explícita para que a distância ao obstáculo mais próximo seja calculada. Nesse contexto, a seção seguinte apresenta uma estratégia para computar as bolhas de forma que o método Espuma Probabilística seja aplicável à problemas robóticos com dimensões elevadas.

4 Aplicação do PFM na Órtese Ortholeg

4.1 Definição nova da bolha

Em Quinlan (1995), foi introduzido o conceito de "bolhas do espaço livre" (bubbles of free space), onde é computada uma região livre de obstáculos dada uma configuração do robô q_c com juntas rotacionais e uma informação de distância no espaço de trabalho. Uma bolha $B(q_c)$ centrada na configuração q_c é computada com base na menor distancia d_t entre o robô e o conjunto de obstáculos no espaço de trabalho. Conforme Quinlan (1995), para um robô manipulador com n juntas rotacionais, uma bolha $B(q_c)$ é definida como:

$$B(q_c) = \left\{ q : \sum_{i=1}^n r_i | q_i - q_{c_i} | \leqslant d_t \right\}$$
 (4)

 r_i é definido como o raio mínimo do cilindro centrado no eixo da junta i que contém todos os elos subsequentes do manipulador, como ilustra a Figura 2.

A expressão $\sum_{i=1}^n r_i |q_i - q_{ci}|$ é um limite superior conservativo para o movimento do robô a partir da configuração q_c até q. Desta forma, para qualquer movimento a partir de q_c até qualquer ponto dentro da bolha, é garantido que nenhum ponto da cadeia cinemática se moverá mais que d_t . Sendo assim, nenhuma colisão irá ocorrer. Considerando a Equação 4, a bolha B resultante no espaço de configuração será um hiperoctaedro (n-diamante).

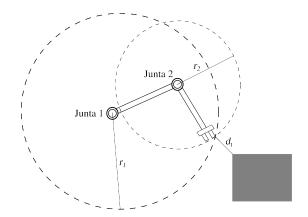


Figura 2: Um cilindro i, com raio r_i que é coaxial com a junta i, cobre todos os elos da i-ésima junta, até a ferramenta do manipulador. d_t é a menor distância entre robô e os obstáculos no espaço de trabalho.

A região que limita a bolha B é ilustrada na Figura 3, para o caso bidimensional.

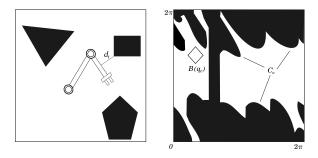


Figura 3: Robô manipulador no espaço de trabalho (lado esquerdo); Bolha B no espaço de configuração correspondente à configuração do robô no espaço de trabalho (lado direito), adaptado de Quinlan (1995).

Para garantir que o método Espuma Probabilística possa incorporar as bolhas modeladas em Quinlan (1995) para robôs que apresentam cadeia cinemática, foi definida uma (n-1)-esfera inscrita na bolha $B(q_c)$ e centralizada na configuração q_c .

4.2 Aplicação da nova bolha ao planejamento da órtese Ortholeg

Para o caso da órtese Ortholeg que possui cadeia cinemática uma comjuntas rotacionais, o planejamento em tempo real das juntas, juntamente com o movimento horizontal do quadril, ainda pode ser custoso computacionalmente. Dessa forma, procedimento de simplificação do problema foi realizado: Pressupondo que o quadril se desloca a uma altura constante, foi proposto o planejamento o movimento da perna em balanço considerando como variável de configuração o deslocamento horizontal do quadril, o ângulo do

quadril e o ângulo do joelho. Dessa maneira, com o movimento horizontal do quadril definido previamente, ao planejar o movimento da perna de balanço, as variáveis de junta da perna de apoio são automaticamente determinadas através do cálculo da cinemática inversa.

