

PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIAS COM B-SPLINE CÚBICA PARA ROBÔS MÓVEIS

Werley Rocherter Borges Ferreira; Larissa Rocha Pereira; João Carlos Mendes Carvalho.

1. Introdução

Robótica é o campo da engenharia de projeto, construção e aplicação de sistemas de controle automático que desempenham tarefas como manipulação e locomoção, (IONESCU, 2003). Robôs que desempenham tarefas de locomoção são denominados de robôs móveis e podem ser utilizados em diversas aplicações tais como: exploração do ambiente, segurança, entretenimento e trabalhos domésticos.

O robô explorador tem como objetivo obter informações de um lugar desconhecido. Um exemplo desse tipo de robô é o *Mars Rovers*, criado pela NASA com o objetivo de explorar o planeta Marte. O mesmo possui um sistema de navegação por câmeras que permite o desvio de obstáculos em tempo real, Fig. 1.

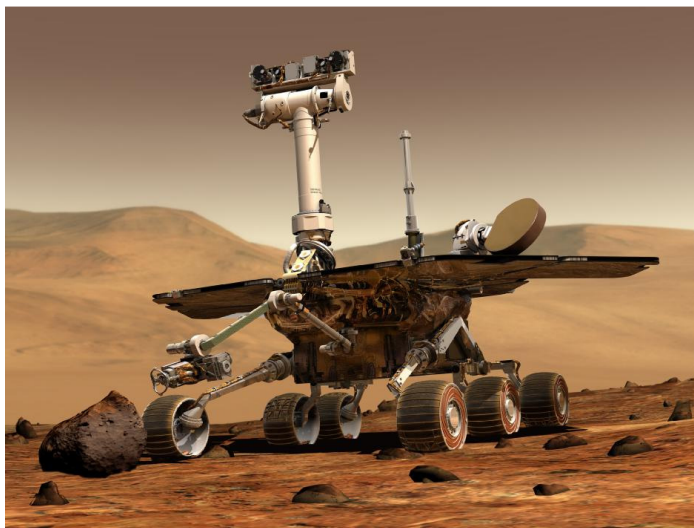


Figura 1: Robô explorador Mars Rovers. Disponível em:

<http://www.nasa.gov/mission_pages/mer/multimedia/gallery/pia04413.html>. Acessado em: 3 de Nov. 2011.

Na área de segurança existem vários tipos de robôs, como o *Predator*, que é um UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) criado pela *General Atomics* para a Força Aérea dos Estados Unidos para missões de reconhecimento e batalha. Este sistema é comandado por controle remoto, o que preserva a vida do piloto em ambientes hostis. O *Predator* também pode seguir uma trajetória específica de forma autônoma em missões de reconhecimento Fig. 2.



Figura 2: UAV *Predator*. Disponível em: <http://defense-update.com/newscast/0307/news/160307_mq9.htm>. Acessado em: 3 de Nov. 2011.

Outro exemplo é o robô anti-bomba, que é uma ferramenta de grande importância no desarmamento de bombas, uma vez que esse tipo de atividade coloca a vida do operador em risco. Este tipo de robô é comandado por controle remoto para mover a bomba e desativá-la, Fig. 3.



Figure 3: Robô anti-bomba. Disponível em: <<http://info.abril.com.br/noticias/ti/pf-apresenta-robo-antibomba-para-copa-02082010-35.shl>>. Acessado em: 3 de Nov. 2011.

Alguns robôs móveis, como o Roomba, auxiliam em tarefas domésticas, retirando partículas de sujeira do chão. O Roomba é um tipo de robô autônomo que desvia de obstáculos do ambiente durante o processo de limpeza, Fig. 4.



Figura 4: Roomba, robô para limpeza. Disponível em: <<http://www.irobot.com/>>. Acessado em: 3 de Nov. 2011.

Os robôs móveis podem ser comandados por controle remoto ou serem autônomos. Um robô autônomo significa que, para a sua locomoção de um ponto para outro, o robô consegue desviar de obstáculos e se localizar sem a intervenção humana. Para isso o robô deve possuir sensores que identificam obstáculos e sensores de localização.

