



MOVIMENTAÇÃO DE ROBÔS EM AMBIENTES COM OBSTÁCULOS

Rogério Rodrigues dos Santos

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia/MG
rrsantos@mecanica.ufu.br

Sezimaria de Fátima Pereira Saramago

Faculdade de Matemática, Universidade Federal de Uberlândia
saramago@ufu.br

Valder Steffen Jr.

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
vsteffen@mecanica.ufu.br

Resumo: Robôs manipuladores são dispositivos programáveis projetados para executar uma grande variedade de tarefas de forma repetitiva. Sua concepção prevê versatilidade para que possam se adequar a diversas situações. Em alguns casos a utilização eficiente do robô pode ser comprometida pela existência de obstáculos em seu ambiente de trabalho. Considerando a presença de obstáculos que restrinjam o movimento do robô, propõe-se uma estratégia de movimentação livre de colisões, tanto por parte do efetuator (end-effector) como pelos demais elementos (links), atendendo a especificações de posicionamento inicial e final previamente definidos. Os resultados computacionais demonstram a aplicabilidade e eficiência da metodologia proposta.

Palavras-chave: Robô manipulador, planejamento de trajetória.

1. INTRODUÇÃO

Robótica é uma área de pesquisa relativamente recente da tecnologia moderna que percorre as fronteiras da engenharia tradicional. O entendimento da complexidade dos robôs e de suas aplicações requer o conhecimento de vários ramos da engenharia, computação e matemática.

Uma definição oficial de robô é dada pelo Instituto de Robôs da América (Robot Institute of América – RIA): “Robô é um manipulador multifuncional reprogramável projetado para mover material, partes, ferramentas ou dispositivos especializados, através de diversos movimentos programados, para a execução de uma variedade de tarefas”.

O elemento chave na definição acima é a possibilidade de reprogramação dos robôs. O sistema de controle computacional propõe ao robô versatilidade e adaptabilidade.

Dentre todos os sistemas mecânicos robóticos, os manipuladores seriais têm merecido atenção especial devido a sua grande relevância na indústria. Além disso, eles constituem o mais simples dentre todos os sistemas mecânicos robóticos e, conseqüentemente, surgem como elementos de outros sistemas mais complexos.

Um manipulador, em geral, é um sistema mecânico que tem o propósito de apreender e mover objetos. A idéia básica por trás deste conceito é que as mãos são, dentre todos os demais órgãos que o cérebro humano pode controlar mecanicamente, os que podem ser controlados com maior precisão.

Assim, um robô manipulador é um dispositivo que auxilia o homem na execução de tarefas de manipulação em geral.

As tarefas de manipulação remetem ao conceito de espaço de trabalho e trajetória.

O espaço de trabalho é o volume total alcançado pelo efetuador quando o manipulador executa todos os movimentos possíveis. Ele é influenciado pelo número de juntas que definem o número de graus de liberdade (*degrees of freedom* – DOF) do manipulador. Tipicamente utilizam-se seis graus de liberdade para caracterizar o espaço tridimensional: três para posicionamento e três para orientação. Neste caso, com menos de seis graus de liberdade a estrutura não pode atingir todo e qualquer ponto do ambiente de trabalho com orientação arbitrária. Um manipulador que contém mais de seis graus de liberdade é dito cinematicamente redundante (Spong, 1989).

A trajetória é a responsável por especificar uma sequência de movimentos necessários para o robô realizar determinada tarefa.

O movimento deve ser, em geral, o mais suave possível. É desejável que mudanças bruscas na posição, velocidade e aceleração sejam evitadas. De fato, movimentos bruscos requerem uma grande quantidade de energia para sua execução, que pode não ser fornecida pelo motor devido a suas limitações físicas. Além disso, movimentos bruscos surgem quando o robô colide com outros objetos, uma situação que também deve ser evitada (Craig, 1989).

Para que se aproveite o potencial oferecido pelo robô, é desejável que o planejamento da trajetória resulte em um movimento suave e considere a presença de obstáculos em seu espaço de trabalho.

Neste trabalho propõe-se uma estratégia de movimentação livre de colisões. A posição do efetuador e demais elementos (*link*) do manipulador é determinada considerando-se a presença do obstáculo, através de uma estratégia de otimização para a obtenção da cinemática inversa.