Considerando que os valores dos ângulos do quadril e joelho são expressas em radiano e o deslocamento horizontal do quadril é medido em metros, foi realizada uma normalização das variáveis de configuração, onde considerou-se que o deslocamento horizontal do quadril possui um valor angular correspondente em radiano, como mostra a equação (5):

$$\theta_q = \frac{d_q \cdot 2\pi}{S_{total}} \tag{5}$$

Foi definido que deslocamento horizontal do quadril d_q parte de $d_q=0$ metros, até $d_q=S_{total}$, deslocamento total durante o processo de ultrapassagem do obstáculo. Através de uma relação direta para radiano, foi definido que o deslocamento d_q varia entre $\theta_q=0$ rad até $\theta_q=2\pi$ rad. Nesse contexto, foi proposto o seguinte cenário para o planejamento da ultrapassagem de obstáculos para a órtese: Para a ultrapassagem da primeira perna, o quadril se desloca horizontalmente $\theta_q=0$ rad até $\theta_q=\pi$ rad. Na ultrapassagem da segunda perna, quadril se desloca $\theta_q=\pi$ rad até $\theta_q=2\pi$ rad. A Figura 4 apresenta o cenário proposto no plano sagital.

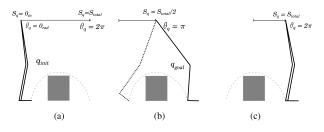


Figura 4: Modelo proposto para o planejamento da ultrapassagem do obstáculo.

A Figura 4(a) apresenta a configuração inicial. Através do método de planejamento de caminho empregado, será obtido um caminho factível, sendo possível ultrapassar o obstáculo sem colidir. Dessa maneira, a trajetória é realizada pela primeira perna, chegando à posição final, Figura 4(b). Supondo que o obstáculo seja um prisma retangular e que as pernas estejam sobre uma superfície regular, após a obtenção do caminho referente à ultrapassagem, é possível calcular a cinemática inversa da órtese ativa (Roza et al., 2017) para a segunda perna, obtendo-se novos os ângulos e a posição do quadril, e com isso, a possibilidade de realizar o movimento da segunda perna, Figura 4(c).

Com base nas equações (4) e (5), é possível calcular $B(q_c)$ para uma determinada

configuração da perna em balanço da órtese. Considere que durante o movimento da perna de balanço, o quadril realiza um deslocamento partindo de d_q até uma posição arbitrária d_q' , ou seja, de θ_q até θ_q' . Dessa forma, o deslocamento é dado por:

$$d_{quadril}(\theta_q, \theta_q') = \frac{S_{total}}{2\pi} \left| \theta_q - \theta_q' \right|$$
 (6)

A expressão já conhecida que define o limite superior conservativo para o movimento das juntas, pode ser observada em (7):

$$d_{juntas}(q, q_c) = \sum_{i=1}^{n} r_i |q_i - q_{c_i}|$$
 (7)

A bolha $B(q_c)$ que representa o limite superior conservativo para o movimento total da perna em balanço, é definido como:

$$B(q_c) = \{q : d_{quadril} + d_{juntas} \leqslant d_t\}$$
 (8)

Considerando as variáveis de configuração as duas juntas da perna e o deslocamento do quadril, $B(q_c)$ será um hiperoctaedro tridimensional. Dessa forma, é possível calcular uma nova bolha $B'(q_c)$ inscrita em $B(q_c)$, sendo uma 2-esfera centrada em q_c , a qual contempla informações das duas juntas e do deslocamento do quadril. A nova região $B'(q_c)$ é ilustrada na Figura 5.

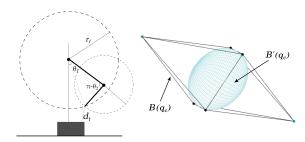


Figura 5: Definição da região livre de obstáculos no espaço de trabalho (esquerda); Bolha $B'(q_c)$ inscrita na região $B(q_c)$ (direita).

Finalmente, com a informação da distância entre o robô e os obstáculos no espaço de trabalho, é possível ter acesso ao raio da nova bolha $B'(q_c)$, o que equivale à função calcula_raio $(q_c, obstáculos)$ do Algoritmo 1, tornando o PFM apto a trabalhar com robôs com cadeia cinemática, e aplicável à órtese ativa Ortholeg.

5 Resultados

Para testar a metodologia apresentada, foi criado um cenário simples (similar ao ilustrado na Figura 4) a fim de simular o planejamento da transposição de um obstáculo pela órtese Ortholeg por meio do método PFM.

Foram definidas as dimensões do obstáculo $(0,2 \mathrm{\ m}; 0,5 \mathrm{\ m}; 0,1 \mathrm{\ m})$ e as posições q_{init} $(0,2618 \mathrm{\ rad}; 0,4363 \mathrm{\ rad}; 0 \mathrm{\ rad})$ e q_{goal} $(0,4863 \mathrm{\ rad}; 0,4536 \mathrm{\ rad}; 3,1416 \mathrm{\ rad})$, representando o ângulo da articulação do quadril, o ângulo da articulação do joelho e posição do quadril da perna de balanço, respectivamente, como pode ser observado em Figura 6.