De acordo com (BORENSTEIN et al., 1997) as categorias mais comuns para sistema de posicionamento de robôs móveis são:

Navegação inercial: utiliza giroscópios e acelerômetros para medir a velocidade de rotação e aceleração respectivamente. Estes sistemas possuem a vantagem de serem auto-suficientes, ou seja, não precisam de referências externas. Entretanto sensores inerciais são inadequados para posicionamento preciso por um período de tempo prolongado.

Bússolas: são extremamente importantes para resolver as necessidades de navegação autônoma. Esses sensores fornecem uma medida de posição absoluta, porém possuem a desvantagem porque o campo magnético da Terra é muitas vezes distorcido perto de linhas de energias ou de estruturas de materiais ferro magnéticos.

Sistema de posicionamento global: o sistema é composto por satélites que transmitem sinais RF (rádio frequência) que são utilizados para o método da triangulação, o qual permite o cálculo de latitude, longitude e altitude.

Marcos de navegação: em geral tem posições físicas conhecidas para a localização do robô e são cuidadosamente escolhidos por serem fáceis de identificar. Antes do robô utilizar marcos, os mesmos devem ser conhecidos e armazenados em sua memória.

Modelo correspondente: é uma técnica na qual o robô utiliza seus sensores para criar um mapa do seu ambiente local.

Para que um robô autônomo navegue pelo ambiente, além dos sensores de identificação de obstáculos e de posicionamento, é preciso ter uma referência de trajetória a ser seguida. Geralmente a referência é obtida por meio de uma curva que interpola pontos de controle que definem a trajetória.

Em (CHAUDHRY; GULREZ; ZIA, 2010) é apresentada uma metodologia com curvas de Bézier para o planejamento de trajetórias de robô móveis autônomos com rodas. Nesse trabalho o robô deve chegar ao destino sem ter um caminho prévio definido. Para isso, o robô utiliza um sistema de varredura a laser que identifica obstáculos. A partir dos obstáculos identificados, o algoritmo de navegação cria os próximos quatro melhores pontos para que o próximo segmento da trajetória seja seguido.

(OKAWA; NONAKA, 2010) utilizam interpolação cúbica por partes para o planejamento de trajetória de robôs móveis. Os coeficientes das polinomiais são obtidos por um algoritmo de otimização o qual busca o valor mínimo de coeficientes que multiplica o termo cúbico e quadrático do polinômio. Segundo os autores esse processo garante uma curva suave.

As splines também são muito aplicadas em planejamento de trajetórias, tanto que (EREN; FUNG; EVANS, 1999) utilizam spline cúbica para gerar trajetórias de robôs. Apesar da spline cúbica possuir a suavidade necessária para uma trajetória robótica, este tipo de curva não é

adequada para ser utilizada em trajetórias com a presença de obstáculos móveis, visto que com a alteração de um ponto de controle, toda curva se altera.

No planejamento de trajetórias de robôs é desejável uma curva suave e de comportamento previsível, isto é, dados os pontos de controle, deve ser possível prever intuitivamente a possível região que a curva passará. Curvas B-spline possuem essas características, além disso, este tipo de curva implementa o controle local, ou seja, com a alteração de um ponto de controle, somente uma região da curva se altera. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar o planejamento de trajetórias de robôs móveis para o desvio de obstáculos fixos e móveis utilizando B-spline cúbica.

2. Desvio de Obstáculos

O problema do desvio de obstáculos em robótica pode ser dividido em três etapas: o mapeamento do ambiente, a determinação da distância entre o manipulador e os demais objetos do ambiente, e a decisão de como movimentar o robô de forma a evitar da melhor forma possível o contato com os outros objetos (SANTOS, 2007).

O planejamento de trajetória nestes casos pode considerar a presença de obstáculos fixos ou móveis. Dentre os obstáculos móveis, aqueles que têm o percurso previamente conhecido em todos instantes de tempo, juntamente com aqueles que são fixos, permitem a análise preliminar do movimento do robô antes de sua efetiva realização (SARAMAGO e STEFFEN, 2001).

Em robótica móvel é comum utilizar um robô para seguir determinada trajetória para reconhecimento de território ou simplesmente locomoção de um ponto a outro. A forma mais simples é planejar a trajetória *off-line*, na qual o desvio de obstáculos fixos já foi considerado. No entanto, pode ocorrer o surgimento de um obstáculo inesperado no trajeto. Dessa forma o robô deve tomar a decisão de alterar a trajetória na região em que o obstáculo se encontra.