2. CINEMÁTICA

O primeiro passo na configuração de um robô é descrever a posição do efetuador e demais pontos no espaço de trabalho em relação a um sistema de coordenadas comum. Esta representação comum consiste em descrever posições cartesianas tridimensionais em termos das coordenadas de junta q do robô. Isto leva ao problema de determinação da cinemática direta do mesmo.

Para a determinação da matriz de transformação da base até o efetuador do robô, utilizam-se transformações homogêneas da forma

$$A_i = \begin{bmatrix} R_{i-1}^i & d_{i-1}^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde $R(q)$ é uma matriz de rotação e $d(q)$ é um vetor de translação (Spong, 1989). Uma transformação homogênea representa a posição da extremidade de cada *link* em relação ao *link* imediatamente anterior. Desta forma definem-se completamente as características cinemáticas de um robô manipulador com n graus de liberdade através da transformação

$$T_0^n = A_1(q_1) \cdot A_2(q_2) \cdots A_n(q_n). \quad (2)$$

A convenção de Denavit-Hartenberg propõe a representação de cada transformação homogênea A_i como produto de quatro transformações básicas de rotação e translação:

$$A_i = \text{Rot}_{z,\theta} \cdot \text{Trans}_{z,d} \cdot \text{Trans}_{x,a} \cdot \text{Rot}_{x,\alpha} \quad (3)$$

que tem os parâmetros a (*length*), α (*twist*), d (*offset*) e θ (*angle*).

Desta forma pode-se representar a estrutura de qualquer manipulador serial através de seus parâmetros, que resulta em uma matriz de transformação T específica.

Segundo esta convenção, o manipulador planar com 2 elementos da Figura 1 tem como parâmetros os dados da Tabela 1.

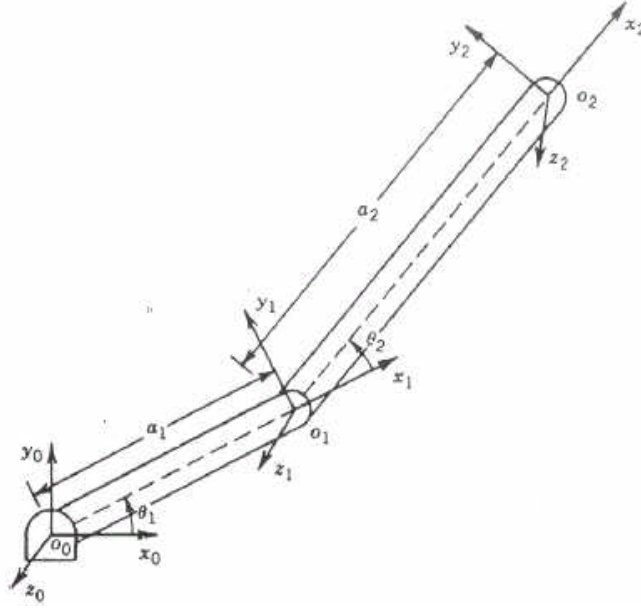


Figura 1: Manipulador planar.

Tabela 1: Parâmetros de Denavit-Hartenberg, (*) variável de junta.

Elemento	A (m)	α (rad)	d (m)	θ (rad)
1	a_1	0	0	θ_1^*
2	a_2	0	0	θ_2^*

A substituição destes parâmetros na matriz de transformação A resulta nas matrizes

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & a_1 \cos q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & a_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & a_2 \cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & a_2 \sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

e

$$T_0^2 = A_1 \cdot A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 & a_1 \cos q_1 + a_2 \cos(q_1 + q_2) \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 & a_1 \sin q_1 + a_2 \sin(q_1 + q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

que representam as características do robô.

A partir da definição da matriz T , conhecido o ponto cartesiano P_{base} de referência (base) do manipulador, pode-se determinar a posição cartesiana do efetuador para uma determinada coordenada de junta $q(\alpha, \theta)$ através da relação

$$P_{efetuador} = T(\alpha, \theta) \cdot P_{base} \quad (6)$$

Esta equação define completamente a posição cartesiana do robô em função de suas coordenadas de junta.