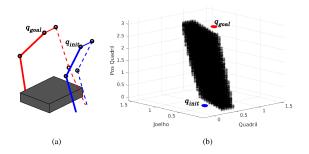


Figura 6: (a) Posições inicial e final do robô no espaço de trabalho. (b) Mesmas posições no espaço de configuração para a perna de balanço.

Como ilustrado na Figura 6(a), é possível observar as configurações inicial e final no espaço de trabalho. Os valores indicados no vetor q_{init} e q_{goal} são referentes à perna de balanço, uma vez que a perna de apoio é modificada através da própria cinemática inversa. A Figura 6(b) apresenta as configurações inicial e final e o obstáculo para o mesmo cenário, representados no espaço de configuração (espaço de juntas).

Para a simulação com o cenário apresentado, foram definidos os parâmetros K=12 e $r_{min}=0.025$ com base em experimentos realizados. A Figura 7 apresenta a espuma probabilística gerada por meio da simulação com o PFM.

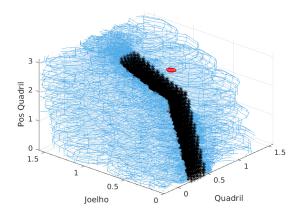


Figura 7: Espuma Probabilística gerada.

A espuma se propagou pelo espaço livre até uma bolha cobrir a configuração q_{qoal} . A espuma

gerada apresentou 1957 bolhas. Em Figura 8 pode ser observado o rosário obtido, assim como o caminho gerado.

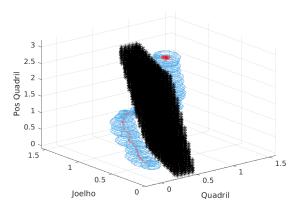


Figura 8: Rosário obtido por meio da simulação com Espuma Probabilística

Por meio do rosário extraído da espuma probabilística, foi possível obter um caminho factível através da ligação dos pontos localizados no centro das bolhas. A trajetória da perna de balanço do robô para o caminho obtido pode ser observada na Figura 9.

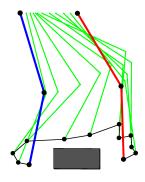


Figura 9: Frames da trajetória no plano sagital, obtida através da simulação.

Como foi mostrado em Figura 9, para o cenário apresentado o método foi capaz de planejar o movimento do robô bípede a fim de ultrapassar o obstáculo por meio de um caminho livre de obstáculos. O movimento a ser realizado pela segunda perna é idêntico ao apresentado na Figura 9, pois o caminho obtido é o mesmo, considerando o cenário apresentado, ou seja, obstáculos e superfície do chão regulares.

Um ponto a ser observado é que o caminho extraído não foi suavizado. Entretanto, vale ressaltar que cada bolha representa um conjunto de configurações livres de obstáculos. Sendo assim, técnicas de suavização de caminho (path smoothing) podem ser facilmente aplicadas às bolhas do rosário, considerando essa região garantida de manobrabilidade segura.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou a aplicação do método de planejamento de caminho Espuma Probabilística no planejamento de uma ultrapassagem de obstáculo por um robô bípede, representado pela órtese ativa Ortholeg. Por meio de simulações, foi possível obter um caminho factível para o cenário apresentado.

Os resultados preliminares apresentados mostram que, para o cenário proposto e condições apresentadas, o método é capaz de obter caminhos livres de obstáculos, entretanto, não é garantida uma trajetória suave. Dessa maneira faz-se necessário a aplicação de técnicas de suavização para a trajetória a ser realizada se aproximar de movimentos antropomórficos. A utilização do método Espuma Probabilística apresenta-se como uma estratégia interessante, pois a bolha representa uma região que comporta um conjunto de configurações livres, e dessa maneira, estratégias de suavização do caminho podem ser facilmente aplicadas.

A estratégia de planejar o movimento de uma das pernas apresentou-se como uma alternativa ao planejamento de caminho considerando toda cadeia cinemática do robô bípede. Assim, o problema foi reduzido a 3 dimensões, diminuindo a carga computacional da busca.