3. B-spline

Autores como (PIEGL; TILLER, 1997), (DE BOOR, 2000) e (ROGERS, 2001) definem a B-spline como uma versão da spline que implementa o controle local da curva, de forma que a alteração de um ponto de controle modificará a curva somente na região dos pontos vizinhos mais próximos, em função da ordem de continuidade, como mostrado na Fig. 5. Ao contrário da spline, que a alteração de um ponto de controle pode modificar o formato de toda a curva, como mostrado na Fig. 6.

A região da curva modificada pela mudança da curva está compreendida entre $(p+1)/2$ segmentos anteriores ao ponto modificado e $(p+1)/2$ segmentos posteriores, onde p é o grau da curva. Como a curva apresentada pela Fig. 5 é quadrática, a mudança ocorrerá entre os segmentos definido por P_2 a P_6 .

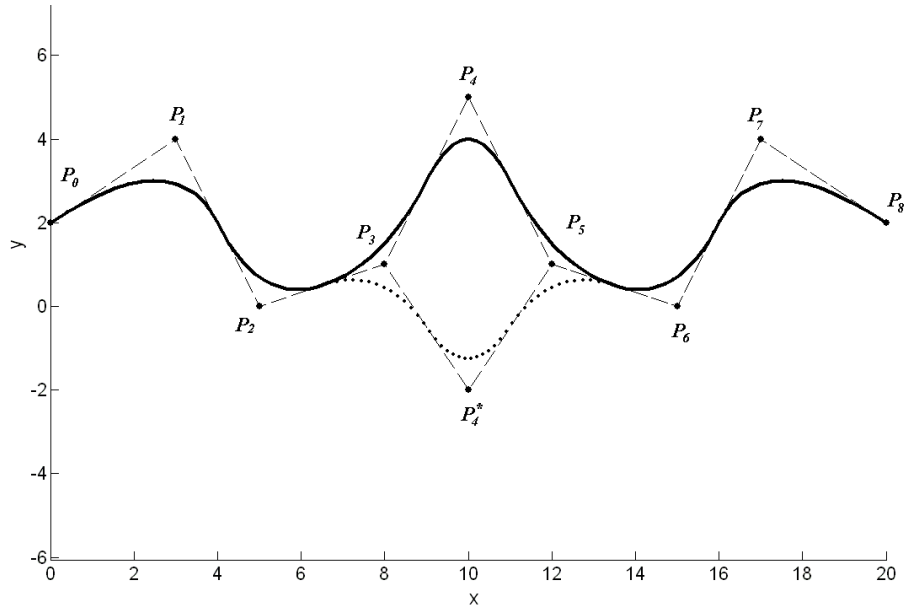


Figura 5: B-spline quadrática. A linha contínua mostra a curva original, a linha pontilhada representa a curva com a mudança do ponto P_4 .