Como exemplo, para determinar a posição do efetuador do robô planar da Tabela 1, que tem origem $P_{base}=(0,0,0)$, elementos de tamanho $a_1=1$ metro, $a_2=0.9$ metros e ângulos de junta $\theta_1=1$ rad e $\theta_2=1.5$ rad, deve-se substituir estes parâmetros na matriz T do modelo, o que resulta em

$$P_{efetuador} = \begin{pmatrix} -0.8011 & -0.5985 & 0 & -0.1807 \\ 0.5985 & -0.8011 & 0 & 1.3801 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.1807 \\ 1.3801 \\ 0 \\ 1.0000 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Assim, conclui-se que a posição cartesiana do efetuador é $x = -0,1807$ m, $y = 1.3801$ m e $z = 0$ m.

Entretanto, em muitos casos deseja-se saber quais coordenadas de junta $q(\alpha, \theta)$ resultam numa posição cartesiana específica. A determinação destes valores consiste no estudo da cinemática inversa do robô.

Como as equações da cinemática direta são não-lineares, em geral a determinação destes ângulos na forma explícita não é fácil, pois além da complexidade característica de um sistema de equações não-lineares, as funções trigonométricas permitem em geral mais de uma solução.

Para alguns modelos de robô mais simples é possível determinar explicitamente quais são os ângulos de junta. Pode-se alternativamente recorrer a uma dedução geométrica que relacione os ângulos. Para o caso geral esta tarefa é trabalhosa e é específica para cada modelo considerado.

Com o intuito de utilizar uma metodologia que se aplique a um caso geral, propõe-se a determinação destes ângulos através de um problema de otimização, apresentado a seguir.

3. OTIMIZAÇÃO

O conceito de otimização atualmente está arraigado como um princípio determinante na análise de muitos problemas de decisão complexos. Além de uma certa elegância intrínseca ao tratamento dos problemas, freqüentemente oferece um indispensável grau de simplicidade operacional. Utilizando a filosofia de otimização, pode-se aproximar um problema de decisão complexa, envolvendo a seleção de valores para um grande número de variáveis inter-relacionadas, através da atenção a um único objetivo definido para quantificar a performance e medir a qualidade da decisão.

Este objetivo é maximizado (ou minimizado, dependendo da formulação) sujeito a restrições que limitam a seleção dos valores das variáveis de decisão. Se um aspecto conveniente de um problema pode ser isolado e caracterizado como um objetivo, a otimização oferece uma estrutura adequada para análise.

A formulação do problema geralmente envolve uma relação de compromisso entre os objetivos conflitantes de construir um modelo matemático suficientemente complexo para descrever de forma precisa a situação, e a construção de um modelo computacionalmente viável.

Dentre as diversas classes de problemas de otimização, muitos encontrados em robótica são formulados como problemas de programação não linear restritos. De uma forma geral, este tipo de problema tem a forma

$$\begin{array}{ll} \text{minimizar} & f(x) \\ \text{sujeito a} & h_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, r \\ & x \in S. \end{array} \quad (8)$$

onde x é um vetor de incógnitas de dimensão n (conhecido também como vetor de variáveis de projeto) e f , h e g são funções reais das variáveis x_i . O conjunto S é um subconjunto do espaço n dimensional. A função f é a função objetivo do problema e as equações, inequações, e o conjunto domínio definem as restrições.

Dada uma posição cartesiana no espaço a ser alcançada pelo efetuador, é necessário determinar o conjunto de respectivas coordenadas de junta que resultam nesta configuração.

Assim, determina-se os ângulos que definem a cinemática inversa.

Considerando a determinação da cinemática direta dada pela Equação (6) e supondo as coordenadas da base $P_{\text{base}}(x,y,z)$ e do efetuador $P_{\text{efetuador}}(x,y,z)$ conhecidas, deve-se determinar os valores de α_i e θ_i que satisfaçam a Equação (6).

Logo, a expressão pode ser reescrita como $T(\alpha, \theta) \cdot P_{\text{base}} - P_{\text{efetuador}} = 0$, que é convertida no problema de otimização equivalente

$$\min (T(\alpha, \theta) \cdot P_{\text{base}} - P_{\text{efetuador}})^2 \quad (9)$$

Como o valor mínimo desta expressão é zero, sua solução determina os valores de α_i e θ_i (juntas $i = 1, \dots, n$) que satisfazem a igualdade. Nos casos onde há mais de uma configuração possível, pode-se optar por diferentes resultados a partir de diferentes aproximações iniciais no o problema de otimização.