É importante afirmar que os resultados obtidos são aplicáveis apenas ao cenário proposto. Se forem considerados obstáculos irregulares ou se as pernas estiverem dispostas sobre uma superfície irregular, a trajetória obtida para uma das pernas não se aplicará à outra. Dessa forma, seria necessário um planejamento multi-objetivo, iniciando para a primeira perna, e depois, planejar o caminho para a segunda perna.

Espera-se como trabalhos futuros melhorar a estratégia, a fim de considerar obstáculos irregulares. Almeja-se também computar bolhas considerando as restrições de juntas apresentadas pela órtese. Um outro estudo a ser desenvolvido futuramente é na a obtenção de caminhos mais suaves, para que o robô possa realizar movimentos que se aproximem ao máximo de movimentos antropomórficos, e finalmente, considerar a trajetória real do quadril, para que seja possível realizar experimentos fora do ambiente de simulação.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da CAPES no desenvolvimento deste trabalho, através da concessão de bolsa de pesquisa.

Referências

- Araujo, M. V., Alsina, P. J., Roza, V. C. C. and Melo, N. B. (2015). Powered orthosis ortholeg: Design and development, *IEEE Latin America Transactions* **13**(1): 90–95.
- Imen Chaari, Anis Koubaa, Hachemi Bennaceur, Adel Ammar, Maram Alajlan Habib Youssef (2017).Design and global performance analysis of path planning techniques for autonomous mobile robots in grid environments, International Journal of Advanced Robotic Systems **14**(2): 1729881416663663.
- Jose Luis Blanco, Mauro Bellone and Antonio Gimenez-Fernandez (2015). TP-Space RRT – Kinematic Path Planning of Non-Holonomic Any-Shape Vehicles, *International Journal of Advanced Robotic Systems* **12**(5): 55.
- Kavraki, L., Svestka, P., Latombe, J.-C. and Overmars, M. (1996). Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12(4): 566–580.
- Latombe, J.-C. (1991). Robot Motion Planning, Springer US, Boston, MA.
- Lavalle, S. M. (1998). Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning.
- LaValle, S. M. (2006). *Planning Algorithms*, Cambridge University Press, Cambridge; New York. OCLC: ocm65301992.
- Lavalle, S. M., Kuffner, J. J. and Jr. (2000). Rapidly-Exploring Random Trees: Progress and Prospects, Algorithmic and Computational Robotics: New Directions, pp. 293–308.
- Lin, Y. and Saripalli, S. (2017). Sampling-Based Path Planning for UAV Collision Avoidance, *IEEE Transactions on Intelligent* Transportation Systems **18**(11): 3179–3192.
- Liu, H., Sun, Q. and Zhang, T. (2012). Hierarchical rrt for humanoid robot footstep planning with multiple constraints in complex environments, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, pp. 3187–3194.
- Liu, J. and Veloso, M. (2008). Online zmp sampling search for biped walking planning, Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, pp. 185–190.

- Quinlan, S. (1995). Real-Time Modification of Collision-Free Paths, Doctoral dissertation, Stanford University Stanford, CA.
- Roza, V. C., Eugenio, K. J., Morais, V. G., Alsina, P. J. and de Araújo, M. V. (2017). Development of a kinematic model based on bezier curves for improvement of safe trajectories in active orthosis walking tasks, In: Workshop on Behavior Adaptation, Interaction and Learning for Assistive Robotics (BAILAR), in the IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN).
- Silveira, Y. S. and Alsina, P. J. (2016). A New Robot Path Planning Method Based on Probabilistic Foam, 2016 XIII Latin American Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR), pp. 217–222.
- Svestka, P. and Overmars, M. H. (1998).
 Probabilistic Path Planning, in M. Thoma (ed.), Robot Motion Planning and Control,
 Vol. 229 of Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 255–304.
- Yang, X., She, H., Lu, H., Fukuda, T. and Shen, Y. (2017). State of the art: Bipedal robots for lower limb rehabilitation, Applied Sciences 7(11): 1182.
- Young, A. J. and Ferris, D. P. (2017). State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons, *IEEE Transactions* on *Neural Systems and Rehabilitation* Engineering 25(2): 171–182.
- Zhu, H., Guan, Y., Chen, S., Su, M. and Zhang, H. (2016). Single-step collision-free trajectory planning of biped climbing robots in spatial trusses, *Robotics and biomimetics* **3**(1): 1.