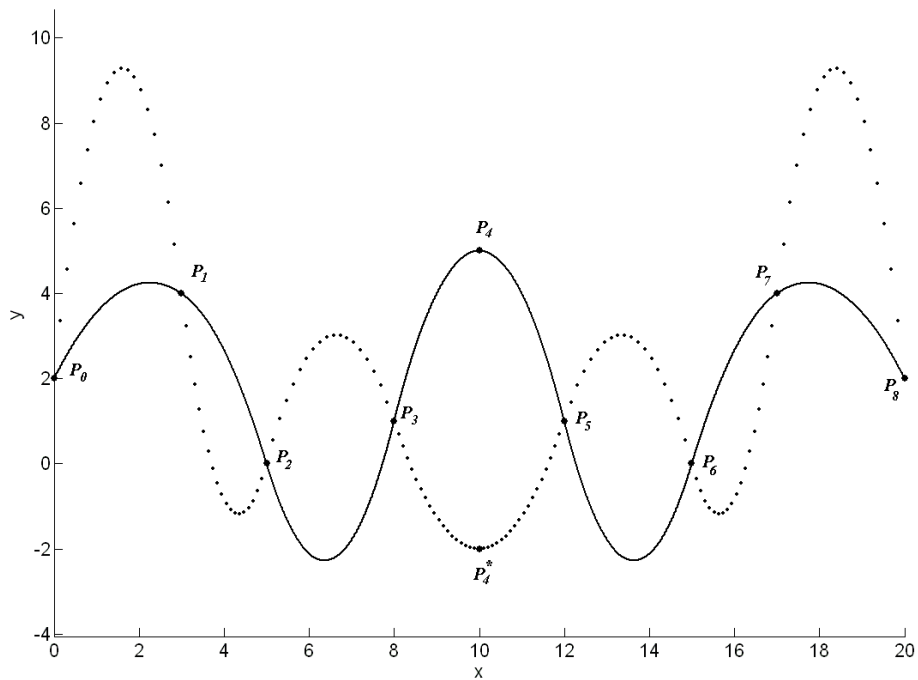


Figura 6: Spline quadrática. A linha contínua mostra a curva original, a linha pontilhada representa a curva com a mudança do ponto P_4 .

A função B-spline é um ajustador de aproximação pois a curva gerada não passa necessariamente pelos pontos de controle, diferentemente da spline que realiza a interpolação dos pontos dados.

Curvas B-splines utilizam o mesmo conceito de curva de ponderação para a mistura dos pontos de controle, isto é, a curva é obtida pelo somatório das funções de base não nulas que são multiplicadas pelos pontos de controle, Eq. 1.

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)P_i \quad a \leq u \leq b \quad (1)$$

Onde P_i ($i = 0, \dots, n$) são os pontos de controle e $N_{i,p}(u)$ as funções de base de grau p .

Existem vários métodos para definir as funções de base da B-spline, porém o utilizado neste trabalho é o método de recorrência de Cox-deBoor, visto que ele é muito útil para implementação computacional. Como mostrado em (PIEGL; TILLER, 1997), seja $U=\{u_0, \dots, u_m\}$ uma seqüência de números reais não decrescente, i.e., $u_i \leq u_{i+1}$, ($i = 0, 1, \dots, m-1$). Os u_i são denominados nós, e U o vetor dos nós. A i -ésima função de base B-spline de grau p (ordem $p+1$), denotada por $N_{i,p}(u)$, é definida como:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{se } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+p}-u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1}-u}{u_{i+p+1}-u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (3)$$

4. Planejamento de Trajetórias com B-spline

Em planejamento de trajetória de robôs móveis autônomos, deve-se prever o desvio de obstáculos, sejam eles fixos ou móveis. O robô deve possuir sensores que permitam identificar obstáculos e um sistema de controle que deve tomar a decisão de efetuar o desvio, isto é, recalculando a trajetória de tal forma que a mudança ocorra somente na região do obstáculo.

Na simulação proposta, alguns pontos são escolhidos como marcos de navegação para que o robô siga uma trajetória na presença dos obstáculos O_1 à O_7 , como mostrado na Fig. 7. Os marcos de navegação são os pontos de controle para o cálculo da B-spline cúbica, que é a referência de trajetória que o robô deve seguir para desviar dos obstáculos.