Como exemplo, considerando os parâmetros utilizados na Equação (7), pode-se determinar através da formulação de otimização, quais as coordenadas de junta que resultam na posição cartesiana do efetuador dada por $x = -0,1807$ m, $y = 1.3801$ m e $z = 0$ m.

A partir da aproximação inicial $\theta_1 = 0$ e $\theta_2 = 0$, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Cinemática inversa obtida pela otimização

CINEMATICA INVERSA			
POSICAO	X(m)	Y(m)	Z(m)
REQUERIDA	-0.18070	1.38010	0.00000
OBTIDA	-0.18042	1.38047	0.00000
DISTANCIA ENTRE PONTOS:		2.86861859E-06	
COORDENADAS DE JUNTA			
1	0.9999 rad		
2	1.4999 rad		

Utilizando a aproximação inicial $\theta_1 = 6$ e $\theta_2 = -1$, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Cinemática inversa obtida pela otimização

CINEMATICA INVERSA			
POSICAO	X(m)	Y(m)	Z(m)
REQUERIDA	-0.18070	1.38010	0.00000
OBTIDA	-0.18133	1.38054	0.00000
DISTANCIA ENTRE PONTOS: 3.43643362E-04			
COORDENADAS DE JUNTA			
1	2.4020	rad	
2	-1.4997	rad	

Ao comparar-se o valor obtido nas tabelas com a posição cartesiana prevista, observa-se que no pior caso o erro foi de 3.43×10^{-4} metros. Isto se deve ao fato de o programa de otimização determinar uma aproximação do valor mínimo. Esta diferença pode ser diminuída alterando-se critérios de convergência do algoritmo de otimização (Vanderplaats, 1999).

Nota-se também que a partir de valores iniciais distintos obteve-se resultados diferentes para os ângulos de junta, que representam as diferentes configurações que atendem à especificação de posicionamento estabelecida para o efetuador.

Deve-se destacar que a garantia da obtenção da solução está condicionada a utilização de uma coordenada inicial “suficientemente próxima” da solução do sistema, pois, em um caso geral, é possível a obtenção de um mínimo local que não seja solução (Luenberger, 1984). Experimentos computacionais realizados têm determinado sempre a solução correta. Neste trabalho esta metodologia foi estendida para situações onde há obstáculos no espaço de trabalho do robô.

A reformulação consiste em adequar a função que determina a cinemática inversa de forma a acrescentar a presença do obstáculo. Para tanto, faz-se a discretização dos pontos cartesianos ocupados pelo robô desde a base P_{base} até o efetuador $P_{efetuador}$, resultando em um conjunto P_i de pontos cartesianos.

Em seguida, deve-se definir uma função que calcule a proximidade de cada ponto P_i em relação ao obstáculo. Uma possível descrição (Nakamura, 1991) consiste na aproximação através da função

$$Q(P_i) = \left(\frac{x_i - c_x}{l_x} \right)^n + \left(\frac{y_i - c_y}{l_y} \right)^n + \left(\frac{z_i - c_z}{l_z} \right)^n \quad (10)$$

onde c_x , c_y e c_z são as componentes cartesianas do centro geométrico e l_x , l_y e l_z são os comprimentos dos lados do obstáculo.

Finalmente, define-se a função objetivo como

$$\min [(T(a, q) \cdot P_{base} - P_{efetuador})^2 + \sum_i \frac{1}{Q(P_i)}] \quad (11)$$

A expressão $Q(P_i)$ terá valores menores à medida que algum ponto P_i estiver se aproximando do obstáculo. Assim, o algoritmo procurará evitar esta situação, que causa um grande aumento no valor da função objetivo.

O parâmetro n da Equação (10) pode ser ajustado para diferentes níveis de sensibilidade à presença do obstáculo.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

O experimento numérico a seguir considera um robô planar de 4 links, que tem os parâmetros de Denavit-Hartenberg dados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de Denavit-Hartenberg, (*) variável de junta.

Elemento	A (m)	α (rad)	d (m)	θ (rad)
1	3.0	0	0	θ_1^*
2	2.0	0	0	θ_2^*
3	2.0	0	0	θ_3^*
4	2.0	0	0	θ_4^*

A sequência de posições cartesianas requeridas do efetuador são $P_{\text{efetuador}} = (3, 8, 0)$, $(5, 5, 0)$, $(7, 3, 0)$ e $(8, 1, 0)$. O valor das coordenadas de junta para cada posição foi utilizado como aproximação para a determinação das coordenadas de junta do ponto posterior e a base do robô está fixada na origem do sistema referencial $P_{\text{base}} = (0,0,0)$. A determinação das coordenadas de junta que atendem a esta especificação, em um ambiente sem obstáculos resultam nas configurações da Figura 2.

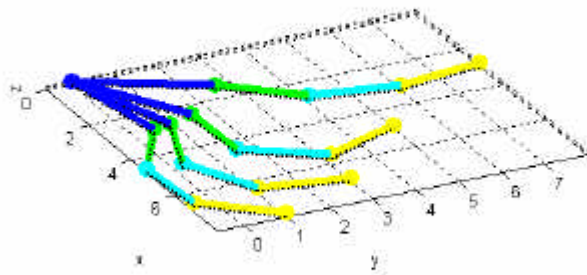


Figura 2: Configurações obtidas em um ambiente sem obstáculo.

O obstáculo considerado tem o centro geométrico posicionado em $c_x = 4$ m, $c_y = 1$ m e $c_z = 0$ m, com respectivos parâmetros $l_x = l_y = l_z = 1$ m e $n = 2$. A determinação da cinemática inversa a partir da Equação (11) resulta nas configurações apresentadas nas Figuras 3 a 6.

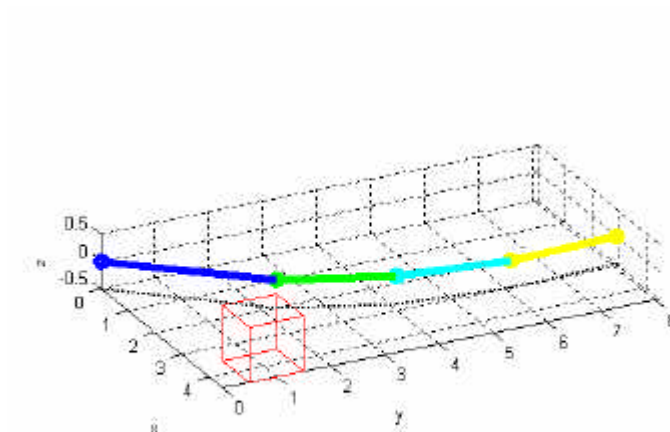


Figura 3: Configuração obtida em um ambiente com obstáculo ($P1_{\text{efetuador}}$).

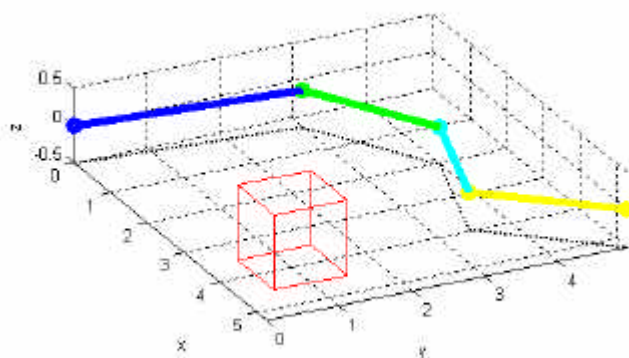


Figura 4: Configuração obtida em um ambiente com obstáculo ($P2_{\text{efetuador}}$).

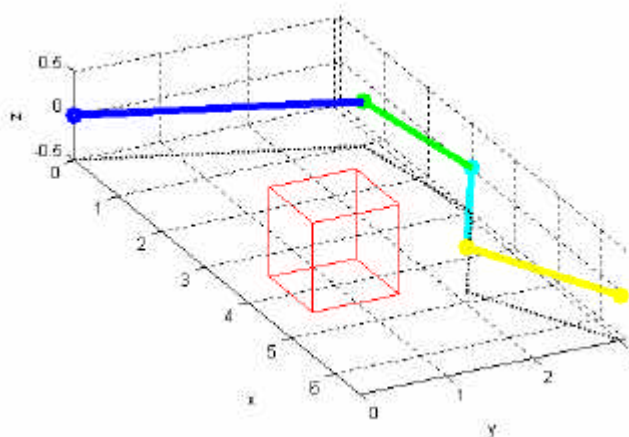


Figura 5: Configuração obtida em um ambiente com obstáculo ($P3_{\text{efetuador}}$).