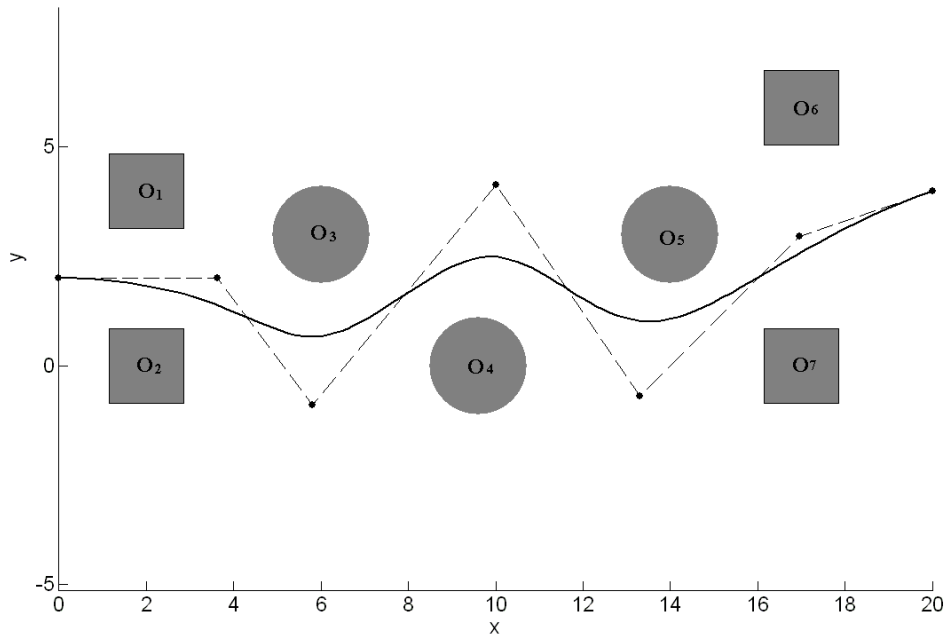


Figura 7: Trajetória definida por B-spline cúbica com obstáculos fixos.

O planejamento de trajetória por marcos de navegação é adequado onde os obstáculos são fixos. Porém ele pode ser associado com a metodologia do modelo correspondente, de tal forma que o robô identifica o obstáculo e modifica o próximo marco de navegação para que esse obstáculo seja contornado. Na Figura 8 o obstáculo O_5 move e permanece sobre a trajetória definida pelos marcos de navegação.

Para que ocorra o desvio, o robô deve identificar o obstáculo antes da região de modificação da curva, causada pela alteração do marco de navegação mais próximo a ele.

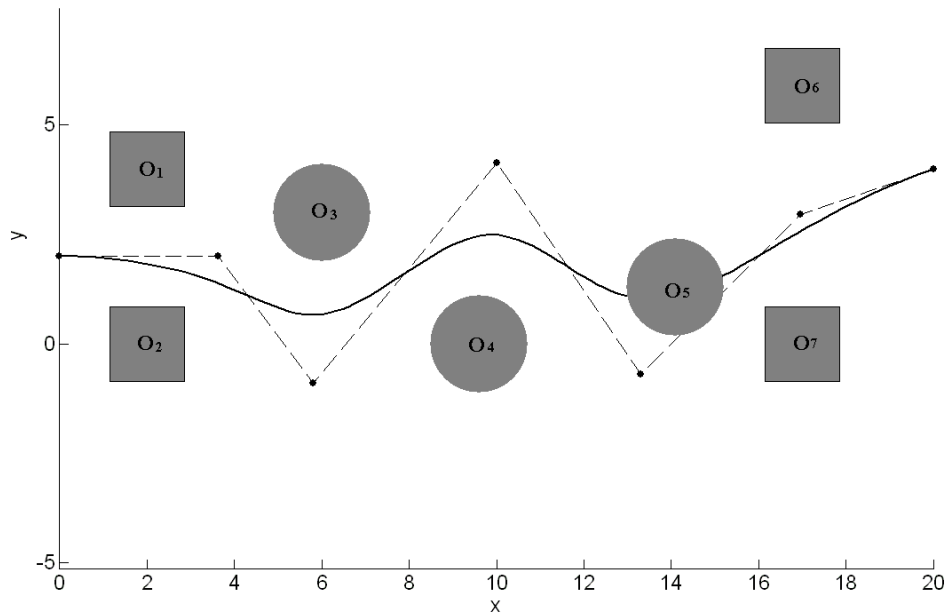


Figura 8: Trajetória obstruída pelo obstáculo O_5 .

A partir do momento em que o obstáculo é identificado, o robô altera o marco de navegação e recalcula a trajetória a ser seguida como mostrado na Fig. 9.