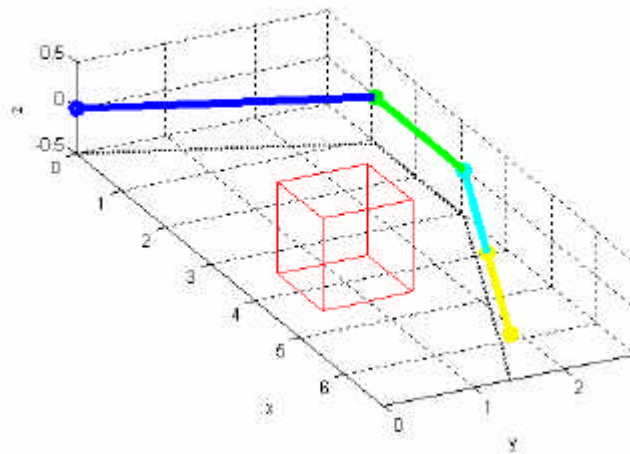


Figura 6: Configuração obtida em um ambiente com obstáculo ($P_{4_{\text{efetuador}}}$).

A análise da cinemática inversa como problema de otimização permite sempre a obtenção de uma solução. Esta metodologia permite encontrar uma posição “próxima” da posição requerida, quando não for possível a determinação de ângulos que satisfaçam o posicionamento desejado e simultaneamente garanta a distância especificada até o obstáculo. Pode-se ponderar estes dois termos da função de forma a priorizar um ou outro objetivo.

5. CONCLUSÃO

Com o objetivo de aproveitar a versatilidade característica do robô manipulador, é desejável que o planejamento de sua trajetória resulte em um movimento suave e considere a presença de obstáculos em seu espaço de trabalho.

Neste trabalho foi proposta uma estratégia de movimentação livre de colisões, do ponto de vista da cinemática do sistema. Acha-se em fase de implementação a consideração dos aspectos da dinâmica dos robôs manipuladores.

Inicialmente caracteriza-se a representação de diferentes pontos do espaço euclidiano através das coordenadas de junta, que possibilita a utilização de um referencial único para a descrição do ambiente. A partir da definição matemática da cinemática direta e inversa, obtém-se uma expressão que permite determinar a cinemática inversa a partir da solução de um problema de otimização. Com a definição de uma representação para o obstáculo no espaço de trabalho, define-se uma nova função objetivo que considera esta restrição durante a determinação da cinemática inversa.

Experimentos numéricos realizados confirmam a aplicabilidade da estratégia proposta. A estrutura do problema de otimização viabiliza o estudo de cenários variados, com a inclusão de novas restrições e ajustando-se a prioridade no cumprimento das mesmas. A simplicidade de alteração dos parâmetros relevantes, aliado ao bom desempenho computacional verificado nos exemplos implementados, indica a viabilidade de sua utilização na análise de situações reais.

A presente metodologia está sendo estendida para considerar também o distanciamento de configurações singulares, que devem ser evitadas em aplicações reais.

6. REFERÊNCIAS

- J. J. Craig, 1989. *Introduction to robotics: Mechanics & control*, second edition. Reading, MA: Addison-Wesley.
- D. G. Luenberger, 1984. *Linear and non-linear programming*, second edition. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Y. Nakamura, 1991, *Advanced Robotics: Redundancy and Optimization*, Addison-Wesley.
- M. W. Spong, and M. Vidyasagar, 1989. *Robot Dynamics and Control*, Hardcover.
- G. N. Vanderplaats, 1999, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, 3rd edition, VRD, Inc.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ROBOT MOTION PLANNING AVOIDING OBSTACLES

Rogério Rodrigues dos Santos

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia/MG
rrsantos@mecanica.ufu.br

Sezimaria de Fátima Pereira Saramago

Faculdade de Matemática, Universidade Federal de Uberlândia
saramago@ufu.br

Valder Steffen Jr.

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
vsteffen@mecanica.ufu.br

Abstract: *Robots manipulators are programmable dispositives projected to execute a great variety of tasks in a repetitive way. His conception foresees versatility so that they can be adapted to several situations. In some cases the robot's efficient use can be committed by the existence of obstacles in his workspace. Considering the presence of obstacles that restrict the robot's movement, intends a motion strategy free from collisions, in the end-effector and other links, assisting to specifications of initial and final positioning previously defined. Computational results demonstrate the applicability and efficiency of the proposed methodology.*

Keywords: *Robot manipulator, path planning.*