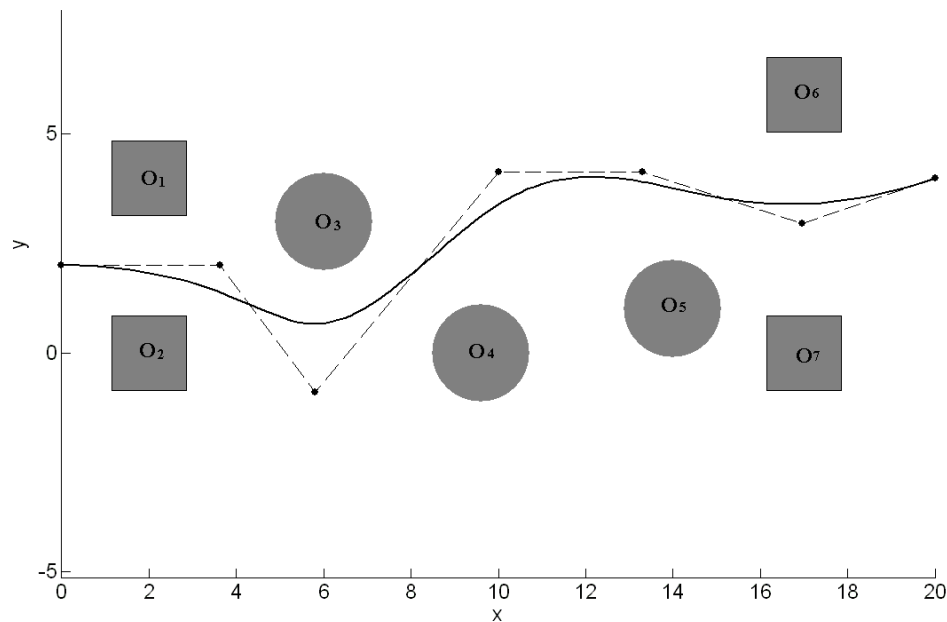


Figura 9: Trajetória recalculada.

5. Conclusão

No planejamento de trajetórias por marcos de navegação os pontos iniciais que definem o percurso devem ser conhecidos, isto é, o mapeamento do ambiente deve ser realizado a priori. A partir dos pontos conhecidos, uma curva de referência deve ser calculada para que o robô chegue ao seu destino e evite os obstáculos ao longo do percurso.

Com o deslocamento de algum obstáculo, a metodologia do modelo correspondente deve ser aplicada para que um novo marco de navegação seja criado, a fim de evitar a colisão. Para isso, a escolha da metodologia de ajuste de curva (interpolação ou aproximação) é importante

porque a referência de trajetória não deve sofrer grandes modificações com alteração de um ponto de controle.

Devido ao grau de suavidade, previsibilidade e características de controle local, a B-spline é uma boa alternativa para o planejamento de trajetórias robóticas na presença de obstáculos, uma vez que com a mesma é possível prever o comportamento da curva com a mudança do marco de navegação e, com a alteração de um ponto a trajetória não é alterada por completo, ao contrário da spline, que não possui essas características.

6. REFERÊNCIAS

- BORENSTEIN, J.; EVERETT, H. R.; FENG, L.; WEHE, D.; **Mobile Robot Positioning – Sensors and Techniques**. Journal of Robotic Systems. v.14, n. 4, p. 231 – 239, nov. 1997.
- CHAUDHRY, T.; GULREZ, T.; ZIA, A.; **Bézier Curve based Dynamic Obstacle Avoidance and Trajectory Learning for Autonomous Mobile Robots**. Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 10th International Conference on. P. 1059-1065. Cairo, 2011.
- DE BOOR, C. **A Pratical Guide to Spline**. 1. ed. N.Y: Springer, 2000. 241 p.
- EREN, H.; FUNG, C. C.; EVANS, J.; **Implementation of the Spline Method for Mobile Robot Path Control**. Instrumentation and Measurement Technology Conference. V.2, p. 739 – 744, Venice, Italy, 1999.
- OKAWA, I.; NONAKA, K.; **Optimal Online Generation of Obstacle Avoidance Trajectory running on a Low Speed Embedded CPU for Vehicles**. Multi-Conference on Systems and Control, Yokohama, Japan, set., 2010.
- PIEGL, L.; TILLER, W., **The NURBS Book**. 2. ed. N.Y: Springer, 1997. 641 p.
- ROGERS, D. F., **An Introduction to NURBS: With Historical Perspective**. 1. ed. San Diego: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 309 p.
- SANTOS, R. R. **Contribuição ao Planejamento de Trajetórias de Robôs através de Elementos de Dinâmica, Controle e Otimização**. 2007. 165 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- SARAMAGO, S. F. P.; STEFFEN, V., Jr.; **Trajectory Modeling of Robot Manipulators in the Presence of Obstacles**. Journal of Optimization Theory and Applications. V. 110. n. 1, p. 17 – 34. Jul. 2001.
- SHUMAKER, L. L., **Spline Functions: Basic Theory**. 3. Ed. Cambridge, 2007. 582.
- T.G. IONESCU; **Terminology for the Mechanism and Machine Science**. Mechanism and Machine Theory. V. 38. P. 597-605, 2003.